

А. А. СКВОРЦОВ, А. Д. АКИМЕНКО,  
М. Я. КУЗЕЛЕВ

## НАГРЕВАТЕЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА

*Допущено  
Министерством высшего и среднего  
специального образования СССР  
в качестве учебного пособия  
для студентов высших технических  
учебных заведений СССР*



ИЗДАТЕЛЬСТВО  
«ВЫСШАЯ ШКОЛА»  
МОСКВА · 1965

## ПРЕДИСЛОВИЕ

*В учебном пособии изложены основы теории, конструкции и особенности эксплуатации нагревательных устройств, применяемых при обработке металлов давлением на машиностроительных и металлургических заводах.*

*Учебное пособие предназначено для студентов высших учебных заведений. Оно может быть использовано инженерно-техническими работниками промышленных предприятий и проектных организаций.*

◆

Настоящее учебное пособие написано на основе курса лекций, читаемых в Горьковском политехническом институте профессорско-преподавательским составом кафедры «Металлургические и нагревательные печи». В нем изложены теоретические основы работы нагревательных устройств, применяемых при обработке металлов давлением, освещены вопросы, связанные с рациональными способами и режимами нагрева металла в печах, а также с использованием топлива.

В учебном пособии описаны основные типы печей, применяемых в прокатных, кузнечно-прессовых и кузнечно-штамповочных цехах, а также способы механизации загрузки, выгрузки и движения материала в печах.

В одной из глав изложены способы электронагрева и конструкции электрических печей и электронагревательных устройств.

Объем учебного пособия не позволил осветить вопросы контроля и автоматизации нагревательных устройств, которые читаются в качестве самостоятельного курса.

С 1 января 1963 г. в СССР введена для предпочтительного применения новая Международная система единиц (СИ), принятая в 1960 г. XI Генеральной конференцией по мерам и весам. В связи с этим в учебном пособии все размерности даны в новой системе единиц.

В книге материал между авторами распределен следующим образом: введение и главы I, II, V, VI и XII написаны проф. докт. техн. наук А. А. Скворцовым, III, IV и VIII — доц. канд. техн. наук А. Д. Акименко, VII, IX, X и XI — доц. М. Я. Кузелевым, под общей редакцией проф. докт. техн. наук А. А. Скворцова.

Книга предназначена в качестве учебного пособия для студентов специальностей «Обработка металлов давлением» и «Кузнечно-прессовое машиностроение» политехнических вузов.

Все критические замечания и пожелания по содержанию книги просьба направлять по адресу издательства.

## ВВЕДЕНИЕ

Процесс нагрева металла перед обработкой давлением (ковкой, штамповкой, прокаткой и т. д.) в целях получения необходимых механических свойств — высокой пластичности при низкой механической прочности — является очень важным и ответственным. От правильной его организации и выполнения зависят как производительность машин-орудий, так и качество выпускаемой продукции.

Нагревательные устройства — пламенные и электрические, — применяемые при обработке металлов давлением, являются очень важной, хотя и специфической, частью оборудования промышленных предприятий.

Вопросам теории и конструирования печей в нашей стране уделяется большое внимание, что объясняется тем огромным значением, которое имеет это оборудование не только в области обработки металлов давлением, но и в других отраслях промышленности.

Работа любой пламенной печи складывается из горения топлива — превращения химической энергии топлива в тепловую; движения газов, являющихся теплоносителем, и процессов теплопередачи, связанных с нагревом металла, потерей тепла в окружающее пространство и т. д. Кроме этих основных, происходят и другие процессы, например движение нагреваемого материала, окисление поверхностных слоев металла, процессы, связанные с износом материалов, из которых выполнена кладка печи, образование шлака и др.

В настоящее время теоретической основой изучения горения являются тепловая теория и теория цепных реакций, созданные лауреатом Нобелевской премии акад. Н. Н. Семеновым.

Систематическое изучение вопросов промышленного сжигания топлива в нашей стране начали проф. В. И. Гриневецкий и К. В. Кирш, организовавшие научно-исследовательский институт, впоследствии реорганизованный во Всесоюзный теплотехнический институт имени Ф. Э. Дзержинского.

Работы в области изучения горения топлива провели ленинградские ученые Центрального котлотурбинного института имени И. И. Ползунова и Ленинградского политехнического инсти-

тута. Проф. Н. И. Палеев детально изучал вопрос горения пылевидного топлива. Под его руководством доц. В. В. Померанцев создал теорию скоростного сжигания кускового топлива. Под руководством проф. Г. Ф. Кнорре разработан способ сжигания жидкого топлива с предварительной газификацией и т. д.

Сжигание газообразного топлива исследуется в Энергетическом институте Академии наук СССР проф. М. Б. Равичем. То же исследование проводят сотрудники Института использования газа АН УССР в Киеве под руководством чл.-корр. АН УССР В. Ф. Копытова и др.

Интересную работу по расчетам горения провел проф. С. Г. Тройб из Уральского политехнического института. В целях получения безокислительного нагрева докт. техн. наук В. А. Куроедов (ЦНИИТМАШ), а также проф. А. И. Ващенко и другие исследователи ведут работу по использованию неполного горения газообразного топлива.

На основе исследовательских работ и использования передового зарубежного опыта советские инженеры создают высокопроизводительные, механизированные, автоматизированные и экономичные топочные устройства.

Развитие науки о движении газов в печах ведет свое начало от известной работы М. В. Ломоносова «О вольном движении воздуха в рудниках примеченном», написанной в 1742 г. М. В. Ломоносов установил основные законы поведения легкой жидкости (или газа) в среде более тяжелой. Дальнейшее развитие теории движения газов связано с именами ученых Д. Бернулли, Д. Эйлера, О. Рейнольдса, Л. Прандтля и др.

В 1889 г. была издана работа проф. С. Б. Лукашевича об отоплении и вентиляции, в которой автор разработал теорию движения газов в печах, в частности вопрос о движении газа по вертикальным параллельным каналам.

Исследование работы промышленных печей в России началось в середине XIX в. В 1853 г. инженер Свиязев опубликовал книгу, в которой изложил результаты наблюдений за работой печей и сформулировал основные положения об их конструировании и строительстве. В 1890—1900 гг. акад. М. А. Павлов, инженер Н. П. Асеев и другие проводили эксперименты, изучая работу печей.

В период с 1905 по 1925 г. проф. В. Е. Грум-Гржимайло совместно с проф. И. Г. Есьманом создал первую общую теорию печей — так называемую гидравлическую теорию.

В соответствии с этой теорией проф. В. Е. Грум-Гржимайло всю работу печи рассматривал с точки зрения гидравлики, т. е. науки о движении капельных жидкостей, определяя даже рас-

ход топлива по количеству газов, необходимых для заполнения объема печи, а не по потребности в тепловой энергии.

Эта теория относилась к печам с естественным движением газов. Увеличение же производительности печей вело к созданию в них движения газов за счет внешних источников энергии — вентиляторов, эжекторов, форсунок, горелок и т. д.

В настоящее время многие положения, выдвинутые проф. В. Е. Грум-Гржимайло, устарели и потеряли свое значение, однако создание первой научно-обоснованной теории работы промышленных печей имело огромное значение и способствовало дальнейшему развитию этой теории.

«Гидравлическую» теорию печей одним из первых подверг критике акад. Н. Н. Доброхотов. В работах «К законам движения газов в печах», «Механика газов сименс-мартеновской печи», «Критика гидравлической теории печей» и других, опубликованных в 1924—1925 гг., он доказал невозможность применения законов гидравлики к движению газов в печах (при их вынужденном движении), а также указал на большое значение энергетики и процессов теплопередачи в работе промышленных печей, поднимая теорию работы печей на новую ступень.

В изучении движения газов большую роль сыграла разработанная акад. М. В. Кирпичевым и его учениками (проф. Л. С. Эйгенсон, проф. А. А. Гухман и др.) теория подобия и основанная на ней теория моделирования движения жидкостей и газов.

Исследование движения газов в печах на моделях, выполненных в соответствии с этой теорией, дало возможность глубоко исследовать те вопросы движения газов, которые пока не могут быть решены математически (многие вопросы движения газов при турбулентном режиме).

В настоящее время советские ученые разрабатывают математически турбулентное движение жидкостей и газов, а также огневое моделирование, т. е. совместное моделирование процессов движения газов и процессов теплопередачи.

В области исследования процессов теплопередачи большую работу провели советские ученые по расчету теплопередачи излучением в рабочем пространстве печей (Б. В. Старк, В. Н. Тимофеев, Г. П. Поляк, И. М. Рафалович, Д. В. Будрин, С. Н. Шорин, А. В. Кавадеров, Ю. А. Суринов и др.).

Проф. М. А. Глишков в работе «Мартеновская печь как теплотехнический агрегат» и в других разработал теорию плавления тел и рассмотрел весь комплекс теплопередачи в мартеновской печи.

Проф. Б. Н. Китаев в работе «Теплообмен в шахтных пе-



чах» разработал очень сложный расчет теплопередачи в шахтных печах.

Акад. М. А. Михеев обобщил исследования в области теплопередачи соприкосновением — конвекцией.

В области теории распространения тепла теплопроводностью следует отметить работы русских ученых Г. П. Иванцова, Н. Ю. Тайца, И. Д. Семикина, Д. В. Будрина, В. Н. Соколова и др., а также немецких ученых Г. Гребера, А. Шака, Е. Шмидта и др., послужившие основой для расчета нагрева слитков и заготовок в печах.

Проф. Н. Ю. Тайц в 1933 г. предложил свою методику расчета нагрева тел при переменной во времени температуре среды. Затем он же разработал теорию нагрева тел с неравномерным распределением температуры в начале нагрева, метод расчета нагрева слитков и заготовок с учетом возникающих при нагреве температурных напряжений и т. д.

Д. В. Будрин разработал новые кривые для расчета нагрева и охлаждения тел в среде с постоянной температурой, более удобные и точные, чем кривые Гребера-Шака. В. Н. Соколов разработал кривые для расчета нагрева тел при теплопередаче на поверхность по закону лучеиспускания.

Русские ученые В. С. Лукьянов, Б. М. Китаев, Г. П. Иванцов, Д. В. Будрин и другие, а также итальянский ученый Эммануэли на основании теории подобия и гидротепловой аналогии разработали теорию гидравлического моделирования процессов теплопроводности — процессов нагрева, охлаждения, затвердевания и т. д.

В СССР (Л. И. Гутенмахер и др.) и за рубежом (Пашкис, Крей, Роми и др.) ведутся работы по созданию приборов для изучения распространения тепла теплопроводностью на основе электротепловой аналогии, а также по использованию электронных счетных машин для решения сложных задач по теплопередаче.

Развитие применения электроэнергии для процессов нагрева металла описано в XIII главе «Электрические нагревательные устройства».

В достижении высоких показателей работы печей на наших заводах огромную роль играют новаторские методы работы нагревателей, кузнецов, прокатчиков и т. д., а также соревнование отдельных новаторов, цехов и предприятий между собой. Коммунистические методы труда создают возможность для достижения очень высоких показателей при съеме продукции с единицы площади пода печей, а также при использовании тепла топлива.

В качестве примера можно привести вопрос о рациональном времени нагрева слитков и заготовок.

Увеличение производительности машин-орудий благодаря новаторским методам работы кузнецов и прокатчиков потребовало значительного повышения производительности печей. Это могло быть достигнуто без введения в строй новых агрегатов только путем сокращения времени нагрева и повышения производительности существующих агрегатов. В 30-х годах XX в. русские ученые и инженеры провели большое количество исследований, показавших возможность значительного сокращения продолжительности нагрева слитков и заготовок под ковку, штамповку, прокатку. Так, на заводе «Красное Сормово» время нагрева крупных слитков под ковку в результате проведенных исследовательских работ было сокращено на 30% и более.

Одновременно с исследованием повышения эффективности работы печей ведется работа по улучшению условий обслуживания печей, обеспечению безопасности работы при эксплуатации, механизации и автоматизации пламенных и электрических печей.

Применяют различные системы отдувки горячих газов, водяные завесы, водоохлаждаемые рамы и крышки, а также обдув на рабочих местах воздухом, ограждения и заземления на электропечах. При создании механизированных и автоматизированных агрегатов особое внимание уделяют технике безопасности.

За последнее время все большее количество нагревательных печей оснащают приборами автоматического контроля и регулирования.

Отечественные научно-исследовательские организации (Институт автоматики и телемеханики Академии наук СССР, Центральное проектное конструкторское бюро, «Главпроектмонтажавтоматика», Центральная лаборатория автоматики и др.) разрабатывают новые, более современные методы автоматического регулирования: регулирование температуры по первой производной, экстремальное регулирование, регулирование температуры нагрева металла по темпу прокатки и т. д.

Актуальной в настоящее время является разработка инженерных методов расчета установок автоматического регулирования, так как существующие методы сложны и в ряде случаев недоступны инженеру завода.

Грандиозные перспективы развития промышленности, намеченные XXII съездом КПСС, не могли оставить в стороне и дальнейшее развитие печного хозяйства наших предприятий. Задачи, поставленные партией и правительством по построению основ коммунистического общества, не могут быть решены без усовершенствования, механизации и автоматизации производ-

## ТОПЛИВО

ственных процессов, в частности, без резкого улучшения работы печей и нагревательных устройств, обслуживающих кузнечные, ковочные, штамповочные, прокатные и другие агрегаты, без создания новых высокопроизводительных механизированных и автоматизированных печей и нагревательных устройств.

Необходимо все шире внедрять механизированные печи с автоматическим регулированием температурного режима, осваивать и широко применять газовые печи для безокислительного нагрева под ковку, штамповку, прокатку.

Целесообразно шире использовать тепло отходящих газов печей не только для подогрева воздуха, но и для энергетических целей. Необходимо внедрять электронагрев, обеспечивающий более культурные условия работы и экономию металла. Наконец, необходимо приступить к широкому созданию полностью автоматизированных агрегатов по обработке металлов давлением, в которых нагревательные устройства являлись бы частью всего агрегата и работали автоматически.

## § 1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Топливом, по определению Д. И. Менделеева, называется в технике вещество, используемое для получения тепловой энергии в промышленном масштабе. Превращение химической энергии топлива в тепловую происходит в процессе окисления горючих составляющих топлива кислородом воздуха. Этот процесс называется горением.

К веществу, используемому как топливо, предъявляют следующие основные требования: 1) достаточно большое количество энергии, выделяющееся при горении на единицу веса или объема; 2) достаточно большие запасы в природе, обеспечивающие низкую стоимость добычи; 3) газообразность продуктов горения; 4) безвредность продуктов горения для аппаратуры, обслуживающего персонала, окружающего животного и растительного мира.

Всем этим требованиям удовлетворяют вещества органического происхождения, характеризующиеся высоким значением тепловых эффектов при окислении, газообразностью и относительной безвредностью продуктов горения. При сжигании топлива мы как бы используем солнечную энергию, аккумулированную в органическом веществе при его образовании в предшествовавшие геологические эпохи.

Общая классификация топлив, основанная на их агрегатном состоянии и происхождении, приведена в табл. 1.

Кроме перечисленных видов топлива, имеются и другие энергетические ресурсы, которые можно использовать для получения тепловой энергии: гидроэнергия, энергия ветра, энергия солнечной радиации; энергия приливов и отливов, энергия глубинных слоев земли, атомная энергия и др. Из них в настоящее время практически используют только гидроэнергию и энергию

Таблица 1

## Общая классификация топлив

Агрегатное состояние	Происхождение топлива	
	естественное	искусственное
Твердое топливо	Дрова, торф, бурый уголь, горючие сланцы, каменный уголь, антрацит	Древесный уголь, кокс, полукокс, брикеты, пылевидное топливо
Жидкое топливо	Нефть	Бензин, керосин, соляровое масло, мазут и другие продукты переработки нефти. Каменноугольная смола, сланцевое масло, спирт и пр.
Газообразное топливо	Природный или естественный и попутный или нефтепромысловый газы	Коксовый, светильный, нефтяной, генераторный, водяной, доменный и другие газы

ветра, начинают использовать атомную энергию, энергию солнечной радиации и ведут работы по использованию других энергетических ресурсов.

Энергетические ресурсы, практически используемые в настоящее время, можно разделить на **невозобновляемые** и **возобновляемые**. К невозобновляемым относятся бурый и каменный уголь, нефть, горючие сланцы, частично торф и дрова; к возобновляемым — частично торф и дрова (ежегодный прирост), остатки однолетних растений (солома), гидроэнергия и энергия ветра.

Атомная энергия должна быть отнесена к невозобновляемым ресурсам, так как запасы расщепляющихся веществ на земле ограничены.

Соотношение возобновляемых и невозобновляемых энергоресурсов (без атомной энергии) в мировых запасах соответствует примерно 18 и 82%, т. е. мы расходует в основном запасы энергии, накопленные на земле в течение предшествовавших геологических эпох.

На основании данных 1924 г. о запасах каменных углей и нефти буржуазные ученые делали прогнозы об истощении основных энергетических ресурсов в самое ближайшее время.

При оценке прироста потребления каменных углей на 2—3% в год, а нефти — на 8% в год они подсчитали, что разведанных тогда запасов каменных углей хватит примерно на 200 лет, а нефти примерно на 20 лет.

Однако эти пессимистические выводы практически не оправдались, так как увеличение разведанных запасов каменных углей и нефти происходит значительно быстрее, чем уменьшение их за счет потребления. Например, разведанные запасы ископаемых углей в СССР в 1924 г. исчислялись в 429 млрд. т, на 1 января 1937 г. — уже в 1654 млрд. т, а в 1958 г. — 8670 млрд. т (или 53% от мировых запасов) и продолжают увеличиваться.

Мировые запасы нефти за 12 лет (с 1946 по 1958 г.) увеличились на 3,55 млрд. т, несмотря на то, что за это время было добыто и израсходовано примерно 1,8 млрд. т.

Следовательно, в настоящее время можно не опасаться скорого истощения топливных ресурсов.

Однако поскольку невозобновляемые ресурсы рано или поздно будут исчерпаны, вопросу рационального использования энергетических ресурсов в СССР придается большое значение.

В качестве примера улучшения использования энергетических ресурсов можно привести снижение удельного расхода топлива на производство стали в мартеновских печах. Первая мартеновская печь на Сормовском заводе (1869 г.) расходовала примерно 0,7—0,8 т условного топлива на 1 т стали. Далее удельные расходы в целом снижались следующим образом: 1900—1917 гг. — 0,35—0,45 т; 1927 г. — 0,30 т; 1937 г. — 0,228 т; 1950 г. — 0,216 т; 1955 г. — 0,203 т; 1958 г. — 0,195 т условного топлива.

Подобное снижение удельных расходов топлива происходит и в других промышленных печах.

Уменьшение потерь тепла и снижение удельных норм расхода топлива является в нашей стране народнохозяйственной задачей. Новые печные агрегаты необходимо проектировать и строить так, чтобы они не только обеспечивали необходимую производительность и технологию нагрева, но и имели более высокий энергетический коэффициент полезного действия. Развитие добычи и потребления различных видов топлива и электроэнергии в нашей стране показано в табл. 2.

Из цифр, приведенных в табл. 2, видно, как интенсивно развивалось использование энергетических ресурсов после Великой Октябрьской социалистической революции.

Только в СССР и в странах социалистического лагеря, где народное хозяйство развивается по плану, мероприятия по рациональному использованию естественных ресурсов получают наибольший размах.

Примером этому может служить развитие использования местных видов топлива (торф, подмосковный уголь и т. д.) в 20-х и начале 30-х годов, когда наша промышленная база была еще слабой. В настоящее время в связи с огромным развитием

Таблица 2

## Развитие добычи топлива и производства электроэнергии в СССР

Виды топлива и электроэнергии	1913 г. (до Октябрьской революции)	1928 г. (начало I пятилетки)	1938 г. (начало III пятилетки)	1953 г. (после Великой Отече- ственной войны)	1957 г.	1960 г.	1965 г. (по семи- летнему плану)
Дрова, млн. м <sup>3</sup> . . . . .	100	74,5	120,0	160	—	—	75
Торф, млн. т . . . . .	1,69	5,3	25,0	38,6	50	—	71
Ископаемые угли и горю- чие сланцы, млн. т . . . . .	29,1	35,37	141,6	320,0	475,0	513,0	600—612
Нефть, млн. т . . . . .	9,23	11,62	31,0	53,0	98,3	148,0	230—240
Природный газ, млрд. м <sup>3</sup>	—	—	—	10	20,2	47,0	150
Гидроэнергия, млрд. кет.ч	0,08	0,36	6,0	22,5	39,3	59	103—114
Общая выработка элект- роэнергии, млрд. кет.ч . .	1,9	5,0	39,4	134	209	292	500—520

техники в нашей стране намечено значительное изменение топливного баланса в связи с увеличением использования таких видов топлива, как жидкое и особенно природный газ. Это приведет к значительному снижению трудоемкости при получении топлива и себестоимости продукции.

Переход к более широкому использованию природного газа стал возможным только при соответствующем уровне развития техники, когда стало возможно прокладывать газопроводы большой протяженности: Дашава — Киев, Саратов — Москва, Ставрополь — Москва, Дашава — Минск и др.

Удельный вес потребления отдельных видов топлива в общем топливном балансе нашей страны характеризуют следующие цифры:

	1955 г.	1965 г.	1970—1975 гг.
Ископаемые угли и горючие сланцы . . . . .	65,5%	46,6%	36,9%
Дрова . . . . .	6,8%	2,2%	2,4%
Торф . . . . .	4,3%	2,8%	2,5%
Нефть . . . . .	21,1%	31,3%	34,6%
Природный газ . . . . .	2,3%	17,1%	23,6%

## § 2. ХАРАКТЕРИСТИКИ ТОПЛИВА

## 1. Химический состав топлива

Основными горючими составляющими топлива являются углерод и водород, выделяющие при окислении большое количество тепла. Они входят в состав топлива обычно не в чистом виде, а в виде соединений с другими элементами (только водород в составе газообразного топлива может быть в молекулярном виде).

Водород, связанный с кислородом в виде гидроксильных групп и влаги, в горении не участвует. От содержания углерода и водорода в горючей массе топлива зависит в основном его теплотворность.

Кроме углерода и водорода, в состав горючей части топлива входят кислород, азот и сера.

Кислород является в топливе нежелательным элементом, так как он связывает водород и частично углерод в гидроксильные группы, влагу и угольную кислоту, уменьшая количество горючих составляющих, окисляющихся при горении, а следовательно, и теплотворность топлива.

Азот не принимает участия в реакциях горения и переходит в продукты горения. Кислород и азот образуют внутренний (органический) балласт топлива.

Сера может находиться в топливе в нескольких разновидностях. В твердом топливе может быть: 1) сера органическая  $S_o$ , входящая в состав сложных органических соединений, 2) сера колчеданная, или пиритная,  $S_k$  в виде  $FeS_2$  и 3) сера сульфатная  $S_c$  в виде солей серной кислоты  $CaSO_4$ ,  $MgSO_4$ ,  $FeSO_4$  и др. Сера органическая и колчеданная участвует в горении и обозначается  $S_o + S_k = S_l$  (сера летучая). Сера сульфатная в горении не участвует, так как она уже связана с кислородом. Суммарное содержание серы  $S_{общ} = S_o + S_k + S_c$ . В жидком топливе сера содержится в виде: 1) свободной серы и 2) органической  $S_{общ} = S_{св} + S_o$ . В газообразном топливе сера связана или с водородом в виде  $H_2S$  или с кислородом в виде  $SO_2$ . Сера является вредной составляющей топлива, так как двуокись серы  $SO_2$  отравляет окружающий воздух, и, кроме того, наличие серы в ряде случаев ухудшает качество обрабатываемого металла и увеличивает его окисление при нагреве.

Кроме перечисленных элементов, топливо содержит еще так называемый балласт — негорючую часть. Балласт твердого и жидкого топлива состоит из золы (А) и влаги (В), балласт газообразного топлива — из негорючих газов и паров воды.

Зола топлива состоит из негорючих неорганических соединений. Содержание ее зависит не только от вида топлива, но и от условий его добычи и транспортировки. Основными составляющими золы являются: глинозем ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ); окись кремния ( $\text{SiO}_2$ ); окись кальция ( $\text{CaO}$ ); закись и окись железа ( $\text{FeO}$  и  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ); соли азотной и других кислот, а также минеральные примеси и неорганические соединения. При использовании топлива большое значение имеет температура плавления золы. При пониженной температуре плавления зола заливает колосниковую решетку. Это нарушает процесс горения (приходится чаще чистить решетку) и приводит к увеличению потерь горючего со шлаком. Температура плавления золы связана с ее составом: повышение содержания в ней глинозема и окиси кремния повышает, а повышение содержания щелочных соединений понижает температуру плавления. Зола с температурой плавления выше  $1400^\circ\text{C}$  называется тугоплавкой, а ниже  $1200^\circ\text{C}$  — легкоплавкой.

Увеличение содержания золы уменьшает содержание горючей части топлива и его теплотворность, поэтому зола является нежелательной составляющей.

Влага в топливе является еще более нежелательной составляющей, так как от нее не только уменьшается горючая часть, но и бесполезно затрачивается часть теплоты горения на нагревание и испарение влаги. В результате сильно снижается теплотворность и понижается температура горения. Наличие влаги в твердом топливе повышает в некоторых случаях его самовозгоряемость и может привести к омерзанию при хранении.

Влагу в топливе разделяют на внешнюю (механическую) и внутреннюю. Внешняя влага попадает в топливо из окружающей среды во время его добычи, транспортировки и хранения. Внутренняя влага в свою очередь делится на гигроскопическую и гидратную. Внешнюю влагу можно удалить путем естественной сушки. Гигроскопическую влагу удаляют из топлива путем искусственной сушки при температуре примерно  $100^\circ\text{C}$ . Гидратной называется влага, содержащаяся в минеральных и органических соединениях. Ее не удаляют ни при естественной, ни при искусственной сушке, поэтому такую влагу обычно не включают в общее содержание влаги топлива.

Сумма внешней и гигроскопической влаги называется рабочей влажностью топлива ( $W^p$ ).

Содержание влаги в твердом топливе колеблется в очень больших пределах: от 50—55% для свежесрубленной древесины и некоторых сортов торфа и молодого бурого угля до 2—5% для антрацита.

Содержание влаги определяют по ГОСТ 6329—52 путем вы-

сушивания пробы топлива в сушильном шкафу (при температуре  $105\text{—}110^\circ\text{C}$ ) до получения постоянного веса.

В жидком топливе вся влага является внешней. Ее определяют по ГОСТ 2477—44.

В газообразном топливе влага находится в виде паров воды. Ее определяют путем пропускания определенного объема газа через сосуды с влагопоглощающим веществом.

Полный и точный химический анализ топлива должен отвечать на вопрос, какие соединения и в каких количествах образуют данный вид топлива. Однако в настоящее время не разработан метод, который бы позволил для любого вида топлива дать ответ на этот вопрос. Для характеристики твердого и жидкого топлива обычно пользуются так называемым элементарным составом.

По предложению Всесоюзного теплотехнического института, результаты элементарного анализа выражают в зависимости от сочетания элементов: рабочий состав топлива, сухую, горючую и органическую массу.

В рабочий состав топлива входят следующие компоненты:

$$\text{C}^p + \text{H}^p + \text{O}^p + \text{N}^p + \text{S}^p + \text{A}^p + \text{W}^p = 100\% \text{ по весу.} \quad (1)$$

Сухой массой называется топливо, освобожденное от влаги путем высушивания при  $105\text{—}110^\circ\text{C}$ ,

$$\text{C}^c + \text{H}^c + \text{O}^c + \text{N}^c + \text{S}^c + \text{A}^c = 100\% \text{ по весу.} \quad (2)$$

Горючей массой называется топливо, лишенное влаги и золы:

$$\text{C}^g + \text{H}^g + \text{O}^g + \text{N}^g + \text{S}^g = 100\% \text{ по весу.} \quad (3)$$

Органической массой называется часть топлива, не содержащая влаги, золы и серы:

$$\text{C}^o + \text{H}^o + \text{O}^o + \text{N}^o = 100\% \text{ по весу.} \quad (4)$$

Смысл такого метода характеристики химического состава топлива заключается в том, что когда требуется знание рабочего состава топлива, можно не производить каждый раз полного химического анализа, а определить только содержание влаги и золы или влаги, золы и серы, пользуясь составом горючей или органической массы, взятым из соответствующих справочников. Следует отметить, что состав органической и горючей массы для

топлива определенной марки и определенного месторождения колеблется незначительно.

Коэффициенты для пересчета элементарного состава при переходе от одного состава к другому приведены в табл. 3.

Таблица 3

Коэффициенты для пересчета состава твердого и жидкого топлива

Масса, которой производят пересчет	Коэффициенты для пересчета на массу			
	рабочую	сухую	горючую	органическую
Рабочая	1	$\frac{100}{100 - W^p}$	$\frac{100}{100 - (W^p + A^p)}$	$\frac{100}{100 - (W^p + A^p + S_d^p)}$
Сухая	$\frac{100 - W^p}{100}$	1	$\frac{100}{100 - A^c}$	$\frac{100}{100 - (A^c + S_d^c)}$
Горючая	$\frac{100 - (W^p + A^p)}{100}$	$\frac{100 - A^c}{100}$	1	$\frac{100 - S_d^c}{100 - S_d^r}$
Органическая	$\frac{100 - (W^p + A^p + S_d^p)}{100}$	$\frac{100 - (A^c + S_d^c)}{100}$	$\frac{100 - S_d^r}{100}$	1

Газообразное топливо представляет собой смесь горючих и негорючих газов и водяных паров. Химический анализ его точно отвечает на вопрос, из каких составляющих, и в каком количестве состоит газообразное топливо. К горючим газам, входящим в состав газообразного топлива, относятся: окись углерода (CO); водород (H<sub>2</sub>); метан (CH<sub>4</sub>); более тяжелые углеводороды — этан, пропан, бутан и другие (C<sub>n</sub>H<sub>m</sub>), сероводород (H<sub>2</sub>S). К негорючим газам — углекислота (CO<sub>2</sub>), азот (N<sub>2</sub>), кислород (O<sub>2</sub>), двуокись серы (SO<sub>2</sub>), влага (H<sub>2</sub>O). Химический состав газообразного топлива обычно характеризуется содержанием отдельных составляющих в объемных процентах в сухом газе:

$$CO^c + H_2^c + CH_4^c + C_n H_m^c + H_2 S^c + CO_2^c + SO_2^c + N_2^c + O_2^c = 100\% \text{ по объему.} \quad (5)$$

Состав влажного газа или рабочий состав выражают формулой

$$CO^{вл} + H_2^{вл} + CH_4^{вл} + C_n H_m^{вл} + H_2 S^{вл} + CO_2^{вл} + SO_2^{вл} + O_2^{вл} + N_2^{вл} + H_2 O = 100\% \text{ по объему.} \quad (6)$$

Расход газа измеряют в кубических метрах при н. ф. у.\*.

Содержание влаги и других примесей (смолы, жидких углеводородов, угольной или минеральной пыли и др.) выражают в граммах на кубический метр сухого газа (10<sup>-3</sup> г/м<sup>3</sup> при н. ф. у.).

Сухой газ пересчитывают на влажный по формулам:

$$\left. \begin{aligned} CO^{вл} &= CO^c \frac{100}{100 + 0,1242 W} \%, \\ H_2 O^{вл} &= H_2 O^c \frac{100}{100 + 0,1242 W} \%, \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

где W — содержание влаги в 10<sup>-3</sup> кг/м<sup>3</sup> сухого газа при н. ф. у.

Если содержание влаги в газообразном топливе неизвестно, то приблизительно принимают содержание водяных паров при данной температуре и 100-процентном насыщении.

## 2. Теплотворность топлива

Теплотворностью, или теплотой сгорания, топлива называется количество тепла, выделяющееся при полном сгорании единицы веса (или объема) топлива. Теплотворность (теплота сгорания) является одной из важнейших характеристик топлива, так как топливо сжигают именно для получения тепла.

Различают две величины теплотворности (теплоты сгорания): высшую и низшую. Высшей теплотворностью называется то количество тепла, которое выделяется при сжигании единицы топлива, если продукты горения будут охлаждены до комнатной температуры и заключающаяся в них влага будет сконденсирована. При использовании топлива в технике обычно продукты горения не охлаждаются до такой степени, а уходят с температурой выше 100° С, и влага, заключенная в продуктах горения, не конденсируется. Этому случаю соответствует низшая тепло-

\* Нормальные физические условия (н. ф. у.) соответствуют температуре 273° К и давлению 0,101 Мн/м<sup>2</sup>.

творность. Соотношение между низшей и высшей теплотворностями выражают формулой

$$Q_{\text{низш}} = Q_{\text{высш}} - qW_{\text{пр. гор}} \text{ кдж/кг, или кдж/м}^3 \text{ при н. ф. у.,} \quad (8)$$

где  $Q_{\text{высш}}$  — высшая теплотворность (теплота сгорания);

$Q_{\text{низш}}$  — низшая теплотворность (теплота сгорания);

$q$  — теплота испарения и охлаждения влаги от  $100^\circ \text{C}$  до комнатной температуры; обычно принимают  $q \approx 2512 \text{ кдж/кг}$  влаги;

$W_{\text{пр. гор}}$  — содержание влаги в продуктах горения топлива,  $\text{кг/м}^3$  при н. ф. у.

Для твердого и жидкого топлива

$$W_{\text{пр. гор}} = \frac{9H^p + W^p}{100} \text{ кг/кг топлива.}$$

Тогда

$$Q_{\text{низш}} = Q_{\text{высш}} - 25,12(9H^p + W^p) \text{ кдж/кг.} \quad (8a)$$

Теплотворность (теплота сгорания) топлива можно определять двумя способами: экспериментальным и расчетным. В первом случае экспериментально определяют количество тепла, выделяющееся при горении определенного количества топлива. Для этого используют приборы, которые называются калориметрами (ГОСТ 147—54). Конструкции этих приборов различны в зависимости от вида топлива. Основной принцип их устройства заключается в том, что тепло, выделившееся при горении определенного, достаточно точно измеренного количества топлива, поглощается водой. Зная количество воды и изменение ее температуры, можно определить количество выделившегося при горении тепла и теплотворность топлива.

Этот метод используют широко, но для правильного определения теплотворности приходится вводить ряд поправок, кроме того, с помощью калориметра всегда определяют высшую теплотворность. Второй расчетный метод основан на законе Гесса, по которому «теплота сгорания соединения равна разности между теплотами сгорания углерода, водорода и серы и теплотой образования этого соединения», и на представлении о теплотворности, как о сумме теплот горения содержащихся в топливе элементов или их соединений, что наиболее точно соответствует газообразному топливу, которое действительно представляет смесь газообразных составляющих. Зная количество тепла, которое выделяется при горении каждой из горючих составляющих (приложение 1), получим следующие формулы для определения теплотворности газообразного топлива.

Высшая теплотворность (теплота сгорания):

$$Q_{\text{высш}} = 126,4CO + 127,7H_2 + 397,7CH_4 + 636,5C_2H_4 + 699,2C_2H_6 + 992,3C_3H_8 + 1285,3C_4H_{10} + 255,4H_2S \text{ кдж/м}^3 \text{ при н. ф. у.} \quad (9)$$

Низшая теплотворность (теплота сгорания):

$$Q_{\text{низш}} = 126,4CO + 107,8H_2 + 358,3CH_4 + 590,2C_2H_4 + 636,3C_2H_6 + 912,7C_3H_8 + 1184,9C_4H_{10} + 234,5H_2S \text{ кдж/м}^3 \text{ при н. ф. у.} \quad (10)$$

Для определения теплотворности твердого и жидкого топлив, у которых вид соединений элементов в горючей массе не всегда можно определить, различные авторы предлагали большое количество эмпирических формул. В этих формулах взамен теплоты реакций горения элементов в свободном состоянии подобраны другие — меньшие величины. Наиболее правильно эти величины были подобраны Д. И. Менделеевым, формулы которого широко используют для определения теплотворности:

$$Q_{\text{высш}} = 339,1C^p + 1256H^p + 108,8(S^p - O^p) \text{ кдж/кг;} \quad (11)$$

$$Q_{\text{низш}} = 339,1C^p + 1256H^p + 108,8(S^p - O^p) - 25,1(9H^p + W^p) \text{ кдж/кг.} \quad (12)$$

Эти формулы можно применять и для определения теплотворности сухой, горючей и органической массы твердого и жидкого топлива.

### 3. Нагревание топлива без доступа воздуха

Изменения, претерпеваемые топливом при нагревании без доступа воздуха, могут проявляться двояко: в одних случаях происходит расплавление или испарение вещества, не сопровождаемое изменением его химического состава, в других случаях при достижении определенной температуры происходит разрушение молекул с образованием новых, более устойчивых при данной температуре. Топлива первой группы называют теплоустойчивыми, например углерод, температура плавления которого выше  $3000^\circ \text{C}$ . Ко второй группе относятся топлива теплонеустойчивые. Очень теплонеустойчивы углеводороды, которые при нагревании разлагаются на более устойчивые формы и, наконец, на углерод и водород.

При нагревании твердых и жидких видов топлив без доступа воздуха сначала происходит испарение влаги, а затем выделяются горючие газообразные вещества, которые называют ле-

тучими. Твердый остаток, который получается после полного удаления летучих, называется «ококсовавшимся топливом», или коксом. Таким образом, отношение топлива к нагреванию можно характеризовать так:

$$L + K = 100\% \text{ по весу,} \quad (13)$$

где  $L$  — количество летучих, а  $K$  — количество кокса в % по весу.

Соотношение летучих и кокса в топливе дает представление о характере горения. При большом содержании летучих горение топлива происходит главным образом в топочном объеме ярким излучающим факелом пламени. При малом содержании летучих горение в большей степени совершается в слое топлива на колосниках, а пламя получается небольшое, слабо светящееся. В первом случае необходим значительный топочный объем, во втором случае топочный объем потребуется небольшой.

Соотношение между летучими и коксом является одним из признаков, по которым строят классификацию каменных углей по сортам и маркам.

#### 4. Жаропроизводительность топлива

Жаропроизводительностью, или калориметрической температурой, называется температура продуктов горения, которая получается при сжигании данного вида топлива в следующих идеальных условиях: 1) топливо и воздух перед сжиганием имеют температуру  $0^\circ \text{C}$ ; 2) количество воздуха равно теоретически необходимому количеству, т. е. объем продуктов горения минимальный; 3) горение происходит до полного окисления всех горючих составляющих топлива (влаги в продуктах горения находится в парообразном состоянии); 4) все выделившееся тепло используется на нагрев газообразных продуктов горения.

Исходя из этих условий, калориметрическую температуру можно определить по следующей формуле:

$$t_{\text{макс}} = \frac{Q_{\text{низш}}^p}{\Sigma mc} \text{ } ^\circ\text{C}, \quad (14)$$

где  $m$  — количество различных продуктов горения, получающихся при сгорании 1 кг или 1 м<sup>3</sup> топлива при н. ф. у.;  
 $c$  — теплоемкость отдельных газообразных составляющих продуктов горения — средняя от 0 до  $t_{\text{макс}}$  в кдж/кг · град или кдж/м<sup>3</sup> · град.

Величина  $t_{\text{макс}}$  характеризует только химический состав топлива и не учитывает условий его сжигания. Поэтому действи-

тельные температуры, получаемые при сжигании данного вида топлива, могут быть ниже и выше (при сжигании с подогретым воздухом и топливом) величины  $t_{\text{макс}}$ .

Калориметрическую температуру можно определить только расчетом по формуле (14).

#### Технический анализ топлива

При практическом использовании топлива в промышленных условиях обычно пользуются так называемым техническим анализом топлива, который заключается в определении ряда величин, имеющих большое значение при использовании топлива.

Технический анализ топлива заключается в экспериментальном определении следующих величин: влажности топлива ( $W^p$ ); содержания золы  $A^c$ ; содержания летучих  $L^p$  и кокса  $K^p$ ; величины теплотворной способности  $Q_{\text{выш}}^p$  и  $Q_{\text{низш}}^p$  и содержания серы  $S_{\text{общ}} = S_o + S_k + S_c$ . В некоторых случаях ограничиваются только определением содержания влаги и золы.

Имея технический анализ топлива и взяв из литературных данных состав горючей (или органической) массы, легко перейти к рабочему составу топлива, зная который можно производить все необходимые расчеты, связанные с его сжиганием.

### § 3. ХАРАКТЕРИСТИКА ОТДЕЛЬНЫХ ВИДОВ ТОПЛИВА

#### 1. Твердое топливо

К естественным видам твердого топлива относятся дрова, остатки многолетних растений, торф, бурый и каменный уголь, антрацит и горючие сланцы.

Торф, горючие сланцы, бурый уголь, каменный уголь и антрацит представляют собой продукты разложения растительных остатков и планктона без доступа воздуха. Этот процесс происходит в основном за счет жизнедеятельности особых, так называемых анаэробных бактерий и характеризуется постепенным повышением содержания углерода в органической массе вследствие понижения содержания кислорода, используемого бактериями в процессе их жизнедеятельности.

Этот процесс называется также минерализацией. В процессе минерализации растительные остатки в большей или меньшей степени засоряются выпадающими из воды солями и оседающей



Характеристика естественных и искусственных видов твердого топлива

Вид топлива и марка	Состав горючей массы в % по весу					Содержание летучих в горючей массе, %	Содержание золы в сухом состоянии, %	Содержание влаги в рабочем топливе, %	Низшая теплотворность (теплота сгорания) $Q_{н. кдж/кг}$
	C <sup>r</sup>	H <sup>r</sup>	S <sup>r</sup>	N <sup>r</sup>	O <sup>r</sup>				
Дрова . . . . .	50,5	6,1	—	—	—	85,0	1,1	20-35	9629-14 653
Торф . . . . .	53,0-63,4	5,0-8,0	0-2,0	0,6-2,5	42,8-27,7-36,1	70,0	3-10	25-40	7536-15 072
Подмосковный бурый уголь . . . . .	67,0	5,0	5,9	1,3	20,8	45,0	35,0	32,5	10 634
Челябинский бурый уголь . . . . .	73,0	5,2	1,6	1,7	18,5	43,0	30,0	10,0	15 491
Донецкий длиннопламенный уголь марки Д . . . . .	75,0	5,5	5,8	1,6	12,1	43,0	22,5	12,0	18 003
Донецкий жирный уголь марки Ж (марки ПЖ по старой классификации) . . . . .	83,0	5,1	4,8	1,5	5,6	32,0	20,0	6,0	25 120
Кузнецкий слабо-сгорающийся уголь марки СС . . . . .	87,0	5,0	0,5	2,2	5,3	25,0	11,0	6,0	28 176
Карагандинский каменный уголь марки ПЖ-ПС . . . . .	85,0	5,1	1,0	1,4	7,5	27,0	23,0	8,0	23 529

Продолжение табл. 4

Вид топлива и марка	Состав горючей массы в % по весу					Содержание летучих в горючей массе, %	Содержание золы в сухом состоянии, %	Содержание влаги в рабочем топливе, %	Низшая теплотворность (теплота сгорания) $Q_{н. кдж/кг}$
	C <sup>r</sup>	H <sup>r</sup>	S <sup>r</sup>	N <sup>r</sup>	O <sup>r</sup>				
Печорский каменный уголь марки ПЖ . . . . .	85,0	5,3	1,3	2,3	6,1	30,0	23,0	10,0	23 152
Черемховский каменный уголь марки Д . . . . .	78,3	5,75	1,4	1,55	13,0	45,0	25,0	14,0	19 510
Сучанский каменный уголь марки Г . . . . .	84,2	5,2	0,8	1,4	8,4	35,0	30,0	7,0	21 059
Донецкий антрацит марок АК, АМ, АС . . . . .	93,0	1,8	2,2	1,0	2,0	4,0	14,0	6,0	26 795
Горючие сланцы Гдовского месторождения (Ленинградская область) . . . . .	73,5	9,4	4,7	0,3	12,1	81	52,5	11,5	8 540
Древесный уголь . . . . .	79,0-88,0	1,0-4,0	—	0,5-1,0	8,5-18,0	7,0-12,0	1,2-3,0	4,0-9,0	25 539-29 307
Кокс литейный Кл (ГОСТ 3340-49) . . . . .	96,5	0,7	1,0	1,3	0,5	1,5	13,0	4,0	27 715
Кокс металлургический донецкий (ГОСТ 513-54) . . . . .	96,0	0,7	1,5	1,3	0,5	2,0	9,0	4,0	28 763
Кокс металлургический восточных районов (ГОСТ 2014-53) . . . . .	96,8	0,8	0,5	1,4	0,5	1,7	13,0	6,0	27 046

пустой породой, в результате чего увеличивается зольность и в их составе появляется сера.

Характеристика естественных видов твердого топлива приведена в табл. 4.

Искусственные виды твердого топлива получают из естественных видов топлива при механической и термохимической переработке.

К механическим способам переработки относятся: обогащение, обеспыливание и обезвоживание (сушка), брикетирование и размол — получение пылевидного топлива. Химический состав исходного топлива при этом изменяется мало.

К термохимическим способам переработки относятся: сухая перегонка — дистилляция, неполное сжигание или газификация и ожижение — получение жидкого топлива из твердого. Из искусственных видов твердого топлива практическое значение имеют древесный уголь и главным образом каменноугольный кокс. Характеристики этих видов топлива также приведены в табл. 4.

Твердое топливо все меньше используют для нагрева металла. В условиях небольших кузниц и гибочных мастерских до сего времени применяют открытые горны, работающие на спекающихся каменных углях (марки ПЖ и ПС), а также на древесном угле и коксе.

## 2. Жидкое топливо

Естественным видом жидкого топлива является нефть, представляющая собой смесь жидких углеводородов с примесью некоторых других органических соединений.

Малосернистая нефть южных месторождений (Бакинского, Майкопского, Грозненского и др.) состоит примерно из 85—87% углерода, 12—14% водорода и 1% кислорода, азота и серы. Высокосернистая нефть восточных и северных районов (Башкирской АССР, Татарской АССР, Заволжья, Печоры и др.) содержит от 1 до 3% серы.

По современным представлениям, нефть образовалась в результате сложных бактериальных и химических процессов из растительных и животных остатков.

Как топливо сырую нефть в настоящее время не используют. Основными, практически применяемыми видами жидкого топлива являются продукты ее переработки.

Нефть перерабатывают главным образом методом сухой перегонки. При нагревании без доступа воздуха из нее выделяют легкокипящие углеводороды, которые при конденсации образуют различные виды жидкого горючего.

При нагревании до 200°С выделяющиеся из нефти фракции образуют бензин с плотностью 720—760 кг/м³. Состав бензина: ~85,0% углерода и ~15,0% водорода. Теплотворность составляет 44 000—46 000 кДж/кг. Выделяющиеся при температурах 200—220°С фракции с плотностью 770—790 кг/м³ называются лигроином, а фракции, кипящие при 220—315°С, с плотностью 800—833 кг/м³, образуют керосин.

При более высоких температурах отгоняется так называемый соляровый дистиллят, или соляровое масло. Отгонку солярового дистиллята применяют не во всех случаях.

Выход этих легких фракций составляет 25—30%. Остаток после их отгонки называется мазутом или мазутом прямой разгонки.

По элементарному составу мазуты прямой разгонки мало отличаются друг от друга:  $C_r = 86,3—87,1\%$ ;  $H_r = 12,5—13,1\%$ ;  $S_r = 0—3,0\%$ ;  $O_r = 0—0,35\%$ ;  $N_r = 0—0,5\%$ ;  $A_r = 0—0,2\%$ ;  $W_r = 0—10\%$ ;  $Q_{низш}^p = 39\,700—41\,870$  кДж/кг.

В настоящее время сжигание мазутов прямой разгонки считается нерациональным. Мазуты подвергают дальнейшей переработке двумя способами. Первый способ — это дальнейшая разгонка. Но для того, чтобы молекулы тяжелых углеводородов не распадались под действием высоких температур, разгонка происходит в вакууме. Отгоняемые при этом тяжелые углеводороды образуют различные сорта смазочных масел. Остатком после разгонки в вакууме является масляный или кислый гудрон. Масляный и кислый гудрон имеют очень высокую вязкость. Кислый гудрон, кроме того, содержит в значительном количестве серную кислоту. Первый используют главным образом для приготовления асфальта, второй сжигают иногда в мелких котельных в смеси с торфом или древесными отходами.

Вторым способом переработки мазута прямой разгонки является крекинг-процесс — нагревание мазута в специальных трубчатых печах под некоторым давлением, в результате которого происходит термическое разложение тяжелых углеводородов с образованием газовой и легкокипящей фракций. При этом получают нефтяной газ, крекинг-бензин, крекинг-керосин и остаток — крекинг-мазут. Крекинг-мазут отличается от мазутов прямой гонки несколько меньшим содержанием водорода и более высокой вязкостью. Он является в настоящее время широко применяемым жидким топливом для промышленных печей, стационарных и подвижных котлов. Чем полнее крекинг и больше получено легких фракций, тем более вязким получается остаток — мазут.

Крекинг-мазуты классифицируются по вязкости, которая определяется при температурах 50, 80 и 100°С в градусах услов-

ной вязкости (в градусах по Энглери) с помощью специальных приборов — вискозиметров. За условную вязкость принимают отношение времени истечения через тарированное отверстие 200 см<sup>3</sup> данной жидкости к времени вытекания того же количества воды при 20° С. Марки мазута 20, 40, 60, 80, 100 и 200 означают предельную вязкость данного сорта мазута при 50° С.

Характеристики мазутов по ГОСТ 1501—57 приведены в табл. 5, а химический состав и теплотворность — в табл. 6.

Таблица 5

## Физические свойства мазутов

Основные параметры	Марки мазута					
	20	40	60	80	100	200
Вязкость в градусах условной вязкости при 80° С . . . . .	2,5—5,0	5—8	8—11	11—13	13—15,5	16,5—9,5° при температуре 100° С
Кинематическая вязкость $\nu \times 10^6$ , м <sup>2</sup> /сек . . . . .	16,1—36,2	36,2—59	59—81	81—96	96—115	47,6—70,2
Температура вспышки в °С не ниже . . . . .	80	100	110	120	125	140
Температура застывания в °С не выше . . . . .	+5	+10	+15	+20	+25	+36

По содержанию серы мазуты делятся на малосернистые  $S_{\text{общ}} \leq 0,5\%$ , сернистые  $S_{\text{общ}} = 0,5—1,0\%$  и высокосернистые  $S_{\text{общ}} = 1,0—3,5\%$ . Из-за повышенной вязкости мазут марки 200 может подаваться потребителю только по трубопроводу от нефтеперегонного завода, транспортировка его в цистернах не применяется. По этой причине, а также вследствие затруднений при сжигании, в металлургических печах его используют редко.

Вязкость мазутов (как и других капельных жидкостей) снижается с повышением температуры. Эта зависимость для мазутов разных марок отражена на рис. 1.

Для нормального сжигания мазута условная вязкость его не должна превышать: у механической форсунки — 5—6; паровой форсунки — 12—15; воздушной форсунки: высокого давления — 10—12; низкого давления — 8—10.

Для получения такой вязкости и улучшения других свойств мазут перед сжиганием обязательно разогревают, отстаивают и

Таблица 6

## Химический состав и характеристика искусственных видов жидкого топлива

Виды и марки топлива	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Горючая масса				Рабочее топливо		
		Сг, %	Нг, %	Сг, %	% L(N+O)	Q <sub>н</sub> , кДж/кг	АР, %	W, %
Бензин . . . . .	720—760	85,0	14,9	0,05	0,05	43 752	—	—
Керосин . . . . .	800—830	86,0	13,7	0,10	0,2	42 956	—	—
Соляровое масло . . . . .	840—880	86,5	12,8	0,4	0,3	42 328	—	—
Мазут марки 20 . . . . .	940—970	87,2	11,7	0,5	0,6	41 323	0,1	2,0
Мазут марки 40 . . . . .	950—990	87,4	11,2	0,5	0,9	40 821	0,1	2,0
Мазут марки 60 . . . . .	980—1000	87,6	10,7	0,7	1,0	40 612	0,2	3,0
Мазут марок 80 и 100 . . . . .	990—1000	87,6	10,6	0,7—1,0	1,0	40 486—40 360	0,2	3,0
Мазут высокосернистый марок 20 и 40 . . . . .	920—970	85,0	11,8	2,3 (1,3—4,0)	0,9	40 779	0,15	2,0
Смолы: каменноугольная . . . . .	1040—1200	90,0	7,0	1,0	2,0	—	1,0	5,0
буроугольная . . . . .	1100—1200	83	7,0	2,0	8,0	—	1,0	5,0
Сланцевое масло . . . . .	1100—1200	88,08	7,66	—	4,26	37 263	—	—

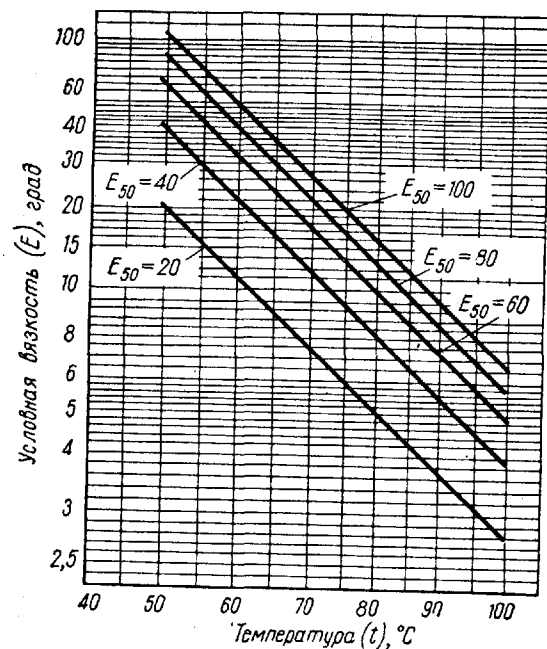


Рис. 1. График для определения вязкости мазутов при различных температурах

фильтруют. Разогрев необходим для снижения вязкости, что связано с облегчением транспортировки и улучшением распыливания перед сжиганием. Отстой применяют для снижения содержания воды, фильтрацию — для удаления механических примесей. В некоторых случаях, когда влагу не удаляют простым отстаиванием, а содержание ее велико (выше 5—10%), приходится применять специальные методы влагоудаления. При использовании крекинг-мазотов все емкости и трубопроводы должны быть оборудованы подогревом и тщательно теплоизолированы. Для контроля за температурой мазута на емкостях и у форсунок должны быть установлены термометры. Требуемая температура подогрева мазута разных марок может быть определена по графику на рис. 1.

Из других видов искусственного жидкого топлива следует отметить: смолы, получающиеся при переработке древесины, торфа и главным образом каменного угля, а также сланцевое масло — продукт переработки горючих сланцев. Примерный химический состав каменноугольной смолы и сланцевого масла приведен в табл. 6. Теплотворность их колеблется от  $Q_{\text{низш}}^p =$

$= 30\,980$  кдж/кг до  $Q_{\text{низш}}^p = 36\,844$  кдж/кг. Перед использованием смолы подвергают подготовке такими же методами, как мазут. Смешивать смолы с мазутом недопустимо, так как при этом образуются очень вязкие соединения.

В связи с огромными преимуществами жидкого топлива по сравнению с твердым разрабатываются методы превращения твердого топлива в жидкое (особенно в странах, не имеющих запасов нефти). К ним относятся:

1) полукоксование углей — дистилляция углей при температурах, более низких, чем коксование, дает до 10—15% первичной смолы, из которой можно получить ряд легких и тяжелых топлив;

2) гидрогенизация углей, воздействие на каменный уголь водородом при давлении до  $\sim 20$  Мн/м<sup>2</sup> и температуре 300—400°С, в результате чего большая часть угля (до 85%) превращается в растворимое или жидкое вещество;

3) синтез углеводородов из водяного газа, полученного из антрацита или кокса.

Необходимо отметить, что жидкое топливо, полученное этими методами, обычно значительно дороже продуктов переработки нефти.

### 3. Газообразное топливо

Газообразное топливо имеет большие преимущества по сравнению с твердым и жидким топливом; лучше перемешивается с воздухом, что позволяет сжигать его с меньшим избытком воздуха; удобно транспортируется, проще в обслуживании и регулировании, в том числе автоматическом, в некоторых случаях газ можно подогревать перед сжиганием, что позволяет получать высокий пирометрический эффект (высокую температуру горения).

Газообразное топливо можно разделить на газы с высокой теплотворностью —  $Q_{\text{низш}}^p > 12\,560$  кдж/м<sup>3</sup> при н. ф. у. (естественный газ, газы, получаемые при переработке нефти, и газы, выделяющиеся при коксовании и дистилляции углей и других видов твердого топлива) и газы с низкой теплотворностью —  $Q_{\text{низш}}^p < 12\,560$  кдж/м<sup>3</sup> при н. ф. у. (газы, получаемые за счет неполного горения различных видов твердого топлива).

Применение газа в промышленности улучшает условия труда, повышает культуру производства, экономичность печных установок, поэтому увеличению использования газа придается большое народнохозяйственное значение.

### Естественный, или природный газ

В СССР имеется большое количество крупных газовых месторождений, позволяющих резко увеличить потребление его в народном хозяйстве, промышленности и в быту. Природный газ является очень дешевым топливом. При его добыче труда затрачивается почти в 20 раз меньше, чем при добыче эквивалентного количества каменного угля. Природные газы можно разделить на две группы: газы из чисто газовых месторождений, содержащие до 98% метана, и газы, связанные с нефтяными месторождениями (так называемые попутные), имеющие повышенное содержание тяжелых углеводородов и поэтому более высокую теплотворность. Характеристика природных газов приведена в табл. 7.

Природный газ можно использовать не только как топливо, но и как сырье в некоторых отраслях химической промышленности. Развитие широкого применения природного газа связано с передачей его на далекие расстояния от месторождений к потребителям по магистральным трубопроводам (Саратов — Москва, Ставрополь — Москва, Дашава — Киев, Дашава — Минск — Ленинград, Шебелинка — Харьков, Шебелинка — Одесса — Кременчуг, Газли — Челябинск — Свердловск и др.).

По магистральным трубопроводам газ подается под давлением в несколько десятков атмосфер, а затем в распределительных сетях давление снижается до величины, необходимой потребителю.

### Искусственные газообразные топлива

**Нефтяной газ.** Нефтяной газ получается при высокотемпературной переработке нефтяных продуктов (крекинге, пиролизе). Особенностью его химического состава является большое содержание тяжелых углеводородов и высокая благодаря этому теплотворность  $Q_{\text{низ}}^p = 46\,054—71\,175 \text{ кДж/м}^3$  при н. ф. у.

Характеристика среднего химического состава нефтяных газов в процентах по объему приведена в табл. 8.

Благодаря высокому содержанию тяжелых углеводородов нефтяной газ является ценным видом сырья для химической промышленности, но используется и как топливо. Нефтяной газ часто применяют в смеси с другими горючими газами в целях повышения их теплотворной способности и увеличения излучательной способности пламени.

**Сжиженные газы.** С развитием нефтяной и газовой промышленности развивается использование сжиженных газов, транспор-

Таблица 7

Характеристики природных газов различных месторождений СССР

Названия месторождений	Химический состав сухого газа в % по объему							Плотность, кг/м <sup>3</sup> при н. ф. у.	Низшая теплотворность, кДж/м <sup>3</sup> при н. ф. у.
	CH <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub> и выше	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> S	N <sub>2</sub> и реактивные газы	
Еланское (Саратовская область)	93,2	0,7	0,6	0,6	0,5	—	Следы	4,4	0,775
Кардюмовское (Саратовская область)	92,2	0,8	—	1,0	—	—	—	6,0	0,760
Мельников (Саратовская область)	—	—	—	—	—	0,2	Следы	44,8	0,930
Западное поле	55,0	—	—	—	—	0,1	Следы	11,7	0,800
Восточное поле	88,0	0,2	—	—	—	—	—	—	—
Степановское (Саратовская область)	96,0	1,9	1,4	—	—	0,2	—	0,5	0,730
Медитопольское	98,0	—	—	—	—	0,2	—	1,8	0,735
Ставрополь-казский	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Северное поле	97,7	—	—	—	—	0,7	—	1,6	0,735
Южное поле	90,0	—	—	—	—	—	—	40,0	0,905
									35 169
									34 331
									19 887
									31 401
									35 587
									35 378
									35 169
									21 771

Названия месторождений	Химический состав сухого газа в % по объему							Плотность, кг/м³ при н. ф. у.	Низшая теплотворность, кДж/м³ при н. ф. у.
	CH <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	C <sub>5</sub> и выше	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> S	Ar и редкие газы	
Дашава (Западная Украина) . . .	97,8	0,5	0,2	0,1	0,05	0,05	—	1,3	0,735
Калуш (Западная Украина) . . .	95,7	—	—	—	—	0,1	—	4,2	0,750
Тулеское (Краснодарский край) . . .	97,8	0,4	—	0,3	—	0,2	Следы	1,3	0,750
Меловые горы (Новороссийск) . . .	94,4	—	—	—	—	0,6	—	5,0	0,750
Шебелинское (Украина) . . .	93,5	4,0	1,0	0,5	0,5	0,1	—	0,4	0,790
Бакинское . . .	85,0	2,8	—	1,2	—	11,0	Следы	—	0,810
Южно-Дагестанское . . .	86,5	3,0	0,9	0,1	—	7,3	—	2,2	0,840
Бугурусланское (Куйбышевская область) . . .	77,8	4,4	1,7	0,8	0,6	0,2	1,0	13,5	0,890
Альметьевское (Татарская АССР) . . .	65,0	14,5	7,8	0,1	—	—	—	12,5	—
Косов (Западная Украина) . . .	75,7	21,3	1,4	1,6	—	—	—	—	39 983
Оноры (Западная Украина) . . .	89,9	9,1	—	1,0	—	—	—	—	42 705
Ухтинское . . .	88,0	1,9	0,2	0,3	—	0,3	—	9,3	0,800
Газли (Узбекская ССР) . . .	94,9	3,0	0,9	0,6	4,5	0,1	—	0,5	0,790
									34 896

Таблица 8

## Химический состав нефтяных газов, %

Составляющие газов	Жидкофазный крекинг	Парофазный крекинг	Газ пиролиз
Водород (H <sub>2</sub> ) . . . . .	6,0	8,0	15,0
Метан (CH <sub>4</sub> ) . . . . .	30,5	31,0	45,0
Этилен (C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> ) . . . . .	4,5	12,5	17,0
Этан (C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> ) . . . . .	18,0	14,0	7,0
Пропилен (C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> ) . . . . .	7,5	15,0	8,0
Пропан (C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> ) . . . . .	15,0	6,5	1,0
Бутилены (C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> ) . . . . .	6,0	6,0	2,8
Бутан (C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> ) . . . . .	6,0	2,0	0,2
Бутадиен . . . . .	—	—	1,5
Высшие углеводороды . . . . .	6,0	5,0	2,0
Окись углерода . . . . .	0,5	—	0,5

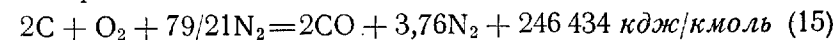
тируемых в цистернах и баллонах, которые подключают к газопроводам.

Сжиженные газы состоят из углеводородов с тремя и четырьмя атомами углерода в молекуле (пропан, бутан и др.).

**Газы, получаемые при дистилляции твердых топлив.** При дистилляции любых видов твердого топлива получающиеся газобразные продукты имеют достаточно высокую теплотворность и могут быть использованы как топливо (табл. 9). Наибольшее промышленное значение из них имеет коксовый газ, получаемый при коксовании каменных углей и широко используемый как топливо на металлургических заводах (часто в смеси с доменным газом).

**Генераторный газ.** С помощью газогенераторного процесса любой вид твердого топлива можно полностью превратить в газобразное топливо.

Если через слой раскаленного углерода пропустить воздух в количестве, недостаточном для полного горения, то будет протекать реакция



(79 и 21 соотношение по объему N<sub>2</sub> и O<sub>2</sub> в воздухе). Полученный газ по объему содержит 34,7% CO и 65,3% N<sub>2</sub> и имеет:

$$Q_{\text{низ}} = 4425 \text{ кДж/м}^3 \text{ при н. ф. у. и } t_{\text{макс}} = 1623^\circ \text{С.}$$

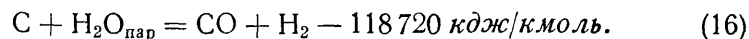
Способ получения этого газа, называемого «воздушным газом», имеет больше теоретическое значение, практически же его не используют.

Таблица 9

Химический состав газов при дистилляции и коксовании различных видов топлива

Топливо и характеристика процесса	Состав газа в % по объему								Теплота сгорания $Q_p$ , кДж/м <sup>3</sup> при н. ф. у.
	CO <sub>2</sub>	CO	CH <sub>4</sub>	C <sub>n</sub> H <sub>m</sub>	H <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> S	
Торф (при полукоксовании) . . .	72,3	15,4	7,8	1,6	3,0	—	—	—	6 522
Челябинский бурый уголь (при полуккоксовании) . .	19,7	16,4	39,8	1,4	18,0	3,0	—	1,7	21 277
Лисичанский уголь (при полуккоксовании) . . .	4,2	7,7	50,8	6,4	20,4	2,4	—	7,5	29 998
Газ коксования каменных углей:									
печи с динасовой кладкой . .	2,2	4,2	24,2	2,2	60,7	5,8	0,7	—	18 128
печи с шамотной кладкой . .	3,1	5,3	24,8	3,1	55,8	7,1	0,8	—	17 667
При неудовлетворительной кладке и плохом режиме работы печи . .	2,8	4,6	23,1	2,1	48,7	17,5	1,2	—	15 406
Светильный газ при дистилляции каменных углей марок Д и Г в чугунных ретортах . .	5,0	5,0	36,0	5,0	42,0	7,0	—	—	20 096

Если же в слой раскаленного углерода подать водяной пар, то будет происходить реакция:



Полученный газ, называемый «водяным» газом, содержит 50% CO и 50% H<sub>2</sub> и имеет  $Q_{\text{низш}} = 11765 \text{ кДж/м}^3$  при н. ф. у. и  $t_{\text{макс}} = 2300^\circ \text{C}$ .

Так как процесс получения водяного газа требует затраты тепла, то для его осуществления устраивают двухкамерные генераторы. В одну камеру подают воздух. Слой кокса в ней разогревается. В другую — поступает пар. Там происходит получение водяного газа с охлаждением слоя топлива. Через определенный промежуток времени камеры переключаются. Таким образом, процесс получения газа происходит непрерывно.

Состав практически получаемого водяного газа следующий:

CO=40%; H<sub>2</sub>=50%;  
CO<sub>2</sub>=4,5%; N<sub>2</sub>=5,0%;  
CH<sub>4</sub>=0,5%;  $Q_{\text{низш}} = 10467 \text{ кДж/м}^3$  при н. ф. у.

Водяной газ редко используют как топливо, чаще его применяют в химической промышленности для получения водорода.

Совмещая процессы получения «воздушного» и «водяного» газов, используя тепло, выделяющееся по первой реакции для осуществления второй, получают так называемый смешанный, или генераторный газ.

Однако при проведении реального газогенераторного процесса к двум основным реакциям добавляется ряд дополнительных реакций и процессов.

Газификация реальных видов твердого топлива происходит в газогенераторах, представляющих собой цилиндрические вертикальные шахты, футерованные специальным кирпичом или снабженные водоохлажденными кожухами. В нижней части шахты устраивают колосниковую решетку, через которую подается воздух и пар, и вращающуюся чашу для удаления золы и шлака. В верхней части шахты устанавливают загрузочное приспособление, снабженное затвором (для того, чтобы газ не проникал в помещение загрузки) и патрубком для отвода газа (рис. 2).

В соответствии с протекающими процессами слой топлива в шахте генератора может быть разделен на пять зон (снизу — вверх): I зона золы и шлака; II зона горения, или кислородная зона; III зона восстановления; IV зона сухой перегонки и V зона подсушки.

Кроме реакции получения воздушного и водяного газа, в зоне горения и восстановления могут происходить реакции

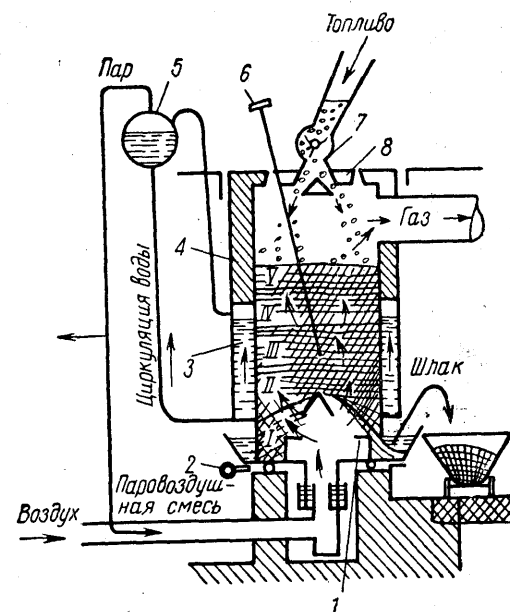
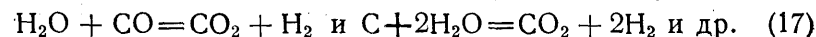


Рис. 2. Схема газогенератора:

1 — колосниковая решетка; 2 — привод решетки; 3 — испарительное охлаждение; 4 — футеровка; 5 — сепаратор; 6 — шуровочное приспособление; 7 — барабанный питатель; 8 — конус

Химический состав генераторных и других газов

Топливо и способ получения газа	Состав сухого газа в % по объему							Теплотворность $Q_{H_2}$ кДж/м <sup>3</sup> при н. ф. у.	Выход сухого газа, м <sup>3</sup> /кг при н. ф. у.
	CO <sub>2</sub>	CO	CH <sub>4</sub>	C <sub>n</sub> H <sub>m</sub>	H <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> S	N <sub>2</sub> +O <sub>2</sub>		
Генераторный газ									
Дрова березовые (W <sub>P</sub> =20%)	7,0	27,3	3,7	—	12,6	—	49,2+0,2	6154	1,6
Щепы (W <sub>P</sub> =30%)	6,5	29,0	3,0	0,4	14,0	—	46,9+0,2	6531	1,3
Гидрогорт	8,5	27,5	2,5	0,4	15,0	0,06	45,84+0,2	6258	1,5
Торт (со швельпахтой)	7,29	28,05	2,77	0,38	17,44	—	43,73	6669	—
Челябинский бурый уголь	5,0	30,0	2,0	0,3	13,0	0,2	49,3+0,2	6112	2,1
Донецкий газовый уголь	5,0	26,5	2,3	0,3	13,55	0,3	51,9+0,9	5818	3,3
Донецкий антрацит АС	5,5	27,5	0,5	—	13,5	0,17	52,63+0,2	5149	4,0
Коксовая мелочь	5,0	28,5	0,7	—	13,0	0,2	52,4+0,2	5254	3,2
Доменные газы									
Газ коксовых печей	9—14	31—25	0,3—0,5	—	2—3	—	57—58	3558—3977	4,0
Газ древесноугольных печей	10—15	29—23	1,2—1,7	—	5,5—7,5	—	50—54	4186—4605	—
Газы подземной газификации углей									
Горловская станция	9—11	15—19	1,4—1,5	—	14—17	—	53—55	4605	—
Подмосковная станция	9,5	10,0	1,8	—	14,5	0,6	63,5	3620	—

Горячие газообразные продукты, поднимаясь из нижних двух зон, совершают процесс сухой перегонки и процесс подсушки топлива в верхних двух зонах.

В результате генераторный газ представляет собой (в основном) смесь продуктов процессов взаимодействия воздушного и водяного газов, летучих веществ и водяного пара. Летучие вещества увеличивают теплотворность газа и обычно генераторный газ из топлива с большим содержанием летучих получается лучше.

В целях повышения теплотворности газа и увеличения производительности генераторов применяют обогащение воздуха кислородом и даже парокислородную смесь.

Химический состав генераторных газов из разных видов твердого топлива и других газов с низкой теплотворностью приведен в табл. 10.

Газы, выходящие из газогенератора, могут иметь высокую температуру и содержать значительное количество пыли и смолы. Поэтому если генераторный газ передается на более или менее значительное расстояние, его подвергают охлаждению и очистке.

Доменный, или колошниковый, газ получается в больших количествах при работе доменных печей (около 3 м<sup>3</sup> на 1 кг чугуна). Этот газ играет значительную роль в топливном балансе металлургических заводов, так как содержит более 40% тепла кокса, загружаемого в доменные печи. Так как теплотворность газа невысокая, то для печей его используют обычно в смеси с коксовым газом в виде коксодоменной смеси с теплотворностью 7536—10 050 кДж/м<sup>3</sup> при н. ф. у.

При использовании в чистом виде в нагревательных печах доменный газ обычно подогревают для получения необходимой высокой температуры.

**Газ подземной газификации.** Возможность использования энергии каменных углей без дорогостоящей и трудоемкой добычи его и транспортировки из глубины земли на поверхность путем подземной газификации была высоко оценена В. И. Лениным.

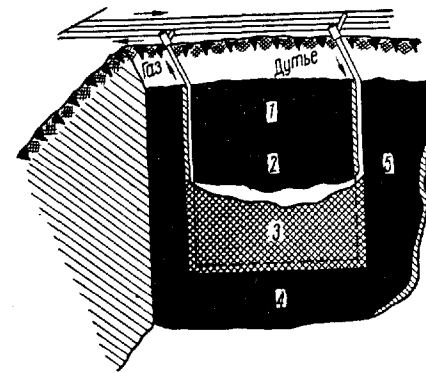


Рис. 3. Схема подземной газификации угольного пласта:

1 — панель; 2 — огневой забой; 3 — шлак и обрушивающаяся кровля; 4 — начальный огневой штрек; 5 — пласт угля



В нашей стране проведены и проводятся опыты по подземной газификации углей в широких масштабах. Схема газификации угольного пласта показана на рис. 3. Характеристика газов, полученных на Горловской и Подмосковной станциях, приведена в табл. 10.

В 1955 г. пущена опытная промышленная Южно-Абинская станция в Кузнецком бассейне.

Вследствие сравнительно небольшой мощности опытно-промышленных станций подземной газификации получаемый на них газ обходится пока дорого. Транспортировка газа на большие расстояния из-за его невысокой теплотворности нецелесообразна.

В целях увеличения ресурсов газообразного топлива научные сотрудники Энергетического института имени Г. М. Кржижановского и Центрального котлотурбинного института имени И. И. Ползунова разрабатывают схемы комплексного энерготехнологического использования твердого топлива. Топливо, сжигаемое в специальной топке, отапливает паровой котел и частично газифицируется, превращаясь в газообразное с теплотворной способностью  $10\,467\text{--}12\,560\text{ кДж/м}^3$  при н. ф. у. Коэффициент полезного действия комплексного агрегата составляет  $90\text{--}95\%$ .

#### 4. Условное топливо

Чтобы промышленные предприятия обеспечивали планирование и отчетность по расходам топлива и была возможность сравнивать тепловую потребность различных агрегатов, введено понятие «условного» топлива.

Условным топливом называется такой идеальный, не существующий реально вид топлива, который имеет теплотворность точно  $29\,300\text{ кДж/кг}$ .

Для того чтобы перевести расход реального топлива в условное, нужно этот расход умножить на коэффициент  $k_u$ , который представляет собой отношение

$$k_u = \frac{Q_{\text{низш}}^p [\text{кДж/кг}]}{29300 [\text{кДж/кг}]} = \frac{Q_{\text{низш}}^p [\text{ккал/кг}]}{7000 [\text{ккал/кг}]} \quad (18)$$

Значения  $k_u$  для некоторых видов топлива следующие: для мазута —  $1,35\text{--}1,40$ ; каменных углей —  $0,6\text{--}0,98$ ; торфа —  $0,42\text{--}0,45$ ; дров —  $0,188$  т усл. топл./м<sup>3</sup>; для природного газа —  $1,05\text{--}1,35$  т усл. топл./1000 м<sup>3</sup> при н. ф. у.

## ГОРЕНИЕ ТОПЛИВА

### § 4. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Горением называется процесс окисления горючих составляющих топлива, протекающий настолько быстро, что выделяющееся тепло обеспечивает высокую температуру процесса и продуктов горения.

Горение топлива в промышленных топках — очень сложный процесс, состоящий из совокупности следующих физических и химических явлений: 1) нагрева топлива до температуры воспламенения с одновременным частичным разложением и выделением газообразных (летучих) веществ; 2) смешения топлива и продуктов его термического разложения с воздухом; 3) окисления горючих составляющих топлива кислородом воздуха с одновременным теплообменом как внутри зоны горения, так и с окружающей средой; 4) удаления продуктов горения, нагретых до высокой температуры.

В табл. 11 приведены основные уравнения реакций горения горючих составляющих топлива.

Однако эти уравнения, используемые для расчетов горения, не отражают кинетики и механизма воспламенения и горения топлива и его горючих составляющих.

Кинетика реакций горения подвергалась многочисленным исследованиям. Было установлено, что скорость реакций горения зависит от ряда факторов: концентрации реагирующих веществ, интенсивности газообмена, температуры, давления, наличия катализаторов и т. д.

Результулирующая скорость реакции зависит от величины скорости химического взаимодействия ( $v_{\text{кин}}$ ) и от величины скорости диффузии ( $v_{\text{дифф}}$ ) и определяется меньшей из них. Если процесс горения протекает в условиях кинетической области,

Таблица 11

## Уравнения реакций горения составляющих топлива

№ п/п	Реакция с тепловыми эффектами, объемными и весовыми соотношениями
1	$C + O_2 \rightleftharpoons CO_2 + 408\,842 \text{ кдж/кмоль}$ $1 \text{ кмоль} + 1 \text{ кмоль} \rightleftharpoons 1 \text{ кмоль}$ $12 \text{ кг} + 32 \text{ кг} = 44 \text{ кг}$
2	$C + 1/2 O_2 \rightleftharpoons CO + 122\,217 \text{ кдж/кмоль}$ $1 \text{ кмоль} + 1/2 \text{ кмоль} \rightleftharpoons 1 \text{ кмоль}$ $12 \text{ кг} + 16 \text{ кг} = 28 \text{ кг}$
3	$CO + 1/2 O_2 \rightleftharpoons CO_2 + 285\,623 \text{ кдж/кмоль}$ $1 \text{ кмоль} + 1/2 \text{ кмоль} \rightleftharpoons 1 \text{ кмоль}$ $28 \text{ кг} + 16 \text{ кг} = 44 \text{ кг}$
4	$H_2 + 1/2 O_2 \rightleftharpoons H_2O_{\text{пар}} + 242\,040 \text{ кдж/кмоль}$ или $H_2O_{\text{жидк}} + 285\,791 \text{ кдж/кмоль}$ $1 \text{ кмоль} + 1/2 \text{ кмоль} \rightleftharpoons 1 \text{ кмоль}$ $2 \text{ кг} + 16 \text{ кг} = 18 \text{ кг}$
5	$CO_2 + C \rightleftharpoons 2CO - 162\,405 \text{ кдж/кмоль}$ $1 \text{ кмоль} + 1 \text{ кмоль} \rightleftharpoons 2 \text{ кмоль}$ $44 \text{ кг} + 12 \text{ кг} = 56 \text{ кг}$
6	$C + H_2O \rightleftharpoons CO + H_2 - 118\,821 \text{ кдж/кмоль}$ $1 \text{ кмоль} + 1 \text{ кмоль} \rightleftharpoons 1 \text{ кмоль} + 1 \text{ кмоль}$ $12 \text{ кг} + 18 \text{ кг} = 28 \text{ кг} + 2 \text{ кг}$
7	$S + O_2 \rightleftharpoons SO_2 + 297\,012 \text{ кдж/кмоль}$ $1 \text{ кмоль} + 1 \text{ кмоль} \rightleftharpoons 1 \text{ кмоль}$ $32 \text{ кг} + 32 \text{ кг} = 64 \text{ кг}$
8	$FeS_2 + 2,5 O_2 + SiO_2 \rightleftharpoons FeSiO_3 + 2SO_2 + 757\,363 \text{ кдж/кмоль}$ $1 \text{ кмоль} + 2,5 \text{ кмоль} + 1 \text{ кмоль} \rightleftharpoons 1 \text{ кмоль} + 2 \text{ кмоль}$ $\rightleftharpoons 119,85 \text{ кг} + 80 \text{ кг} + 60 \text{ кг} = 131,85 \text{ кг} + 8 \text{ кг}$
9	$HC_4 + 2O_2 \rightleftharpoons CO_2 + 2H_2O + 805\,540 \text{ кдж/кмоль}$ $1 \text{ кмоль} + 2 \text{ кмоль} \rightleftharpoons 1 \text{ кмоль} + 2 \text{ кмоль}$ $16 \text{ кг} + 64 \text{ кг} = 44 \text{ кг} + 36 \text{ кг}$
10	$C_2H_4 + 3O_2 \rightleftharpoons 2CO_2 + 2H_2O_{\text{пар}} + 1\,340\,455 \text{ кдж/кмоль}$ $1 \text{ кмоль} + 3 \text{ кмоль} \rightleftharpoons 2 \text{ кмоль} + 2 \text{ кмоль}$ $28 \text{ кг} + 96 \text{ кг} = 88 \text{ кг} + 36 \text{ кг}$
11	$H_2S + 1,5 O_2 \rightleftharpoons SO_2 + H_2O_{\text{пар}} + 504\,090 \text{ кдж/кмоль}$ $1 \text{ кмоль} + 1,5 \text{ кмоль} \rightleftharpoons 1 \text{ кмоль} + 1 \text{ кмоль}$ $34 \text{ кг} + 48 \text{ кг} = 64 \text{ кг} + 18 \text{ кг}$

т. е. определяющей является  $v_{\text{кин}}$ , то скорость процесса повышается с повышением температуры. Если же процесс протекает в диффузионной области, т. е. определяющей является  $v_{\text{дифф}}$ , то скорость процесса повышается при увеличении скорости газов и уменьшении размеров частиц топлива.

Практически кинетическое горение наблюдается при горении готовых газозвоздушных смесей, чисто диффузионное — при горении жидкого и твердого топлива, когда температура топки высока и скорости химического взаимодействия очень большие. Развитие процесса горения определяется в этом случае скоростью смесеобразования и газообмена.

В настоящее время существуют две основные теории — воспламенения и горения топлива.

Согласно тепловой теории, воспламенение и горение топлива связаны с процессами выделения и распространения тепла. Температура воспламенения при этом считается такая, при которой количество тепла, выделяющееся в результате окисления составляющих топлива, равно или больше количества тепла, отдаваемого во внешнюю среду. Процесс горения, возникший в результате местного воспламенения, распространяется по всей массе смеси топлива и воздуха с определенной скоростью благодаря передаче тепла теплопроводностью от зоны горения к еще не воспламенившейся части смеси. Эта скорость, называемая нормальной скоростью горения, или скоростью распространения пламени  $v_{\text{пл}}$  в м/сек, связана следующей формулой с величинами, влияющими на нее:

$$v_{\text{пл}} = \frac{\lambda Q_{\text{низш}}^p}{c(t_b - t_0)} f(t_b; t_r), \quad (19)$$

где  $Q_{\text{низш}}^p$  — теплотворная способность топлива, кдж/м<sup>3</sup> при н. ф. у.;

$\lambda$  — теплопроводность смеси газа и воздуха, вт/м · град;

$c$  — теплоемкость смеси газа и воздуха, кдж/м<sup>3</sup> · град при н. ф. у.;

$t_b$  — температура воспламенения топлива, °С;

$t_0$  — начальная температура смеси газа и воздуха, °С;

$t_r$  — средняя температура продуктов горения (температура горения), °С.

Из выражения (19) видно, что скорость распространения пламени ( $v_{\text{пл}}$ ) прямо пропорциональна теплотворности топлива и теплопроводности смеси и обратно пропорциональна теплоемкости смеси. Большое влияние на скорость  $v_{\text{пл}}$  оказывает избыток воздуха в газозвоздушной смеси. При недостатке или избытке воздуха снижается значение  $t_r$ , а с ней — и  $v_{\text{пл}}$ .

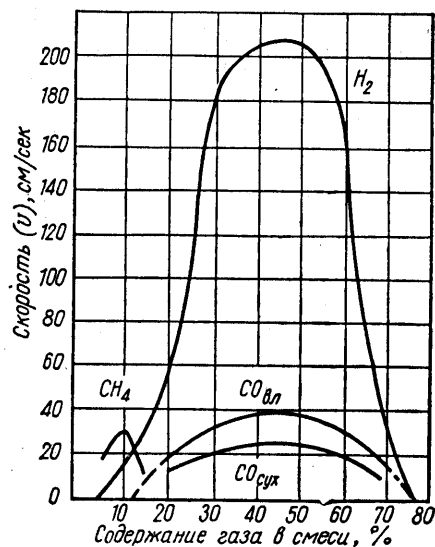


Рис. 4. Скорость распространения пламени в смесях чистых газов с воздухом

Скорость распространения пламени  $v_{пл}$  необходимо учитывать при конструировании газовых горелок с внутренним смешением газа и воздуха.

Если скорость выхода смеси из носка такой горелки будет меньше, чем скорость распространения пламени, то пламя втягивается в горелку, горение начинается в месте смешения газа с воздухом и нормальная работа горелки нарушается.

Этим объясняются концентрационные пределы для смесей газов и воздуха, за которыми горения не происходит ( $v_{пл} = 0$ ).

Максимальной скорости ( $v_{пл}$ ) обычно достигают не при теоретически необходимом количестве воздуха в смеси, а при некотором недостатке воздуха.

На рис. 4 показано изменение скорости распространения пламени от содержания газа в смеси для смесей чистых газов с воздухом. В табл. 12 приведены концентрационные пределы, а также концентрации газов при максимальной скорости распространения  $v_{пл}$  и при теоретически необходимом количестве воздуха.

Скорость распространения пламени  $v_{пл}$  необходимо учи-

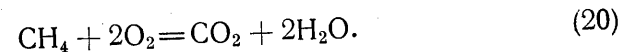
Таблица 12

Концентрационная характеристика смесей газов с воздухом

Горючий газ	Предельные концентрации, %		Содержание газа в смеси с воздухом, %	
	верхняя	нижняя	соответствующее необходимому количеству воздуха	соответствующее максимальной скорости распространения пламени
Водород ( $H_2$ )	~75,0	~6,0	29,5	45,0
Окись углерода (CO) (влажная)	~75,0	~14,0	29,5	45,0
Метан ( $CH_4$ )	~15,0	~5,0	9,5	10,6
Этилен ( $C_2H_4$ )	~14,0	~3,0	5,5	6,5

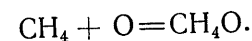
Цепная теория горения, разработанная акад. Н. И. Семеновым, не отрицая влияния теплового состояния системы топливо — воздух, объясняет процесс воспламенения и горения также кинетикой цепных реакций.

Установлено, что взаимодействие горючего с кислородом часто происходит не по «стехиометрическим» уравнениям (см. табл. 11), по которым рассчитывают горение. Например, для расчетов принимают следующую реакцию горения метана:



Однако при горении метана может происходить более сложная реакция.

Для начала реакции необходим хотя бы один активный центр в виде атома кислорода, который образует с метаном неустойчивое соединение —  $CH_4 + O = CH_4O$ . Это соединение реагирует уже с молекулярным кислородом  $CH_4O + O_2 = CH_4O_2 + O$ , выделяя атомарный кислород, продолжающий цепь той же реакции:



Дальнейшее окисление происходит следующим образом:  $CH_4O_2$  разлагается на  $HCHO$  и  $H_2O$ . При этом получается формальдегид ( $HCHO$ ) и влага  $H_2O$ . Формальдегид реагирует с молекулярным кислородом по реакции:  $HCHO + O_2 = HCOOH + O$ , образуя еще один активный атом кислорода (O) для продолжения цепной реакции с метаном. Формальдегид ( $HCOOH$ ) разлагается на  $H_2O$  и CO. Окись углерода (CO), реагируя с кислородом, окисляется до  $CO_2$ .

Аналогично можно представить себе горение и других газов:

$H_2$ , CO и т. д.

Основным отличием цепных реакций является регенерация активных центров, ускоряющих весь процесс.

Цепная теория объясняет возникновение и протекание процесса горения изменением концентрации активных центров. Топливо воспламеняется при такой скорости цепной реакции, когда количество возникающих цепей больше (или равно) количеству цепей обрыва; ниже температуры воспламенения обрыв цепей преобладает. Для многих реакций накопление активных центров связано с разогревом системы, но есть реакции, при которых значительного разогрева не происходит.

Таким образом, согласно цепной теории, первопричиной воспламенения и горения является цепной процесс, из которого во вторичном порядке может вытекать и тепловой. Цепная теория хорошо объясняет ряд таких явлений, которые не могла объяс-

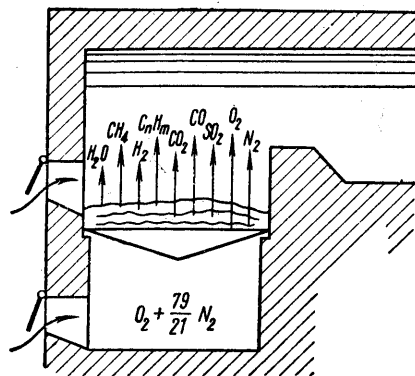


Рис. 5. Схема слоевого сжигания твердого кускового топлива в топке с горизонтальной колосниковой решеткой

сжигания: слоевой, факельный и вихревой.

1 Слоеовое горение происходит при сжигании кускового топлива, когда слой его продувает воздух в топках, газогенераторах и шахтных печах.

2 Факельное горение характерно для газообразного, жидкого и пылевидного топлива, когда смесь топлива с воздухом вдувается в топку и сгорает в зоне, имеющей форму факела, растянутого по длине камеры горения. Этот способ сжигания топлива широко используют в пламенных печах.

3 Вихревое горение применяют для смеси измельченного твердого топлива и воздуха, которая совершает при сжигании движение по спирали в камере горения. Этот вид горения в пламенных печах для нагрева металла практически не используют.

Рассмотрим слоевой процесс горения кускового топлива на простой горизонтальной колосниковой решетке. Схема топki приведена на рис. 5.

На колосниковой решетке имеем слой горящего топлива. Для поддержания работы топki и получения определенного количества тепла вводим в топку через загрузочную дверцу  $B$  кг/сек топлива, а под колосниковую решетку —  $v$  м<sup>3</sup>/сек воздуха при н. ф. у. Отношение

$$\frac{v}{B} = V_{в.л} \text{ м}^3/\text{кг при н. ф. у.}$$

называется действительным количеством воздуха, подаваемого в топку на 1 кг топлива.

нить тепловая теория, например индукционный период, предшествующий воспламенению, поведение химических огнетушителей, критический диаметр пламени и др.

В настоящее время теория горения включает элементы тепловой и цепной теории и основывается на всестороннем изучении закономерностей кинетики химических реакций, диффузионных и теплообменных процессов, процессов движения газов и частиц топлива.

При использовании топлива в промышленных условиях применяют три способа его

С другой стороны, зная химический состав топлива, на основании соотношения реакций горения можно подсчитать, сколько воздуха требуется для полного окисления горючих составляющих топлива. Это количество воздуха называется теоретически необходимым —  $V_{в.т}$  м<sup>3</sup>/кг при н. ф. у. Отношение

$$\frac{V_{в.л}}{V_{в.т}} = \alpha \quad (21)$$

называется коэффициентом избытка, или коэффициентом расхода воздуха. Для топок обычно  $\alpha > 1$  (при сжигании топлива в шахтных печах и газогенераторах  $\alpha < 1$ ).

Порция топлива, заброшенного в топку, попадает на раскаленный слой уже горящего топлива. Топливо начинает быстро нагреваться и из него выделяются сначала влага, а затем летучие вещества ( $H_2$ ,  $CH_4$ ,  $C_nH_m$  и др.). Топливо, потерявшее влагу и летучие вещества (так называемое ооксовавшееся топливо), опускается в нижние слои — покрывается новыми порциями свежего топлива. Снизу в это время поступает воздух, который, проходя через слой раскаленного топлива, окисляет углерод до  $CO_2$  и до  $CO$ ; часть же кислорода воздуха и весь азот проходят без изменения в пространство над колосниковой решеткой в топочный объем. Если в топливе имеется минеральная сера (в виде  $FeS_2$ ), то она тоже сгорает в  $SO_2$  в слое топлива на колосниковой решетке.

В результате в топочный объем попадают: 1) продукты полного горения —  $CO_2$ ;  $SO_2$ ;  $H_2O$ ; 2) продукты неполного горения и летучие вещества —  $CO$ ;  $H_2$ ;  $CH_4$ ;  $C_nH_m$ ; 3) кислород  $O_2$ ; 4) нейтральный азот  $N_2$ .

Все эти продукты в топочном объеме обуславливают протекание в нем реакций окисления летучих веществ и продуктов неполного горения. Чтобы это окисление произошло быстрее и полнее, необходимы следующие условия: 1) наличие достаточного количества кислорода; 2) хорошее перемешивание газообразных продуктов в топочном объеме; 3) достаточно высокая температура в топке.

Если эти условия не будут выполнены, то часть недоокисленных газообразных продуктов будет уходить из топki в рабочее пространство, а оттуда — во внешнюю среду, обуславливая определенную потерю тепла, которая называется потерей от химической неполноты горения и обозначается  $Q_3$  кдж/кг, или

$$\Pi_3 = \frac{Q_3}{Q_{низш}} \cdot 100\%$$

При нормальном процессе горения в отходящих продуктах горения из продуктов неполного горения должно быть только

незначительное количество СО. Полное отсутствие СО в продуктах горения нерационально, так как это приводит к значительному увеличению коэффициента избытка воздуха, и, следовательно, к сильному увеличению объема продуктов горения и потере тепла с отходящими газами.

Зола топлива частично проваливается через зазоры колосниковой решетки в зольник ( $A_{пр}$ ), частично удаляется при очистке колосниковой решетки ( $A_{выгор}$ ) и частично может уноситься в рабочее пространство печи и дымовую трубу ( $A_{ун}$ ) (при сильной тяге и мелком топливе). Вместе с золой проваливается, выгребается и уносится в трубу некоторое количество оокосовавшегося топлива, содержащего углерод ( $C_{пр}$ ,  $C_{выгор}$ ,  $C_{ун}$ ). Этот углерод обуславливает определенную потерю тепла, которая называется потерей от механической неполноты горения —  $Q_4$  кДж/кг или

$$\pi_4 = \frac{Q_4}{Q_{низш}} \cdot 100\%.$$

Таким образом, горение твердого топлива в слое делится на два процесса: процесс горения оокосовавшегося топлива — углерода в слое и процесс горения летучих и продуктов неполного горения в топочном объеме. При сжигании топлива, богатого летучими веществами, преобладает второй процесс и требуется большой объем топочного пространства.

В некоторых случаях при сжигании таких топлив на колосниках увеличивают слой топлива, а воздух подают частично под колосники (первичный воздух), а частично в топочный объем (вторичный воздух). Такие топки называются полугазовыми.

Дальнейшее увеличение слоя топлива на колосниках приводит к газогенераторному процессу (см. рис. 2).

При сжигании топлива с малым содержанием летучих преобладает процесс горения в слое, объем топки может быть небольшим, а при сжигании кокса в шахтных печах (вагранках, доменных печах) топочный объем вообще отсутствует.

## 1. Факельное горение

Упрощенная схема строения факела при горении газообразного топлива приведена на рис. 6. Струя газа, вытекающая из сопла, перемешивается со струей воздуха и превращается в зоне I в смесь газа и воздуха. Эта смесь в зоне II нагревается до температуры воспламенения. В зоне III происходит процесс активного горения. Эта зона и определяет длину и контуры видимого факела. Зона горения обычно отрывается от сопла го-

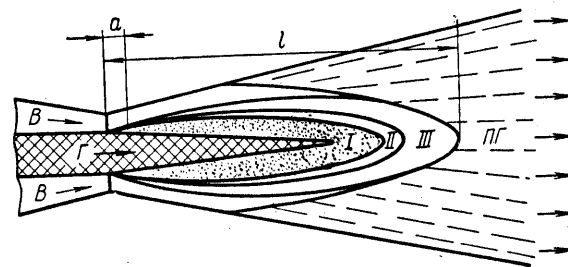


Рис. 6. Упрощенная схема факела при горении газообразного топлива:  
I — зона смешения; II — зона нагрева и воспламенения; III — зона горения

релки на какое-то расстояние  $a$ , связанное с временем прогрева смеси до температуры воспламенения. Конфигурация и длина факела зависят в основном от условий перемешивания (от аэродинамических факторов). Чем интенсивнее протекает процесс перемешивания газа с воздухом, тем короче и горячее факел.

При смешении газа с воздухом внутри горелки можно получить очень короткий прозрачный факел.

На рис. 7 приведена упрощенная схема факела при горении жидкого и пылевидного топлива.

Капельки жидкого топлива или частицы угольной пыли размером 0,05—0,07 мм сначала перемешиваются с воздухом в зоне I. При сжигании жидкого топлива это перемешивание совмещается с раздроблением струи жидкости на мельчайшие капельки за счет кинетической энергии распыливающего воздуха или пара. Образовавшаяся смесь воздуха с частичками топлива нагревается в зоне II, где топливо частично газифицируется.

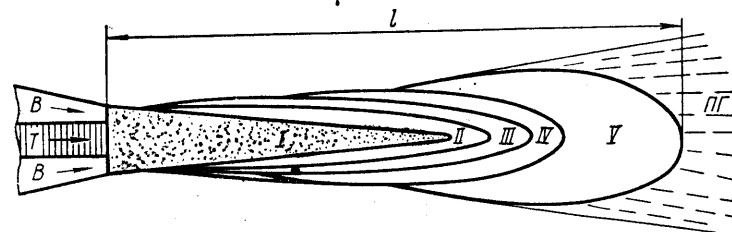


Рис. 7. Упрощенная схема факела при горении жидкого или пылевидного топлива:

I — зона смешения; II — зона нагрева и газификации; III — зона воспламенения и горения газа; IV — зона нагрева и воспламенения твердых остатков; V — зона горения твердых остатков

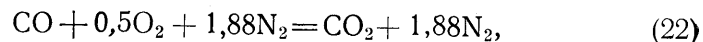
В зоне III происходит горение летучих веществ. Оставшиеся после газификации частички пылевидного или жидкого топлива в зоне IV нагреваются до температуры воспламенения и сгорают в зоне V.

Нагрев и горение ооксовавшихся частичек создает ярко светящийся факел.

Для успешного факельного сжигания жидкого топлива необходимо: 1) достаточно полное распыливание до размеров капель не более 0,05—0,07 мм; 2) быстрое и тщательное перемешивание частиц топлива с воздухом при подводе всего необходимого для горения воздуха к началу факела; 3) высокая температура топки для интенсивного протекания процесса нагрева и газификации капель; 4) интенсивное перемешивание топлива и воздуха по всей длине факела.

## 2. Характеристика и особенности горения основных газообразных составляющих

**Оксид углерода (CO).** Бесцветный токсичный газ без запаха и вкуса. Молекулярный вес — 28,01;  $\rho = 1,25 \text{ кг/м}^3$  при н. ф. у. Теплотворность  $Q = 12\,640 \text{ кДж/м}^3$  при н. ф. у. (для CO понятия  $Q_{\text{выш}}$  и  $Q_{\text{низ}}$  равнозначны). 1 м<sup>3</sup> CO при н. ф. у., сгорая с теоретически необходимым количеством воздуха по уравнению



выделяет 2,88 м<sup>3</sup> продуктов горения при н. ф. у. Пламя при этом получается прозрачное голубоватого цвета.

Количество тепла, приходящееся на 1 м<sup>3</sup> продуктов горения при н. ф. у., равно:

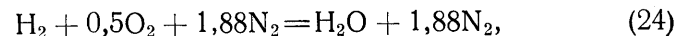
$$R_{\text{co}} = \frac{Q}{\text{CO}_2 + 1,88\text{N}_2} = \frac{12\,640}{2,88} = 4400 \text{ кДж/м}^3 \text{ при н. ф. у.} \quad (23)$$

Эта величина больше, чем у других газообразных составляющих топлив. Она обуславливает калориметрическую температуру  $t_{\text{макс}} \approx 2370^\circ \text{C}$ .

Пребывание в помещении при 0,5% CO в течение 5—6 минут смертельно опасно. Предельно допустимая концентрация окиси углерода в воздухе в соответствии с ГОСТ 5542—56 равна 2 мг/м<sup>3</sup>.

**Водород (H<sub>2</sub>).** Бесцветный нетоксичный газ, без вкуса и запаха. Молекулярный вес — 2,016;  $\rho = 0,09 \text{ кг/м}^3$  при н. ф. у. Теплотворность:  $Q_{\text{выш}} = 12\,770 \text{ кДж/м}^3$  при н. ф. у.;  $Q_{\text{низ}} = 10\,785 \text{ кДж/м}^3$  при н. ф. у.

Водород является составной частью почти всех видов газообразного топлива. 1 м<sup>3</sup> водорода при н. ф. у., сгорая с теоретически необходимым количеством воздуха по реакции



образует 2,88 м<sup>3</sup> продуктов горения при н. ф. у. Пламя водорода почти бесцветно.

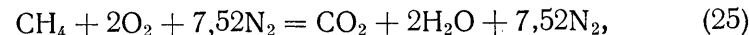
$$R_{\text{H}_2} = \frac{10\,785}{2,88} = 3748 \text{ кДж/м}^3 \text{ при н. ф. у., что соответствует}$$

$$t_{\text{макс}} \approx 2235^\circ \text{C (немного ниже, чем у окиси углерода).}$$

Водород отличается высокой реакционной способностью. Газы с высоким содержанием водорода отличаются большой скоростью распространения пламени. Водородо-воздушные смеси имеют широкие пределы воспламеняемости и весьма взрывоопасны.

**Метан (CH<sub>4</sub>).** Бесцветный нетоксичный газ, без запаха и вкуса. Молекулярный вес — 16,04;  $\rho = 0,717 \text{ кг/м}^3$  при н. ф. у. Теплотворность:  $Q_{\text{выш}} = 39\,739 \text{ кДж/м}^3$  при н. ф. у.,  $Q_{\text{низ}} = 35\,831 \text{ кДж/м}^3$  при н. ф. у.

Метан является составной частью почти всех видов газообразного топлива. Содержание его в природных газах достигает 93—98%, в нефтяных газах — 30—45%, в газах, получаемых дистилляцией твердых топлив, — 10—50%, в генераторном — 12—17% и доменном газе — 0,5—2,0%. 1 м<sup>3</sup> метана при н. ф. у., сгорая с теоретически необходимым количеством воздуха по реакции



образует 10,52 м<sup>3</sup> продуктов горения при н. ф. у.

$$R_{\text{CH}_4} = \frac{35\,831}{10,52} = 3400 \text{ кДж/м}^3 \text{ при н. ф. у.; } t_{\text{макс}} \approx 2039^\circ \text{C.} \quad (26)$$

Метан имеет низкую реакционную способность и скорость распространения пламени в смеси метана с воздухом в 6—7 раз ниже, чем в смеси водорода с воздухом.

Для достижения полноты сгорания метана необходимы хорошее перемешивание его с воздухом, небольшой избыток воздуха ( $\alpha \approx 1,1—1,15$ ) и высокая температура в зоне горения.

Горение тяжелых углеводородов (C<sub>n</sub>H<sub>m</sub>) можно выразить формулой

$$\text{C}_n\text{H}_m + \left(n + \frac{m}{4}\right)(\text{O}_2 + 3,76\text{N}_2) = n\text{CO}_2 + \frac{m}{2}\text{H}_2\text{O} + \left(n + \frac{m}{4}\right) \cdot 3,76\text{N}_2;$$

$1 \text{ м}^3$  образует  $n + \frac{m}{2} + 3,76 \left( n + \frac{m}{2} \right) \text{ м}^3$  продуктов горения.

$R_{C_nH_m}$  колеблется в пределах от 3508,5 до 3863 кДж/м<sup>3</sup> при н. ф. у. (при  $n \leq 6$ ).

При сжигании газов с высоким содержанием метана и тяжелых углеводородов потери тепла от химической неполноты горения обуславливаются в большей степени содержанием в продуктах горения метана и водорода, а не окиси углерода, как при сжигании других видов топлива.

Наличие в продуктах горения метана может не сопровождаться выделением сажистого углерода, как при неполном горении мазута или тяжелых углеводородов, поэтому могут быть значительные потери тепла от химической неполноты горения при вполне прозрачных продуктах горения. Один процент метана в продуктах горения обуславливает потерю  $\eta_3 \approx 10\%$ . Следовательно, при сжигании газов с большим содержанием метана необходим тщательный контроль отходящих продуктов горения.

Для увеличения излучательной способности пламени метана можно предварительно его подогреть или сжигать с подогретым до высокой температуры воздухом при ухудшенном перемешивании топлива с воздухом. Эти условия способствуют разложению метана перед сгоранием на сажистый углерод и водород, что и обеспечивает увеличение излучательной способности факела.

Таким образом, предварительный подогрев топлива и воздуха может влиять на протекание процесса горения топлива. Газообразные виды топлива с малым содержанием метана и тяжелых углеводородов можно подогревать до высоких температур и сжигать с холодным или подогретым воздухом без значительного изменения характера процесса горения.

Хотя при более высоких температурах топлива и воздуха процесс горения протекает интенсивнее и быстрее заканчивается, газы с большим содержанием метана и тяжелых углеводородов (природные, нефтяные, коксовальные и др.) при подогреве или сжигании с подогретым воздухом меняют характер и вид факела пламени. Нагрев углеводородов приводит при определенных температурах к выделению сажистого углерода, поэтому эти газы можно нагревать не выше температуры сажеобразования. Сжигание газов, содержащих метан и углеводороды с подогретым воздухом, может в некоторых случаях значительно увеличивать излучательную способность факела пламени. Изменение коэффициента избытка воздуха также влияет на характер пламени.

При большом избытке воздуха факел пламени жидкого и газообразного топлива становится более прозрачным, а границы его — более резко выраженными. Пламя со значительным содержанием свободного кислорода называют окислительным, так как оно может интенсивно окислять омываемые материалы, например нагреваемый металл.

При снижении избытка воздуха пламя становится менее прозрачным, а границы факела — слабо выраженными. При недостатке воздуха пламя становится непрозрачным, при большем содержании тяжелых углеводородов (мазут, нефтяные газы) происходит выделение сажистого углерода. Если воздух подогреть, то выделение сажистого углерода с повышением температуры воздуха происходит при более низких значениях коэффициента  $\alpha$ .

Пламя, богатое продуктами неполного горения, называют «восстановительным». Такое пламя предохраняет поверхность нагреваемого металла от окисления.

Это свойство пламени используется в настоящее время при конструировании печей безокислительного нагрева открытым пламенем.

## § 5. РАСЧЕТЫ ПРОЦЕССА ГОРЕНИЯ

Расчет процесса горения топлива заключается в определении: 1) количества теоретически и действительно необходимого воздуха; 2) состава и количества продуктов горения; 3) температуры горения топлива.

Точный расчет процесса горения топлива на основании химических и физических законов возможен только для случая полного горения с теоретически необходимым количеством воздуха. На практике же горение топлива происходит с определенным избытком воздуха  $\alpha$  и определенными потерями от химической и механической неполноты горения  $\eta_3$  и  $\eta_4$ .

Значения этих величин, характеризующих действительные условия горения топлива, зависят от условий перемешивания топлива с воздухом, от рода топлива и конструкций топочных устройств. Для расчетов их можно взять из табл. 13.

Горение топлива можно рассчитывать различными методами. Ниже приведен пример расчета горения мазута методом молекулярных объемов, который основан на соотношениях реакций горения (см. табл. 11) и дает наиболее точные результаты.

Таблица 13

## Характеристики процессов горения топлив

Топливо и характеристика топочного устройства	$\alpha$	$\pi_3 = \frac{Q_3}{Q^P_{\text{низш}}} \times 100\%$	$\pi_4 = \frac{Q_4}{Q^P_{\text{низш}}} \times 100\%$
<b>Твердое топливо</b>			
Горизонтальная колосниковая решетка . . . . .	1,4—1,7	5,0—7,0	3,0—10,0
Полугазовая топка . . . . .	1,3—1,6	4,0—7,0	3,0—10,0
<b>Жидкое топливо</b>			
Форсунка . . . . .	1,1—1,25	2,0—4,0	0
<b>Газообразное топливо</b>			
Горелка частичного и внешнего смещения . . . . .	1,05—1,2	1,0—4,0	0
Горелка внутреннего смещения . . . . .	1,0—1,05	0—2,0	0

**Пример.** Химический состав горючей массы мазута марки 60 (см. табл. 6)  $C^r=87,6\%$ ;  $H^r=10,7\%$ ;  $O^r=0,5\%$ ;  $N^r=0,5\%$ ;  $S^r=0,7\%$ ; зольность  $A^p=0,2\%$  и влажность  $W^p=3,0\%$ . Величины, характеризующие процесс горения, принимаем:  $\alpha=1,15$ ;  $\pi_3=3,0\%$ ;  $\pi_4=0$  (см. табл. 13).

Делаем пересчет с горючей массы на рабочую, умножая составляющие горючей массы на коэффициент:

$$k = \frac{100 - (A^p + W^p)}{100} = \frac{100 - (0,2 + 3,0)}{100} = 0,968 \text{ (см. табл. 3).}$$

Состав топлив, в процентах соответствует составу в кг/100 кг топлива, поэтому дальнейший расчет ведем на 100 кг топлива. Разделив каждую составляющую на соответствующий молекулярный вес, получим состав топлива в кмоль/100 кг топлива:

$$C^p = 84,80\%, \text{ или } \text{кг}/100 \text{ кг}: 12 = 7,067 \text{ кмоль}/100 \text{ кг};$$

$$H^p = 10,36\%, \text{ или } \text{кг}/100 \text{ кг}: 2 = 5,180 \text{ кмоль}/100 \text{ кг};$$

$$N_2^{cb} = 5,180 - 2 \cdot 0,015 = 5,150 \text{ кмоль}/100 \text{ кг};$$

$$O^p = 0,48\%, \text{ или } \text{кг}/100 \text{ кг}: 32 = 0,015 \text{ кмоль}/100 \text{ кг};$$

$$N^p = 0,48\%, \text{ или } \text{кг}/100 \text{ кг}: 28 = 0,017 \text{ кмоль}/100 \text{ кг};$$

$$S^p = 0,68, \text{ или } \text{кг}/100 \text{ кг}: 32 = 0,021 \text{ кмоль}/100 \text{ кг};$$

$$A^p = 0,20\%;$$

$$W^p = 3,00\%, \text{ или } \text{кг}/100 \text{ кг}: 18 = 0,167 \text{ кмоль}/100 \text{ кг} + 2 \cdot 0,015 = 0,197 \text{ кмоль}/100 \text{ кг};$$

$$100,00\%, \text{ или } \text{кг}/100 \text{ кг топлива}$$

Считая, что кислород в топливе связан с водородом и образует так называемую конституционную влагу, вводим соответствующую поправку, вычитая связанный водород и увеличивая количество влаги (см. реакцию 4 в табл. 11).

Определяем низшую теплотворную способность топлива по формуле Д. И. Менделеева (12)

$$Q^p_{\text{низш}} = 339,1 \cdot 84,80 + 1256 \cdot 10,36 + 108,8(0,68 - 0,48) - 25,1(9 \cdot 10,36 + 3) = 39\,376 \text{ кДж}/\text{кг}.$$

Определяем теоретически необходимое количество воздуха.

При горении углерода с образованием углекислого газа требуется 7,067 кмоль/100 кг кислорода, по реакции  $C + O_2 = CO_2$  кмоль кислорода требуется столько же, сколько в топливе углерода.

При горении водорода с образованием влаги ( $H_2O$ ) требуется в 2 раза меньше кислорода (в кмоль), чем водорода —  $\frac{1}{2} \cdot 5,150 \text{ кмоль}/100 \text{ кг}$ .

При горении серы с образованием двуокиси серы  $SO_2$  требуется 0,021 кмоль/100 кг кислорода, по реакции  $S + O_2 = SO_2$  кислорода (в кмоль) требуется столько же, сколько в топливе серы.

Всего требуется 9,663 кмоль/100 кг кислорода. Азот, поступающий с воздухом в топку (если в воздухе по объему 79% азота и 21% кислорода):

$$N_2 = 79/21 \cdot O_2 = 3,762 \cdot 9,663 = 36,352 \text{ кмоль}/100 \text{ кг}.$$

Всего сухого воздуха требуется 46,015 кмоль/100 кг.

Чтобы перейти к единицам объема, умножаем эту величину на объем 1 кмоль — 22,4 м³/кмоль при н. ф. у.

$$V_{в.т} = 46,015 \cdot 22,4 = 1031 \text{ м}^3/100 \text{ кг при н. ф. у., или } 10,31 \text{ м}^3/\text{кг при н. ф. у. топлива}.$$

Определяем действительно необходимое количество воздуха:

$$V_{в.д} = \alpha V_{в.т} = 1,15 \cdot 10,31 = 11,85 \text{ м}^3/\text{кг топлива при н. ф. у.}$$

Обычно в воздухе, поступающем в топку, содержится некоторое количество влаги. Это количество по весу равно:

$$G_{вл.возд} = \frac{\gamma_{вл}^t}{100} V_{в.д} = \frac{75}{100} \cdot 17,29 \cdot 11,85 = 153,7 \text{ г}/\text{кг} = 0,1537 \text{ кг}/\text{кг},$$

где  $\gamma_{вл}^t$  — количество влаги, насыщающее воздух при данной температуре:

$t_{\text{возд}}, ^\circ\text{C}$	0	5	10	15	20	30	40
$\gamma_{вл}^t \times 10^{-3} \text{ кг}/\text{м}^3$ при н. ф. у.	4,84	6,80	9,40	12,82	17,29	30,36	50,13

Для расчета примем  $t_{\text{возд}} = 20^\circ\text{C}$ ;

$\varphi$  — относительная влажность воздуха, %.



Для расчета можно принимать  $\varphi = 70-80\%$ .  
Объем влаги воздуха:

$$V_{\text{вл. возд}} = \frac{G_{\text{вл. возд}}}{0,805} = \frac{0,1537}{0,805} = 0,19 \text{ м}^3/\text{кг топлива при н. ф. у.},$$

где  $0,805 \text{ кг/м}^3$  — плотность влаги воздуха при нормальных физических условиях.

Таким образом, действительно необходимое количество воздуха с поправкой на влагу будет:

$$V_{\text{в. д}} = 11,85 + 0,19 = 12,04 \text{ м}^3/\text{кг при н. ф. у.},$$

количество влаги воздуха в *кмоль*х на 100 кг топлива

$$m_{\text{вл. возд}} = \frac{0,1537 \cdot 100}{18} = 0,855 \text{ кмоль/100 кг.}$$

В случае распыливания жидкого топлива паром к влаге воздуха необходимо добавить еще количество распыливающего пара.  $G_{\text{расп. пара}}$  в *кг/кг* топлива или в 100 *кг/100 кг* топлива.

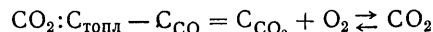
Определяем состав и количество продукта горения. Так как мы приняли химическую неполноту горения, равную 3,0%, то определяем сначала количество углерода, сгорающее в окись углерода, а не в углекислый газ, считая, что химическая неполнота горения обусловлена наличием CO в продуктах горения:

$$Q_3 = \frac{\pi_3}{100} \cdot Q_{\text{низш}}^p = \frac{3}{100} \cdot 39376,8 = 1181 \text{ кДж/кг топлива} = 118100 \text{ кДж/100 кг.}$$

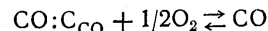
При горении 1 *кмоль*а окиси углерода и превращении в углекислый газ выделяется 285 623 *кДж/кмоль* тепла. Таким образом:

$$C_{\text{CO}} = \frac{118100}{285623} \approx 0,415 \text{ кмоль/100 кг топлива.}$$

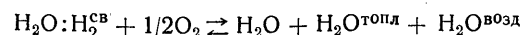
Определяем количество отдельных составляющих в продуктах горения в *кмоль/100 кг* топлива.



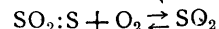
$$7,067 - 0,415 = 6,652 + 6,652 \rightleftharpoons 6,652 \text{ кмоль/100 кг} \times \\ \times 44 = 292,69 \text{ кг/100 кг.}$$



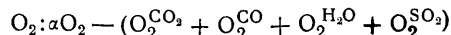
$$0,415 + 1/2 \cdot 0,415 \rightleftharpoons 0,415 \text{ кмоль/100 кг топлива} \cdot 28 = 11,62 \text{ кг/100 кг}$$



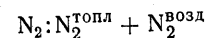
$$5,15 + 1/2 \cdot 5,15 \rightleftharpoons 5,15 + 0,197 + 0,855 = \\ = 6,202 \text{ кмоль/100 кг} \times 18 = 111,64 \text{ кг/100 кг}$$



$$0,021 + 0,021 \rightleftharpoons 0,021 \text{ кмоль/100 кг топлива} \cdot 64 = 1,34 \text{ кг/100 кг.}$$



$$1,15 \cdot 9,663 - (6,652 + 1/2 \cdot 0,415 + 1/2 \cdot 5,15 + 0,021) = \\ = 1,657 \text{ кмоль/100 кг топлива} \cdot 32 = 53,02 \text{ кг/100 кг}$$



$$0,017 + 1,15 \cdot 36,352 = 41,822 \text{ кмоль/100 кг топлива} \cdot 28 = \\ = 1171,01 \text{ кг/100 кг.}$$

Всего продуктов горения — 56,769 *кмоль/100 кг* топлива — 1641,32 *кг/100 кг*.

Объем продуктов горения:

$$V_{\text{пр. гор}} = 56,769 \cdot 22,4 = 1272 \text{ м}^3/100 \text{ кг при н. ф. у.} - 12,72 \text{ м}^3/\text{кг топлива при н. ф. у.}$$

Масса продуктов горения:

$$G_{\text{пр. гор}} = 1641,32 \text{ кг/100 кг топлива} - 16,4132 \text{ кг/кг топлива.}$$

Плотность продуктов горения:

$$\rho = \frac{G_{\text{пр. гор}}}{V_{\text{пр. гор}}} = \frac{16,4132}{12,72} = 1,29 \text{ кг/м}^3 \text{ при н. ф. у.}$$

Составляем материальный баланс процесса горения

Приход	Расход
Топливо 100 кг	Продукты горения 1641,32 кг
Воздух: $\text{O}_2 = 1,15 \cdot 9,663 \cdot 32 = 355,60 \text{ кг}$	Зола 0,20 кг
$\text{N}_2 = 1,15 \cdot 36,352 \cdot 28 = 1170,55 \text{ кг}$	
Влага 15,37 кг	

Всего . . . 1641,52 кг      Всего . . . 1641,52 кг

Определяем температуру горения топлива. Теоретической температурой горения называется такая температура продуктов горения, которая получается, если все тепло, введенное в топку (с учетом подогрева топлива и воздуха и с учетом диссоциации  $\text{CO}_2$  и  $\text{H}_2\text{O}$ ) используется на нагрев продуктов горения:

$$t_{\text{гор}} = \frac{Q_{\text{низш}}^p + Q_{\text{возд}} + Q_{\text{топл. физ}} - Q_{\text{диссоц}}}{(\text{CO}_2 + \text{O}_2) C_{\text{CO}_2} + \text{H}_2\text{O} \cdot C_{\text{H}_2\text{O}} + \text{O}_2 \cdot C_{\text{O}_2} + (\text{N}_2 + \text{CO}) C_{\text{N}_2}} [\text{°C}]. \quad (27)$$

Балансовой температурой горения (по терминологии проф. С. Г. Тройба) называется такая температура продуктов горения, которая получилась бы, если бы тепло, введенное в топку (с учетом подогрева топлива и воздуха и потерь тепла от химической и механической неполноты горения), пошло на нагрев продуктов горения:

$$t_{\text{бал}} = \frac{Q_{\text{низш}}^p + Q_{\text{возд}} + Q_{\text{топл. физ}} - Q_3 - Q_4}{(\text{CO}_2 - \text{O}_2) C_{\text{CO}_2} + \text{H}_2\text{O} \cdot C_{\text{H}_2\text{O}} + \text{O}_2 C_{\text{O}_2} + (\text{N}_2 + \text{CO}) C_{\text{N}_2}} [\text{°C}]. \quad (28)$$

В этих формулах, кроме известных уже обозначений  $Q_{\text{низш}}^p$ ,  $Q_3$  и  $Q_4$ ,  $Q_{\text{возд}}$  и  $Q_{\text{топл. физ}}$  — количество тепла, вводимое в топку с подогретым воздухом и подогретым топливом в  $\text{кдж/кг}$  топлива или в  $\text{кдж/м}^3$  топлива при н. ф. у.;

$Q_{\text{диссоц}}$  — количество тепла, израсходованного на диссоциацию  $\text{CO}_2$  и  $\text{H}_2\text{O}$  в топке в  $\text{кдж/кг}$  топлива или в  $\text{кдж/м}^3$  топлива при н. ф. у.;

$\text{CO}_2$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{N}_2$  и  $\text{CO}$  — количество соответствующих продуктов горения в  $\text{м}^3/\text{кг}$  при н. ф. у. или в  $\text{м}^3/\text{м}^3$  топлива;

$C_{\text{CO}_2}$ ,  $C_{\text{H}_2\text{O}}$ ,  $C_{\text{O}_2}$  и  $C_{\text{N}_2}$  — средние теплоемкости продуктов горения в  $\text{кдж/м}^3 \cdot \text{град}$  при н. ф. у. (приложение 2).

Определяем балансовую температуру горения (в условиях нашего примера). Количество тепла, введенное в топку на 1  $\text{кг}$  топлива:

$$Q_{\text{низш}}^p + Q_{\text{возд}} + Q_{\text{топл. физ}} - Q_3 - Q_4 = Q_{\text{низш}}^p - Q_3 = \\ = 39\,376 - 1180 = 38\,156 \text{ кдж/кг топлива.}$$

Теплосодержание 1  $\text{м}^3$  продуктов горения

$$i_{\text{пр. гор}} = \frac{38\,156}{12,7} = 3014,4 \text{ кдж/м}^3 \text{ при н. ф. у.}$$

Объемный состав продуктов горения в  $\text{кмоль/кмоль}$  или  $\text{м}^3/\text{м}^3$  при н. ф. у.:

$$\text{CO}_2 + \text{SO}_2 = \frac{6,652 + 0,021}{56,769} = 0,1175; \quad \text{CO} = \frac{0,415}{56,769} = 0,0073;$$

$$\text{H}_2\text{O} = \frac{6,202}{56,769} = 0,1090; \quad \text{O}_2 = \frac{1,657}{56,769} = 0,0292;$$

$$\text{N}_2 = \frac{41,822}{56,769} = 0,7370.$$

Определяем теплосодержание продуктов горения при  $t_{\text{бал}} = 1800^\circ \text{C}$ :

$$i_{\text{CO}_2 + \text{SO}_2} = (\text{CO}_2 + \text{SO}_2) C_{\text{CO}_2} \cdot t_{\text{бал}} = 0,1175 \cdot 2,39 \cdot 1800 = 506,6 \text{ кдж/м}^3 \text{ при н. ф. у.}$$

$$i_{\text{H}_2\text{O}} = \text{H}_2\text{O} \cdot C_{\text{H}_2\text{O}} \cdot t_{\text{бал}} = 0,1090 \cdot 1,92 \cdot 1800 = 376,8 \text{ кдж/м}^3 \text{ при н. ф. у.}$$

$$i_{\text{O}_2} = \text{O}_2 \cdot C_{\text{O}_2} \cdot t_{\text{бал}} = 0,0292 \cdot 1,55 \cdot 1800 = 79,5 \text{ кдж/м}^3 \text{ при н. ф. у.}$$

$$i_{\text{N}_2 + \text{CO}} = (\text{N}_2 + \text{CO}) C_{\text{N}_2} \cdot t_{\text{бал}} = 0,7443 \cdot 1,47 \cdot 1800 = 1967,8 \text{ кдж/м}^3 \text{ при н. ф. у.}$$

$$\text{Итого.} \dots i_{\text{пр. гор}} = 2930,7 \text{ кдж/м}^3 \text{ при н. ф. у.}$$

При  $t_{\text{бал}} = 1900^\circ \text{C}$

$$0,1175 \cdot 2,50 \cdot 1900 = 540,1 \text{ кдж/м}^3 \text{ при н. ф. у.}$$

$$0,1090 \cdot 1,94 \cdot 1900 = 401,9 \text{ " "}$$

$$0,0292 \cdot 1,56 \cdot 1900 = 87,9 \text{ " "}$$

$$0,744 \cdot 1,48 \cdot 1900 = 2076,6 \text{ " "}$$

$$\text{Итого.} \dots i_{\text{пр. гор}} = 3106,5 \text{ кдж/м}^3 \text{ при н. ф. у.}$$

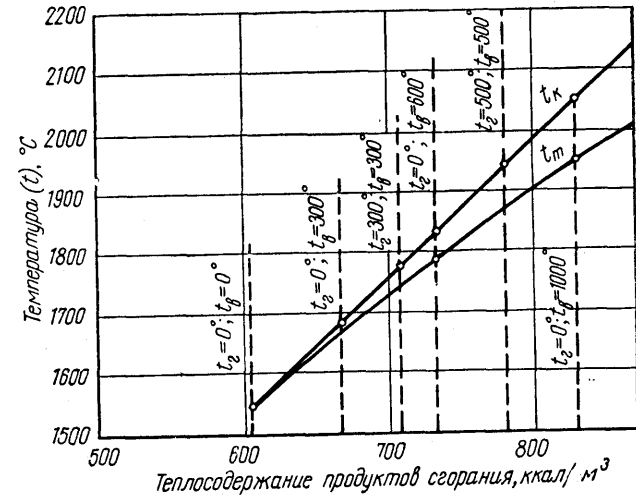


Рис. 8. Калориметрическая ( $t_k$ ) и теоретическая ( $t_t$ ) температуры горения смешанного (коксодоменного) газа при различной температуре газа ( $t_g$ ) и воздуха ( $t_v$ )

Действительная температура горения находится в пределах  $1800\text{—}1900^\circ \text{C}$ , так как теплосодержание продуктов горения при  $1800^\circ \text{C}$  меньше, а при  $1900^\circ \text{C}$  — больше, чем тепло, введенное в топку на 1  $\text{м}^3$  продуктов горения при н. ф. у.

Далее  $t_{\text{бал}}$  находим интерполяцией: (обозначим  $t_{\text{бал}} = 1800 + x^\circ \text{C}$ )

$$1900 - 1800 = 100^\circ \text{C}; \quad 1800 + x - 1800 = x^\circ \text{C};$$

$$\Delta i_{1900-1800} = 3106,5 - 2930,7 = 175,8 \text{ кдж/м}^3 \text{ при н. ф. у.}$$

$$\Delta i_{t_{\text{бал}}-1800} = 3014,4 - 2930,7 = 83,7 \text{ кдж/м}^3 \text{ при н. ф. у.}$$

$$\frac{x}{100} = \frac{\Delta i_{t_{\text{бал}}-1800}}{\Delta i_{1900-1800}}; \quad \frac{x}{100} = \frac{83,7}{175,8}; \quad x = \frac{83,7}{175,8} \cdot 100 = 47,5^\circ \text{C};$$

$$t_{\text{бал}} = 1847,5^\circ \text{C}.$$

Метод определения теоретической температуры горения с учетом диссоциации  $\text{CO}_2$  и  $\text{H}_2\text{O}$  описан в литературе (В. П. Линчевский «Топливо и его сжигание»; Г. С. Тройб «Расчет температур горения»).

На рис. 8 приведены результаты определения температуры горения без учета и с учетом диссоциации для продуктов горения, содержащих 15,75%  $\text{CO}_2$  и 10,9%  $\text{H}_2\text{O}$  при различном их теплосодержании.

Действительная температура, которую можно получить при сжигании топлива, будет, конечно, ниже теоретической или ба-

лансовой, так как не все тепло, введенное в топку, идет на нагрев продуктов горения, какая-то часть его выделяется в окружающее пространство. Чем быстрее и интенсивнее протекает процесс горения (чем быстрее и совершеннее происходит процесс перемешивания топлива с воздухом), тем меньше потери тепла и тем ближе действительная температура топки ( $t_{\text{топки}}$ ) к теоретической.

$$\text{Отношение } \frac{t_{\text{топки}}}{t_{\text{гор}}} = \eta_{\text{пир}} \quad (29)$$

называется пирометрическим коэффициентом топки и может лежать в пределах  $\eta_{\text{пир}} = 0,6 \div 0,9$ .

Для приближенных расчетов при сжигании топлива в топках печей можно рекомендовать следующие значения  $\eta_{\text{пир}}$ : при сжигании твердого топлива  $\eta_{\text{пир}} = 0,65 \div 0,75$ ; при сжигании жидкого топлива  $\eta_{\text{пир}} = 0,70 \div 0,80$ ; при сжигании газообразного топлива  $\eta_{\text{пир}} = 0,75 \div 0,85$ .

Таким образом, при сжигании мазута марки 60 без подогрева воздуха в топке печи можно получить температуру порядка  $t_{\text{топки}} = (0,7 \div 0,8) \cdot 1847,5 = 1290 \div 1475^\circ \text{C}$ .

Следует подчеркнуть условность понятия коэффициента  $\eta_{\text{пир}}$ , который выражает только порядок величины и не учитывает различных факторов, влияющих на отклонение действительной температуры топки от теоретической или балансовой.

При расчете горения газообразного топлива, состав которого выражают в процентах по объему, методика остается той же, только несколько иначе происходит переход от химического состава в объемных процентах к составу в  $\text{кмоль}/\text{м}^3$  при н. ф. у.

Чтобы сделать такой переход, каждую составляющую химического состава газа нужно разделить на 100, перейдя к составу в  $\text{м}^3/\text{м}^3$ , а затем каждую из них разделить на  $22,4 \text{ м}^3/\text{кмоль}$  — объем одного киломоля.

Для примера проводим пересчет состава генераторного газа из Челябинского бурого угля:

в % по объему	в $\text{м}^3/\text{м}^3$ при н. ф. у.	в $\text{кмоль}/\text{м}^3$
$\text{CH}_4 = 3,20 : 100$	$0,0320 : 0,0224$	1,420
$\text{C}_2\text{H}_4 = 0,28 : 100$	$0,0028 : 0,0224$	0,125
$\text{CO}_2 = 7,70 : 100$	$0,0770 : 0,0224$	3,440
$\text{CO} = 20,80 : 100$	$0,2080 : 0,0224$	9,300
$\text{H}_2 = 15,84 : 100$	$0,1584 : 0,0224$	7,060
$\text{N}_2 = 45,50 : 100$	$0,4550 : 0,0224$	20,350
$\text{O}_2 = 0,19 : 100$	$0,0019 : 0,0224$	0,085
$\text{SO}_2 = 0,19 : 100$	$0,0019 : 0,0224$	0,085
$\text{H}_2\text{O} = 6,30 : 100$	$0,0630 : 0,0224$	2,815

Итого . . . 100,00%  $1,0000 \text{ м}^3/\text{м}^3$   $44,630 \text{ кмоль}/\text{м}^3$   
при н.ф.у. при н.ф.у.

Дальнейший расчет выполняют так же, как в приведенном выше примере расчета горения мазута, только все величины относятся не к  $100 \text{ кг}$  топлива, а к  $1 \text{ м}^3$  газа при н. ф. у.

Кроме описанного выше, существуют и другие, менее точные, упрощенные и графические методы расчета горения топлива. В табл. 14 приведены формулы для быстрого определения  $V_{\text{в.т}}$ ,  $V_{\text{в.д}}$  и  $V_{\text{пр.гор}}$ , если задаваться определенным избытком воздуха, но не учитывать  $Q_3$  и  $Q_4$ .

Таблица 14

Определение количества воздуха и объема воздуха и продуктов горения для различных видов топлива

Топливо	$\alpha = 1,0$		$\alpha > 1$	
	в $\text{м}^3/\text{кг}$ или $\text{м}^3/\text{м}^3$ $V_{\text{в.т}}$ при н. ф. у.	$\frac{\text{м}^3}{\text{кг}}$ или $\frac{\text{м}^3}{\text{м}^3}$ $V'_{\text{пр. гор}}$ при н. ф. у.	$V_{\text{в.д}}$	$V_{\text{пр.гор}}$
Дрова . . . . .	$4,66 \left(1 - \frac{W^p}{100}\right)$	$5,3 - 4,055 \frac{W^p}{100}$	$\alpha V_{\text{в.т}}$	$V_{\text{пр. гор}} + (\alpha - 1) V_{\text{в.т}}$
Каменный уголь	$1,01 \frac{Q_{\text{низш}}^p}{1000} + 0,5$	$0,89 \frac{Q_{\text{низш}}^p}{1000} + 1,65$		
Мазут . . . . .	$0,85 \frac{Q_{\text{низш}}^p}{1000} + 2,0$	$1,11 \frac{Q_{\text{низш}}^p}{1000}$		
Газообразное топливо	"	"		
$Q_{\text{низш}}^p < 12560$ $\text{кДж}/\text{м}^3$ при н. ф. у.	$0,875 \frac{Q_{\text{низш}}^p}{1000}$	$0,795 \frac{Q_{\text{низш}}^p}{1000} + 1$		
$Q_{\text{низш}}^p > 12560$ $\text{кДж}/\text{м}^3$ при н. ф. у.	$1,09 \frac{Q_{\text{низш}}^p}{1000} - 0,25$	$1,14 \frac{Q_{\text{низш}}^p}{1000} + 0,25$		

На графике рис. 9, а приведены результаты расчета горения мазута марки 80, на графике рис. 9, б — природного газа ( $Q_{\text{низш}} = 35588 \text{ кДж}/\text{м}^3$  при н. ф. у.), по И. М. Рафаловичу, а на рис. 10 и 11 даны графики для расчетов горения твердого, жидкого и газообразного топлив, по С. Г. Тройбу в зависимости от теплотворной способности топлива ( $Q_{\text{низш}}^p$ ) и содержания влаги ( $W^p$ ).

По найденным с помощью графиков (рис. 10 и 11) величинам  $L_{\text{гр}}$  и  $\Delta V_{\text{гр}}$  и поправкам, приведенным на тех же графиках, вычисляют показатели горения по следующим уравнениям:

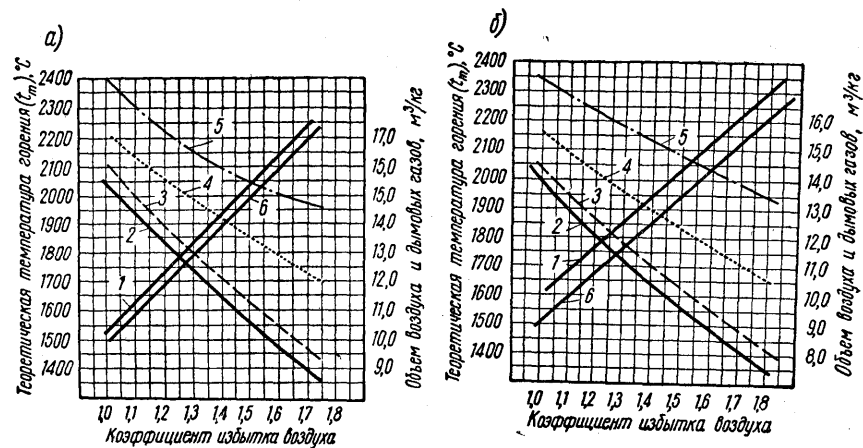


Рис. 9. Результаты расчета горения при различных коэффициентах избытка воздуха:

а — мазута; б — природного газа —  $Q_H^P = 35388$  кДж/ $m^3$  при н. ф. у.; 1 — объем продуктов горения и теоретическая температура горения; 2 —  $t_B = 0^\circ C$ ; 3 —  $t_B = 100^\circ C$ ; 4 —  $t_B = 400^\circ C$ ; 5 —  $t_B = 800^\circ C$ ; 6 — объем воздуха.

для твердого и жидкого топлива

$$V_{в.т} = L_{гр} + 0,007 W^P \text{ м}^3/\text{кг} \text{ при н. ф. у.}, \quad (30)$$

где  $L_{гр}$  — теоретически необходимое количество воздуха без учета поправки на влажность топлива;

$$V_{в.д} = \alpha V_{в.т} \text{ м}^3/\text{кг} \text{ при н. ф. у.}; \quad (31)$$

$$\Delta V_{пр.гор} = \Delta V_{гр} + 0,0124 (W^P - W_{гр}) \text{ м}^3/\text{кг} \text{ при н. ф. у.}, \quad (32)$$

где  $\Delta V_{гр}$  — разность между объемом сухих продуктов горения и действительным количеством воздуха;

$$V_{пр.гор} = V_{в.д} + \Delta V_{пр.гор}; \quad (33)$$

для газообразного топлива

$$V_{в.т} = L_{гр} + \Delta L \text{ м}^3/\text{м}^3 \text{ при н. ф. у.}; \quad (30a)$$

$$V_{в.д} = \alpha V_{в.т} \text{ м}^3/\text{м}^3 \text{ при н. ф. у.}; \quad (31a)$$

$$V_{пр.гор} = V_{в.д} + \Delta V_{гр} \text{ м}^3/\text{м}^3 \text{ при н. ф. у.} \quad (32a)$$

В печах безокислительного нагрева открытым пламенем горение газообразного топлива происходит с коэффициентом расхода воздуха 0,4—0,5 от теоретически необходимого. В качестве

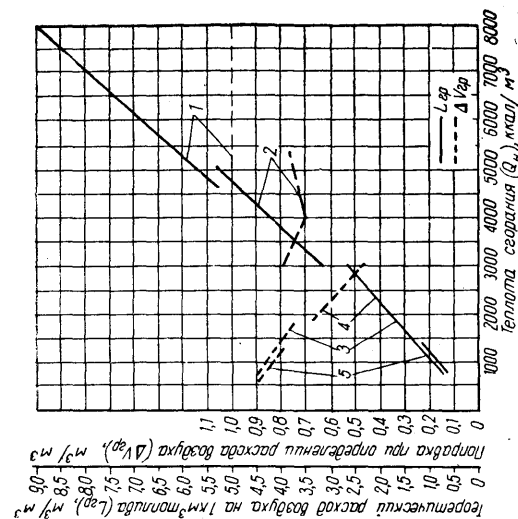


Рис. 11. График для определения расхода воздуха и объема продуктов горения для газообразного топлива:

1 — природного газа; 2 — коксового газа; 3 — теоретического газа; 4 — водяного газа; 5 — доменного газа.

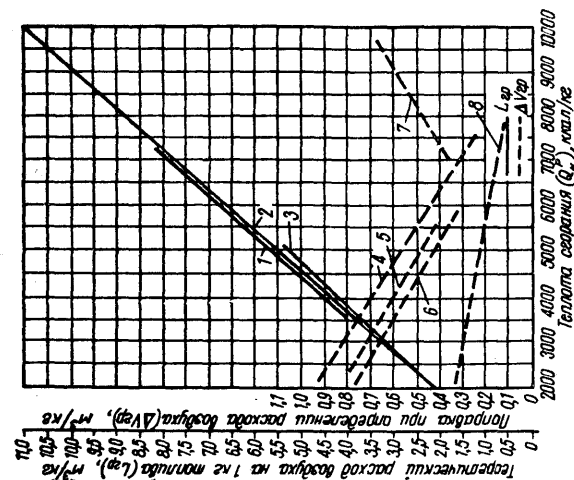


Рис. 10. График для определения расхода воздуха и объема продуктов горения при сжигании твердого и жидкого топлива:

1 — антрацита и кокса; 2 — бурых и каменных углей и жидкого топлива; 3 — растительных суррогатов, дров и торфа; 4 — растительных суррогатов, дров, торфа и каменных углей с  $AP < 16\%$ ; 5 — бурых и каменных углей с  $AP = 16-30\%$ ; 6 — бурых и каменных углей с  $AP > 30\%$ ; 7 — жидкого топлива; 8 — углей с  $AP > 30\%$ , антрацита и кокса.

примера приводим расчет горения нефтяного газа при  $\alpha < 1$  по методу, предложенному доктором техн. наук В. Ф. Копытовым:

Химический состав газа	Количество кислорода, необходимое для полного горения
Водород $H_2=12,0\%$ , или $m^3/100 m^3$ при н. ф. у.	6,0 $m^3/100 m^3$ газа при н. ф. у.
Метан $CH_4=35,5\%$ , или $m^3/100 m^3$ при н. ф. у.	71,0 »
Этилен $C_2H_4=18,0\%$ , или $m^3/100 m^3$ при н. ф. у.	54,0 »
Этан $C_2H_6=11,3\%$ , или $m^3/100 m^3$ при н. ф. у.	39,55 »
Пропилен $C_3H_6=5,1\%$ , или $m^3/100 m^3$ при н. ф. у.	22,95 »
Бутилен $C_4H_8=7,2\%$ , или $m^3/100 m^3$ при н. ф. у.	43,20 »
Оксид углерода $CO=2,5\%$ , или $m^3/100 m^3$ при н. ф. у.	1,25 »
Углекислота $CO_2=0,5\%$ , или $m^3/100 m^3$ при н. ф. у.	—
Азот $N_2=6,0\%$ , или $m^3/100 m^3$ при н. ф. у.	—
Влага $H_2O=1,9\%$ , или $m^3/100 m^3$ при н. ф. у.	—
Итого . . . 100,0%, или $m^3/100 m^3$ при н. ф. у.	237,95 $m^3/100 m^3$ газа при н. ф. у.

Расчет ведем на 100  $m^3$  газа при н. ф. у. при коэффициенте расхода воздуха 0,4 от теоретически необходимого. Необходимое количество кислорода  $O_2=0,4 \cdot 237,95=95,18 m^3/100 m^3$  при н. ф. у. С этим количеством кислорода будет введено азота (из воздуха):

$$N_2^{\text{возд}} = 79/21 \cdot 95,18 = 358 m^3/100 m^3 \text{ при н. ф. у.} + \text{азот топлива}$$

$$N_2^{\text{топл}} = 6,0 m^3/100 m^3 \text{ при н. ф. у.}$$

Таким образом, в продуктах горения будет азота

$$N_2^{\text{пр. гор}} = 358 + 6 = 364 m^3/100 m^3 \text{ при н. ф. у.}$$

В продуктах горения будем иметь  $x—m^3/100 m^3$  при н. ф. у. —  $CO_2$ ;  $y—m^3/100 m^3$  при н. ф. у. —  $CO$ ;  $z—m^3/100 m^3$  при н. ф. у. —  $H_2O$ ;  $q—m^3/100 m^3$  при н. ф. у. —  $H_2$  и  $7,0 m^3/100 m^3$  при н. ф. у. —  $CH_4$  (при горении газа с коэффициентом расхода воздуха — 0,4—0,5 в продуктах горения имеется 1—2%  $CH_4$ ).

Составляем уравнения баланса:

$$\text{по балансу углерода} \quad -x+y=(CH_4-7)+2C_2H_4+2C_2H_6+3C_3H_6+4C_4H_8+CO+CO_2=(35,5-7)+2 \cdot 18,0+2 \cdot 11,3+3 \cdot 5,1+4 \cdot 7,2+2,5+0,5=134,2;$$

$$\text{по балансу водорода} \quad -2z+2q=2H_2+4(CH_4-7)+4C_2H_4+6C_2H_6+8C_3H_6+2H_2O=2 \cdot 12+4(35,5-7)+4 \cdot 18+6 \cdot 11,3+6 \cdot 5,1+8 \cdot 7,2+2 \cdot 1,9=369,8;$$

$$\text{по балансу кислорода} \quad -2x+y+z=2CO_2+CO+H_2O+2O_2^{\text{возд}}=2,05+2,5+2,5+1,9+2 \cdot 95,18=195,8.$$

Константа равновесия реакции водяного газа

$$K = \frac{CO \cdot H_2O}{CO_2 \cdot H_2} = \frac{yz}{xq}. \quad (34)$$

Значения константы  $K$  в зависимости от температуры приведены в табл. 15.

Таблица 15

Зависимость константы  $K = \frac{P_{CO} P_{H_2O}}{P_{CO_2} P_{H_2}}$  от температуры.

°C	K	°C	K	°C	K	°C	K
650	0,510	850	1,14	1050	1,94	1250	2,8
700	0,645	900	1,33	1100	2,15	1300	3,0
750	0,795	950	1,52	1150	2,37		
800	0,966	1000	1,73	1200	2,59		

При температуре в камере печи, равной 1250°С, значение  $K$  будет равно 2,8.

Выражаем все величины через  $x$ :

$$y=134,2-x; \quad z=61,6-x; \quad q=123,3+x;$$

$$K = \frac{(134,2-x)(61,6-x)}{x(123,3+x)} = 2,8.$$

Решая последнее уравнение относительно  $x$ , получим:  $x=17,5 m^3/100 m^3$  при н. ф. у.;  $y=116,7 m^3/100 m^3$  при н. ф. у.;  $z=44,1 m^3/100 m^3$  при н. ф. у.;  $q=140,8 m^3/100 m^3$  при н. ф. у.

Состав продуктов горения:

$x=CO_2=17,5 m^3/100 m^3$ при н. ф. у. или 2,55%;	состав сухого газа 2,70%
$y=CO=116,7$	или 16,90%
$z=H_2O=40,1$	или 6,40%
$q=H_2=140,8$	или 20,40%
$N_2=364,0$	или 52,75%
$CH_4=7,0$	или 1,00%

Итого . . . 690,1  $m^3/100 m^3$  при н. ф. у. 100,00% 100,00%

В действительности условия равновесия при горении с недостатком воздуха могут и не быть достигнуты. Тогда состав продуктов горения будет несколько отклоняться от состава, полученного расчетом. Обычно расхождения небольшие, но их следует иметь в виду.

Таким образом, при горении нефтяного газа с коэффициентом расхода воздуха 0,4 требуется воздуха

$$V_{\text{возд}} = \frac{95,18 + 358}{100} = 4,53 \text{ м}^3/\text{м}^3 \text{ при н. ф. у.}$$

Продукты горения составляют

$$V_{\text{пр. гор}} = \frac{690,1}{100} = 6,90 \text{ м}^3/\text{м}^3 \text{ при н. ф. у.}$$

Определяем теплотворность топлива:

$$Q_{\text{P}}^{\text{P}} = 126,4 \cdot \text{CO} + 105\text{H}_2 + 358\text{CH}_4 + 590,3\text{C}_2\text{H}_4 + 626,4 \text{C}_2\text{H}_6 + 917,7\text{C}_3\text{H}_8 + 1298\text{C}_4\text{H}_{10} = 126,4 \cdot 2,5 + 105 \cdot 12 + 358 \cdot 35,5 + 590,3 \cdot 18 + 626,4 \cdot 11,3 + 917,7 \cdot 5,1 + 1298 \cdot 7,2 = 45\,318,5 \text{ кДж/м}^3 \text{ при н. ф. у.}$$

Определяем химическое тепло продуктов горения:

$$Q_{\text{хим}} = 126,4\text{CO} + 105\text{H}_2 + 358\text{CH}_4 \cdot V_{\text{пр. гор}} = (126,4 \cdot 16,9 + 105 \cdot 20,4 + 358 \cdot 1,0)6,9 = 32\,393 \text{ кДж/м}^3 \text{ при н. ф. у.}$$

Теплосодержание продуктов горения при подогреве воздуха до  $t_{\text{возд}} = 750^\circ\text{C}$ :

$$Q_{\text{пр. гор}} = Q_{\text{низш}}^{\text{P}} - Q_{\text{хим}} + V_{\text{возд}} C_{\text{возд}} t_{\text{возд}} = 45\,318,5 - 32\,393,3 + 4,53 \cdot 1,375 \cdot 750 = 17\,593 \text{ кДж/м}^3 \text{ при н. ф. у.}$$

Определяем температуру горения. Теплосодержание продуктов горения при

$$t_{\text{гор}} = 1600^\circ\text{C}$$

$$q_{\text{CO}_2} = 0,175 \cdot 2,357 \cdot 1600 = 661,5 \text{ кДж/м}^3 \text{ при н. ф. у.}$$

$$q_{\text{CO}} = 1,167 \cdot 1,474 \cdot 1600 = 2750,7 \quad \text{»} \quad \text{»}$$

$$q_{\text{H}_2\text{O}} = 0,441 \cdot 1,846 \cdot 1600 = 1327,2 \quad \text{»} \quad \text{»}$$

$$q_{\text{H}_2} = 1,408 \cdot 1,373 \cdot 1600 = 3098,2 \quad \text{»} \quad \text{»}$$

$$q_{\text{N}_2} = 3,640 \cdot 1,453 \cdot 1600 = 8478,3 \quad \text{»} \quad \text{»}$$

$$q_{\text{CH}_4} = 0,07 \cdot 3,751 \cdot 1600 = 418,7 \quad \text{»} \quad \text{»}$$

$$\text{Итого} \dots \dots \dots 16734,6 \text{ кДж/м}^3 \text{ при н. ф. у.}$$

$$t_{\text{гор}} = 1700^\circ\text{C}$$

$$q_{\text{CO}_2} = 0,175 \cdot 2,374 \cdot 1700 = 707,6 \text{ кДж/м}^3 \text{ при н. ф. у.}$$

$$q_{\text{CO}} = 1,167 \cdot 1,482 \cdot 1700 = 2930,8 \quad \text{»} \quad \text{»}$$

$$q_{\text{H}_2\text{O}} = 0,441 \cdot 1,901 \cdot 1700 = 1423,5 \quad \text{»} \quad \text{»}$$

$$q_{\text{H}_2} = 1,408 \cdot 1,382 \cdot 1700 = 3299,2 \quad \text{»} \quad \text{»}$$

$$q_{\text{N}_2} = 3,640 \cdot 1,461 \cdot 1700 = 9043,5 \quad \text{»} \quad \text{»}$$

$$q_{\text{CH}_4} = 0,07 \cdot 3,751 \cdot 1700 = 443,8 \quad \text{»} \quad \text{»}$$

$$\text{Итого} \dots \dots \dots 17\,848,4 \text{ кДж/м}^3 \text{ при н. ф. у.}$$

Интерполируем и получаем температуру горения:

$$\Delta t_{100} = 1700 - 1600 = 100^\circ\text{C}; \Delta t = 1600 + x = 1600 = x^\circ\text{C};$$

$$\Delta q_{1700-1600} = 17848,4 - 16734,6 = 1113,8 \text{ кДж/м}^3 \text{ при н. ф. у.};$$

$$\Delta q_{t_{\text{гор}}-1600} = 17\,593 - 16\,734,6 = 858,4 \text{ кДж/м}^3 \text{ при н. ф. у.};$$

$$t_{\text{гор}} = 1600 + \frac{858,4}{1113,8} \cdot 100 = 1677^\circ\text{C}.$$

Температура, которую можно получить в камере печи,

$$t_{\text{топ}} = 0,75 t_{\text{гор}} = 0,75 \cdot 1677 \approx 1260^\circ\text{C}.$$

Результаты расчета горения нефтяного газа при других значениях коэффициента расхода воздуха приведены на рис. 12.

## § 6. КОНТРОЛЬ ПРОЦЕССА ГОРЕНИЯ

Чтобы контролировать процесс горения, т. е. знать, с каким коэффициентом избытка воздуха и с какими потерями от химической неполноты горения происходит процесс горения, делают химический анализ продуктов горения, выходящих из топки или из рабочей камеры печи.

При сжигании твердого и газообразного топлива с малым содержанием метана и тяжелых углеводородов (генераторный, доменный газы), а также, если не требуется большой точности, жидкого топлива, газы можно анализировать с помощью химического газоанализатора типа ГХП-3\* (рис. 13).

Анализ газа с помощью этого прибора ведут, предполагая, что в составе сухих продуктов горения из продуктов неполного горения имеется только CO, т. е.

$$\text{RO}_2 + \text{O}_2 + \text{CO} + \text{N}_2 = 100\%, \quad (35)$$

где  $\text{RO}_2 = \text{CO}_2 + \text{SO}_2$ .

Газоанализатором ГХП-3 определяем  $\text{RO}_2$  и  $\text{O}_2$ , а в некоторых случаях и CO. Если состав сухого газа соответствует формуле (35) и газоанализатором определяют  $\text{RO}_2$  и  $\text{O}_2$ , содержание CO можно вычислить по следующей формуле:

$$\text{CO} = \frac{21 - (1 + \beta)\text{RO}_2 - \text{O}_2}{0,605 + \beta}, \quad (36)$$

где  $\beta$  — так называемая характеристика топлива.

\* Газоанализатор типа ГХП-3 изготовляют по ГОСТ 6329—52.

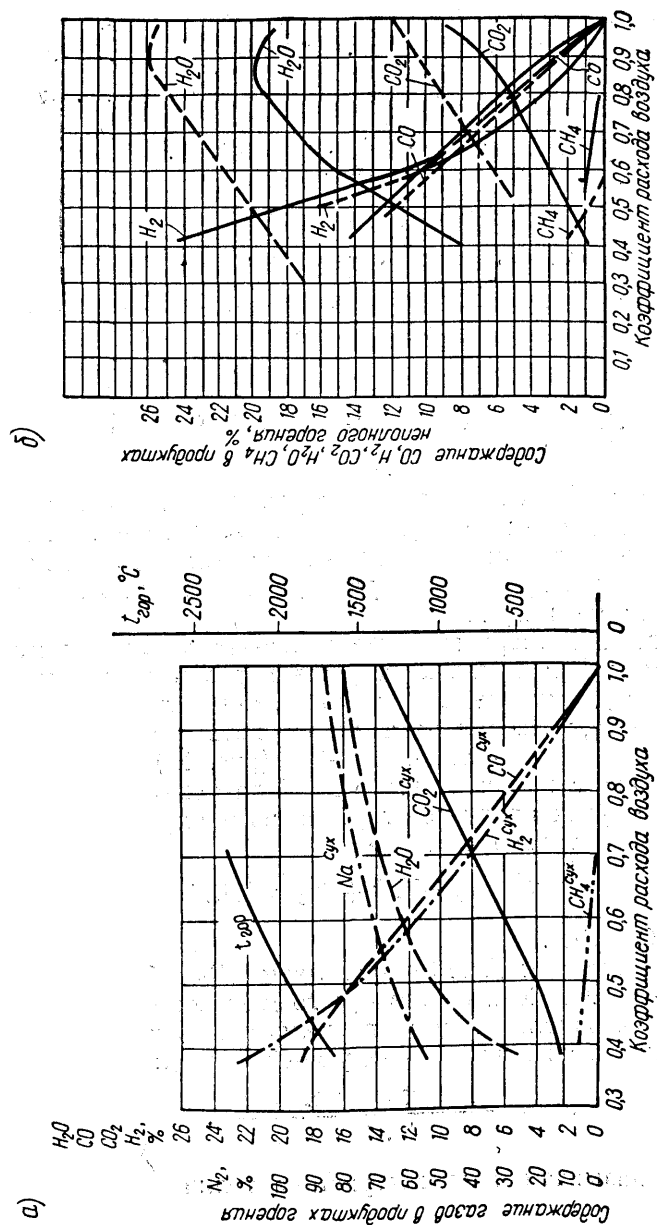


Рис. 12. Состав продуктов горения при сжигании с недостатком воздуха нефтяного (а), природного и коксового газов (б). Температура горения нефтяного газа подсчитана при  $t_{\text{в}} = 750^\circ \text{C}$

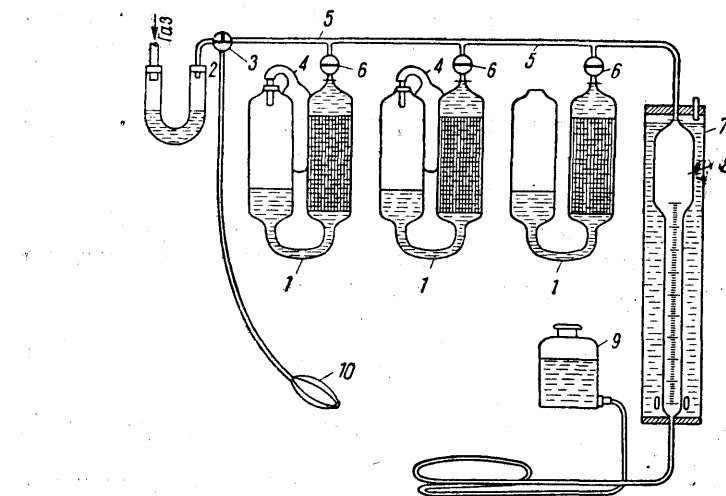


Рис. 13. Схема устройства химического переносного газоанализатора ГХП-3: 1 — поглотительные бюретки; 2 — фильтр; 3 — трехходовой кран; 4 — резиновый мешочек; 5 — капиллярная трубка; 6 — стеклянные краны; 7 — мантия с водой; 8 — измерительная бюретка; 9 — сосуд с окрашенной жидкостью; 10 — груша

Для твердого и жидкого топлив, состав которых дается в процентах по весу

$$\beta = 2,37 \frac{\text{НР} - \text{ОР}}{\text{СР} + 3/8\text{SP}} \quad (37)$$

Для газообразного топлива:

$$\beta = 0,21 \frac{\frac{\text{N}_2}{100} + 0,79V_{\text{возд}}}{V_{\text{RO}_2}} 0,79. \quad (37a)$$

При полном горении ( $\text{CO}=\text{O}$ ) с теоретически необходимым количеством воздуха ( $\text{O}_2=\text{O}$ ) из формулы (36) получим максимальное содержание  $\text{RO}_2$  в сухих продуктах горения:

$$\text{RO}_2^{\text{макс}} = \frac{21}{1 + \beta} \% \quad (38)$$

Коэффициент избытка воздуха по анализу, выполненному с помощью газоанализатора ГХП-3, подсчитывают по следующей формуле:

$$\alpha = \frac{21}{21 - \frac{79}{\text{N}_2} \left( \text{O}_2 - \frac{1}{2} \text{CO} \right)} \quad (39)$$

При сжигании газообразных топлив со значительным содержанием азота следует применять более точную формулу

$$\alpha = \frac{N_2 - N_2^{\text{топл}}}{(N_2 - N_2^{\text{топл}}) - 3,76 \left( O_2 - \frac{1}{2} CO - \frac{1}{2} H_2 - 2CH_4 \right)}, \quad (39a)$$

где  $N_2^{\text{топл}}$  — содержание азота в топливе в % по объему.

Потерю от химической неполноты горения определяют по формуле для жидкого и твердого топлива

$$Q_3 = 241,6 C_p \frac{CO}{CO_2 + CO} [\text{кДж/кг}], \quad (40)$$

где  $C_p$  — содержание углерода в рабочем составе топлива в % по весу.

При сжигании топлив, богатых метаном и тяжелыми углеводородами (природный газ, нефтяной газ и др.), а также при сжигании других топлив с избытком воздуха  $\alpha < 1$  в продуктах горения, кроме CO, могут содержаться и другие продукты неполного горения  $H_2$  и  $CH_4$ . В этом случае анализ продуктов горения с помощью газоанализатора ГХП-3 не дает правильного представления об их составе.

Значения  $\beta$  и  $RO_2^{\text{макс}}$  для разных видов топлива приведены в табл. 16.

Таблица 16

Характеристики топлив

Вид топлива	Значение $\beta$	Значение $RO_2^{\text{макс}}$ , %
Дрова . . . . .	0,036	20,2
Торф . . . . .	0,03—0,10	20,3—19,0
Бурый уголь . . . . .	0,05—0,10	20—19
Каменный уголь . . . . .	0,08—0,15	19,4—18,2
Антрацит . . . . .	0,03—0,10	20,3—19,0
Кокс . . . . .	0—0,02	21—20,5
Мазут . . . . .	0,3—0,34	16,2—15,6
Бензин . . . . .	0,41	14,8
Генераторный газ . . . . .	0,04—0,06	20,2—19,8
Доменный газ (печи на коксе) . . . . .	—0,15	24,2
Природный газ . . . . .	0,7—0,8	12,3—11,6
Коксовальный газ . . . . .	1,0—1,1	10,5—10,0

Анализ газа необходимо производить более сложными газоанализаторами, из которых самым распространенным в настоящее время является газоанализатор ВТИ-II.

Соотношение между содержанием отдельных составляющих в сухих продуктах горения в этом случае можно выразить следующим уравнением:

$$21 = (1 + \beta) CO_2 + O_2 + [(0,605 + \beta) CO + (\beta - 0,586) CH_4 + 0,185 H_2]. \quad (36a)$$

Потерю тепла от химической неполноты горения можно определить по формуле

$$Q_3 = (126,4 CO + 105,4 H_2 + 358 CH_4) V_{\text{пр. гор}}^{\text{сух}} [\text{кДж/м}^3] \quad \text{при н. ф. у.} \quad (40a)$$

При наладке режима газопотребляющих агрегатов, когда необходим оперативный контроль химической неполноты горения, иногда можно использовать и результаты газового анализа, полученные с помощью простого газоанализатора ГХП-3 (при характеристике топлива  $\beta > 0,6$ ).

Для этого определяют количество кислорода в продуктах горения, соответствующее полному горению, по формуле

$$O_{2t} = 21 - (1 + \beta) CO_2.$$

Если действительное содержание  $O_2$  меньше  $O_{2t}$ , то это свидетельствует о химической неполноте горения, которая тем больше, чем больше разность  $O_{2t} - O_2$ . Если же фактическое содержание кислорода  $O_2$  больше  $O_{2t}$ , то это указывает на некорректность анализа.

В случае необходимости непрерывного контроля состава продуктов горения применяют различные автоматические газоанализаторы (химические, электрические, магнитные и др.).



## МЕХАНИКА ГАЗОВ

## § 7. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Правильная организация движения газов является одним из основных условий достижения высокой производительности и экономичности печей. Кроме того, рациональный режим давления в печи обеспечивает возможность сокращения до минимума потерь металла от угара.

Движение газов в печах рассчитывают, исходя из условий обеспечения нормального горения и получения необходимых коэффициентов теплопередачи.

Если заданный коэффициент теплопередачи можно достигнуть при определенной скорости газов, то эта скорость является основой расчета, исходя из которой определяют размеры печи и мощность тягодутьевых средств.

Особенностью пламенных печей по сравнению с другими топливопотребляющими агрегатами, в частности, с паровыми котлами, является работа с небольшим положительным давлением в рабочей камере порядка  $\sim 0 \div 5 \text{ н/м}^2$ . Разрежение, создаваемое тяговыми устройствами, должно быть за пределами рабочей камеры.

Перед изучением основ механики газов необходимо остановиться на физических понятиях и размерностях используемых при этом величин.

## § 8. ЕДИНИЦЫ ИЗМЕРЕНИЯ И ОСНОВНЫЕ ФИЗИЧЕСКИЕ ПОНЯТИЯ

Прежде всего необходимо остановиться на весовых и объемных соотношениях, используемых при изучении механики газов.

Обычно расчеты ведут в системе СИ или технической системе единиц ( $M, \text{кг}, \text{сек}$ ).

В системе СИ вес единицы объема газа называется плотностью:

$$\rho = \frac{m}{V} [\text{кг/м}^3]. \quad (41)$$

Вес единицы объема газа в технической системе единиц называется удельным (объемным) весом газа и обозначается через

$$\gamma = \frac{G}{V} [\text{кг/м}^3], \quad (41a)$$

где  $G$  — вес газа,  $\text{кг}$ ;

$V$  — занимаемый им объем,  $\text{м}^3$ .

Обратная величина называется удельным объемом:

$$v = \frac{1}{\rho} [\text{м}^3/\text{кг}], \text{ или } v = \frac{1}{\gamma} = \frac{V}{G} [\text{м}^3/\text{кг}]. \quad (42)$$

Если вместо веса газа взять его массу, выраженную в технических единицах, то получится плотность газа

$$\rho = \frac{m}{V} [\text{кг} \cdot \text{сек}^2/\text{м}^4]. \quad (43)$$

Между плотностью и объемным весом имеет место следующее соотношение:

$$\gamma = \rho \cdot g [\text{н/м}^3] \text{ или } [\text{кг/м}^3], \quad (44)$$

где  $g = 9,81 \text{ м/сек}^2$  — ускорение силы тяжести.

Удельный вес газов при нормальных физических условиях с достаточной для практических расчетов точностью определяют в соответствии с законом Дальтона по формуле

$$\gamma_0 = \frac{M}{22,4} [\text{кг/м}^3], \quad (45)$$

где  $M$  — молекулярный вес газа.

В системе СИ:

$$\rho = \frac{M}{22,4} [\text{кг/м}^3] \text{ при н. ф. у.}$$

Для воздуха  $\rho_0 = 1,293 \text{ кг/м}^3$  при н. ф. у. ( $\gamma_0 = 1,293 \text{ кг/м}^3$ ). Для дымовых газов при примерных расчетах можно принимать

$\rho_0 = 1,3 \text{ кг/м}^3$  при н. ф. у. ( $\gamma_0 = 1,3 \text{ кг/м}^3$ ). При изменении параметров газа плотность и объемный вес пересчитывают по следующим формулам:

$$\rho_{T,P} = \rho_0 \frac{273}{T} \cdot \frac{P}{0,101} [\text{кг/м}^3]$$

или

$$\gamma_{T,P} = \gamma_0 \frac{273}{T} \cdot \frac{P}{1,033} [\text{кг/м}^3], \quad (46)$$

где  $T$  — абсолютная температура газа, °K;

$P$  — абсолютное давление газа,  $\text{Мн/м}^2$ .

В расчетах, связанных с движением газа в печах, влиянием изменения давления можно пренебречь. В этом случае:

$$\rho_T = \rho_0 \frac{273}{T} [\text{кг/м}^3]$$

или

$$\gamma_T = \gamma_0 \frac{273}{T} [\text{кг/м}^3]. \quad (47)$$

Аналогично пересчитывают удельный объем и плотность:

$$v_T = v_0 \frac{T}{273} [\text{м}^3/\text{кг}], \quad (47a)$$

$$\rho_T = \rho_0 \frac{273}{T} [\text{кг/м}^3] \text{ или } [\text{кг} \cdot \text{сек}^2/\text{м}^4]. \quad (47б)$$

При протекании газа (или жидкости) в закрытом канале площадью  $F \text{ м}^2$  частное от деления секундного расхода  $V$  на площадь поперечного сечения

$$w = \frac{V}{F} [\text{м/сек}] \quad (48)$$

называется средней скоростью потока. Ниже будет показано, что эта величина является расчетной и не отражает физической сущности процесса, так как величина скорости по сечению может меняться в широких пределах.

При расчетах часто пользуются понятием нормальной скорости

$$w_0 = \frac{V_0}{F} [\text{м/сек}] \text{ при н. ф. у.}, \quad (48a)$$

где  $V_0$  — расход газа, приведенный к нормальным условиям ( $0^\circ \text{С}$  и  $0,101 \text{ Мн/м}^2$ ) \*.

Давление газа в расчетах обычно выражают в  $\text{кг/м}^2$ . Необходимо помнить, что  $1 \text{ кг/м}^2 = 1 \text{ мм вод. ст.}$ . Правильность этого положения подтверждают следующие соотношения:

$$1 \text{ ат} = 1 \text{ кг/см}^2 = 10\,000 \text{ кг/м}^2;$$

$$1 \text{ ат} = 10 \text{ м вод. ст.} = 10\,000 \text{ мм вод. ст.}$$

В новой системе единиц СИ малые давления измеряют в  $\text{н/м}^2$  (ньютоны на квадратный метр) и большие — в  $\text{Мн/м}^2$  (меганьютоны на квадратный метр). Для перевода обычных единиц в единицы СИ пользуются соотношениями:  $1 \text{ кг/см}^2 = 0,098 \text{ Мн/м}^2$  и  $1 \text{ кг/м}^2 = 9,8 \text{ н/м}^2$ .

При температурах  $800 \div 1400^\circ \text{С}$  в нагревательных печах объемный вес газов в 4—6 раз меньше объемного веса окружающего воздуха.

Таким образом, движение продуктов горения в полости печи соответствует движению легкой жидкости, окруженной более тяжелой жидкостью.

Другим параметром, определяющим условия движения жидкостей (капельных несжимаемых и сжимаемых жидкостей — газов), является их вязкость.

Сущность явления вязкости заключается в том, что отдельные частицы жидкости при движении как бы прилипают друг к другу и нужно приложить определенные усилия, чтобы их оторвать.

По этой причине при движении появляются силы трения, которые оказывают сопротивление перемещению частиц.

Количественное выражение вязкости определяют две величины: динамический и кинематический коэффициенты вязкости.

При движении жидкости или газа скорости частиц меняются по сечению от максимальной в центре до нуля у стенок.

Рассмотрим два смежных слоя несжимаемой жидкости, движущихся с разной скоростью (рис. 14), причем нижний слой 1 скользит по слою 2. Скорость  $\omega_3$  (3) остается неизменной.

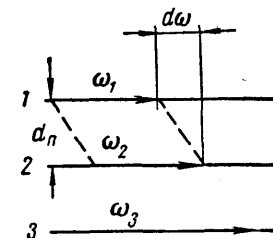


Рис. 14. Изменение скоростей смежных слоев газа или жидкости при движении

\* Иногда при расчетах приводят газ к стандартным параметрам:  $20^\circ \text{С}$  и  $760 \text{ мм рт. ст.}$

На поверхности раздела слоев 1 и 2 возникают силы трения, которые противодействуют движению.

Сила вязкости  $Q$  есть одна из причин гидравлического сопротивления потоку газов при движении, так как при этом получается напряжение сил внутреннего трения  $\tau$ , вызванное относительным сдвигом слоев. Это напряжение равно

$$\tau = \frac{Q}{\Omega},$$

где  $\Omega$  — площадь соприкосновения слоев.

Согласно исследованиям И. Ньютона, напряжение прямо пропорционально изменению скорости на единицу расстояния между осями смежных слоев жидкости и зависит от рода жидкости. Математически это можно выразить следующим образом:

$$\tau = \mu \frac{dw}{dn} \text{ [н/м}^2\text{]}. \quad (49)$$

Величина  $\mu$ , изменяющаяся в зависимости от вида жидкости и ее физических параметров, называется динамическим коэффициентом вязкости\*. Как видно из выражения (49), размерность динамического коэффициента вязкости —  $\text{н} \cdot \text{сек/м}^2$ .

В технических расчетах часто используют величину кинематического коэффициента вязкости ( $\nu$ ), равную отношению динамического коэффициента вязкости к плотности

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \text{ [м}^2\text{/сек]}. \quad (50)$$

Вязкость каплевидных жидкостей уменьшается при повышении температуры.

В отличие от вязкости каплевидных жидкостей, вязкость газов значительно увеличивается при повышении температуры. Зависимость вязкости газов от температуры выражают формулой Сутерлянда

$$\mu = \frac{1 + \frac{c}{273}}{1 + \frac{c}{T}} \sqrt{\frac{T}{273}} \mu_0 \text{ [н} \cdot \text{сек/м}^2\text{]}, \quad (51)$$

где  $\mu_0$  — вязкость газа при  $0^\circ \text{C}$ ,  $\text{н} \cdot \text{сек/м}^2$ ;

$T$  — абсолютная температура газа,  $^\circ \text{K}$ ;

$c$  — постоянная величина, зависящая от вида газа (табл. 17).

\* Динамический коэффициент вязкости  $\mu$  численно равен напряжению внутреннего трения жидкости при градиенте скорости  $\frac{dw}{dn} = 1$ .

Таблица 17

Значения коэффициентов  $\mu$  и  $c$  для некоторых газов

Газ	$c$	$\mu_0 \cdot 10^6$ н·сек/м <sup>2</sup>
Воздух . . . . .	122	17,2
Азот . . . . .	107	16,7
Кислород . . . . .	138	19,3
Углекислый газ . . . . .	250	13,7
Оксид углерода . . . . .	102	16,5
Водород . . . . .	75	8,5
Метан . . . . .	198	10,4
Водяной пар . . . . .	673	8,55

Вязкость смеси газов определяют по формуле Манна.

$$\nu_{\text{см}} = \frac{100}{\frac{V_1}{\nu_1} + \frac{V_2}{\nu_2} + \dots} \text{ [м}^2\text{/сек]}, \quad (52)$$

где  $\nu_{\text{см}}$  — коэффициент кинематической вязкости смеси газов;  
 $V_1, V_2, \dots$  — объемные содержания отдельных составляющих, %;

$\nu_1, \nu_2, \dots$  — коэффициенты кинематической вязкости этих составляющих,  $\text{м}^2\text{/сек}$ .

Значения динамической вязкости для воздуха и дымовых газов при разных температурах приведены на рис. 15.

Увеличение давления примерно до  $1,0 \text{ Мн/м}^2$  на вязкость газов не влияет. У каплевидных жидкостей вязкость вообще не зависит от давления.

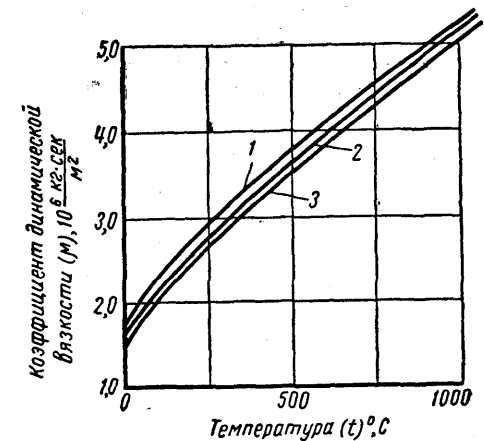


Рис. 15. Коэффициент динамической вязкости воздуха и дымовых газов:

1 — чистый воздух; 2 — дымовые газы при  $\text{CO}_2=13\%$  и  $\text{H}_2\text{O}=10\%$ ; 3 — дымовые газы при  $\text{CO}_2=13\%$  и  $\text{H}_2\text{O}=23\%$

## § 9. СИЛЫ, ДЕЙСТВУЮЩИЕ В ГАЗЕ, И УСЛОВИЯ РАВНОВЕСИЯ ГАЗОВ

Все силы, действующие в газе, разделяют на поверхностные и массовые.

Поверхностные силы, к которым относятся силы давления и вязкости, пропорциональны величине поверхности, ограничивающей объем газа. Массовые, или объемные силы, к которым относятся силы тяжести и инерции, пропорциональны массе газа и действуют на каждую частицу, заключенную в данном объеме.

Движение газов в печах может происходить за счет разности объемных весов газов в разных точках. Этот случай называется естественным, или свободным, движением газа.

В подавляющем большинстве современных печей происходит принудительное движение газов, при котором газы перемещаются в основном вследствие разности давления газов, которая создается вентилятором, дымовой трубой или дымососом.

Перед тем как начать изучение движения газов, следует рассмотреть условия их равновесия. Это необходимо для выяснения условий поведения газа при малых скоростях движения, где его состояние близко к равновесному, и для получения исходных предпосылок для последующих выводов. При этом изучают зависимость давления в данной точке от объемного веса газа и геометрического положения точки.

При выводе основных соотношений статики газов исходят из следующих положений:

1. Газ находится в равновесии, если для каждой произвольной выделенной части объема результирующая всех приложенных сил будет равна нулю.

2. Для любой выделенной части поверхности газа, находящейся в равновесии, поверхностные силы перпендикулярны к поверхности и направлены внутрь ее.

Для вывода уравнения равновесия жидкости выделим в ней элементарный прямоугольный параллелепипед с ребрами  $dx$ ,  $dy$ ,  $dz$  и объемом  $dv = dx \times$

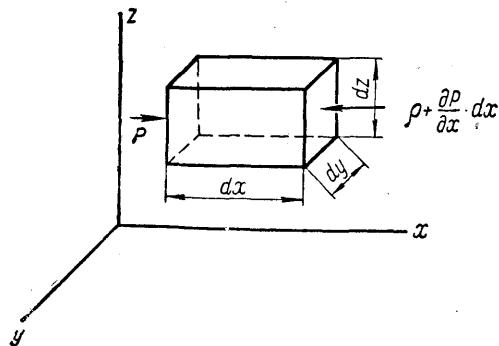


Рис. 16. Схема сил, действующих на элементарный объем газа в случае его равновесия

$\times dy \cdot dz$ . На параллелепипед действуют силы тяжести и силы давления, действующие на каждую грань (рис. 16).

Обозначим проекции ускорения силы тяжести на оси координат через  $g_x$ ,  $g_y$ ,  $g_z$ . Тогда проекции самой силы тяжести на оси координат будут равняться соответственно:  $g_x \cdot \rho \cdot dv$ ;  $g_y \cdot \rho \cdot dv$ ;  $g_z \cdot \rho \cdot dv$  ( $\rho$  — плотность газа).

Эти силы должны быть уравновешены разностью давлений, приходящихся на соответствующие грани параллелепипеда.

Для грани, перпендикулярной к оси  $x$ , равнодействующие сил давления равны:

$$\left[ p - \left( p + \frac{\partial p}{\partial x} dx \right) \right] dy \cdot dz = - \frac{\partial p}{\partial x} dV, \quad (53)$$

а сумма сил, действующих в направлении оси  $x$ ,

$$g_x \cdot \rho \cdot dV - \frac{\partial p}{\partial x} dV = 0. \quad (53a)$$

Условия равновесия для всех трех координат будут иметь следующий вид:

$$\left. \begin{aligned} g_x - \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial x} &= 0, \\ g_y - \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial y} &= 0, \\ g_z - \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial z} &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (54)$$

Если направить силу тяжести по координате  $z$ , то

$$\frac{\partial p}{\partial x} = 0; \quad \frac{\partial p}{\partial y} = 0 \quad \text{и} \quad \frac{\partial p}{\partial z} = -g\rho. \quad (55)$$

Интегрируя последнее уравнение, получим

$$p = -g\rho z + c_1 \quad \text{или} \quad p = -\gamma z + c_1. \quad (56)$$

Постоянную интегрирования  $c$  определяют из уравнения (56) в условиях сечения  $z_0$ , где газ соприкасается с атмосферой. Подставляя вместо  $z = z_0$  и  $p = p_0$ , получим

$$c = p_0 + \gamma z_0, \quad (57)$$

откуда окончательно будем иметь:

$$p = p_0 - \gamma(z - z_0). \quad (58)$$

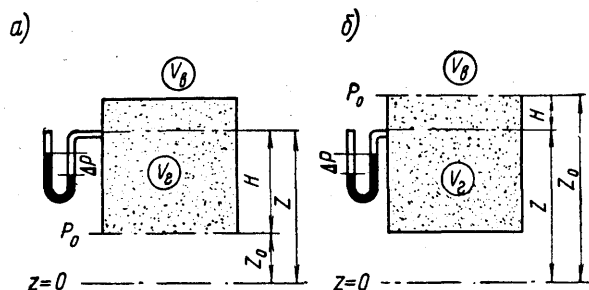


Рис. 17. Гидростатический напор легкого газа, окруженного более тяжелым газом

Далее можно рассматривать два случая (рис. 17).

В первом случае (рис. 17, а) газ соприкасается с воздухом внизу своего объема. Обозначая разность геометрических отметок через  $H = Z - Z_0$  ( $Z > Z_0$ ), получим

$$p = p_0 - \gamma H. \quad (59)$$

Если в сосуде на высоте  $H$  поставить U-образный манометр, то он покажет разность давлений  $\Delta p$  между сосудом и окружающим воздухом, равную:

$$\Delta p = (p_0 - \gamma_r H) - (p_0 - \gamma_b H) = H(\gamma_b - \gamma_r), \quad (60)$$

где  $\gamma_b$  и  $\gamma_r$  — соответственно объемные веса холодного воздуха и горячего газа.

Так как  $\gamma_b > \gamma_r$ , то  $\Delta p > 0$ , т. е. должно быть положительное давление. Этот вывод подтверждается практикой работы печей, в которых наблюдается увеличение давления газов от пода печи к своду.

Во втором случае (рис. 17, б) газ соприкасается с воздухом в верхней части занимаемого им объема. Как видно из рис. 17, б, при этом  $Z_0 > Z$  и  $H = Z_0 - Z$ .

Отсюда

$$p = p_0 + \gamma H. \quad (61)$$

Рассуждая аналогично предыдущему, будем иметь:

$$\Delta p = H(\gamma_r - \gamma_b) = -H(\gamma_b - \gamma_r). \quad (62)$$

Эта зависимость, как будет показано далее, лежит в основе работы дымовых труб.

## § 10. ЗАКОНЫ ДВИЖЕНИЯ ГАЗОВ

Выше были рассмотрены соотношения, связывающие между собой давление газа, его объемный вес (или плотность) и геометрическое положение исследуемой точки. Если газ находится в движении, то получаются более сложные взаимоотношения, в которые входит также скорость газа.

Знание основных законов движения газа необходимо для решения ряда практических вопросов.

С их помощью можно решить, какие силы действуют в движущемся газе, какова картина движения газов в различных частях печи, какое давление будет наблюдаться по ходу газов, какая мощность требуется для принудительного удаления газов и т. д.

Основные закономерности, определяющие условия движения газов, выражают уравнения непрерывности и уравнениями движения идеальной жидкости (уравнения Эйлера). Частным случаем применения этих уравнений является формула Бернулли.

Для вывода этих уравнений предварительно рассматривают движение несжимаемой, лишенной вязкости жидкости, которая не имеет потерь давления при движении (так называемая идеальная жидкость).

Для вывода уравнения непрерывности (сплошности потока) также выделим элементарный параллелепипед с ребрами  $dx$ ,  $dy$ ,  $dz$  и объемом  $dV$ .

Рассмотрим движение жидкости в плоскости, перпендикулярной к оси  $x$  (рис. 18).

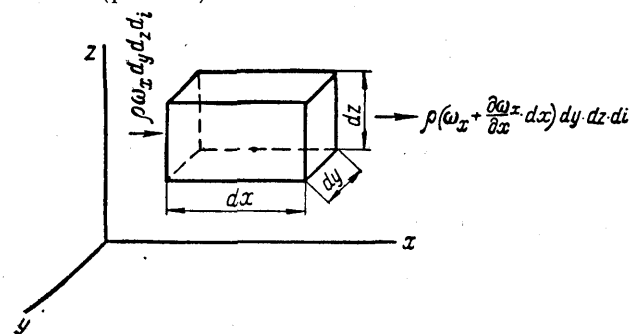


Рис. 18. Изменение массы в объеме элементарного параллелепипеда

Количество жидкости, входящей слева в грань  $dy$ ,  $dz$  за время  $dt$  со скоростью  $\omega_x$ , равно  $\rho \cdot \omega_x \cdot dy \cdot dz \cdot dt$ .

Количество жидкости, вытекающее из правой грани, равно

$$\rho \left( w_x + \frac{\partial w_x}{\partial x} dx \right) dy \cdot dz \cdot d\tau.$$

Изменение массы жидкости, вытекающей из параллелепипеда по направлению оси  $x$  равно

$$dM_x = \rho \frac{\partial w_x}{\partial x} dV \cdot d\tau.$$

Произведя такие же подсчеты для всех осей координат, будем иметь:

$$\left. \begin{aligned} dM_x &= \rho \frac{\partial w_x}{\partial x} dV \cdot d\tau, \\ dM_y &= \rho \frac{\partial w_y}{\partial y} dV \cdot d\tau, \\ dM_z &= \rho \frac{\partial w_z}{\partial z} dV \cdot d\tau. \end{aligned} \right\} \quad (63)$$

Изменение массы вытекающей жидкости равно сумме полученных значений:

$$dM = \rho \left( \frac{\partial w_x}{\partial x} + \frac{\partial w_y}{\partial y} + \frac{\partial w_z}{\partial z} \right) dV \cdot d\tau. \quad (64).$$

При установившемся режиме  $\rho = \text{const}$  и  $dM = 0$

$$\frac{\partial w_x}{\partial x} + \frac{\partial w_y}{\partial y} + \frac{\partial w_z}{\partial z} = 0. \quad (65)$$

Это и есть дифференциальное уравнение непрерывности (сплошности) потока для несжимаемых жидкостей.

При установившемся однородном движении несжимаемой жидкости по какому-нибудь каналу сохраняется принцип равенства объемов втекающей и вытекающей из него жидкости.

За промежуток времени  $\Delta t$  объем жидкости  $v_1$ , входящей в канал, равен  $v_1 = F_1 \cdot w_1 \cdot \Delta t$  ( $F_1$  — площадь поперечного сечения на входе и  $w_1$  — средняя скорость жидкости в этом сечении). Соответственно объем вытекающей жидкости  $v_2 = F_2 \cdot w_2 \cdot \Delta t$ . При установившемся режиме  $V_1 = V_2$  и

$$F_1 w_1 = F_2 w_2. \quad (66)$$

Из уравнения (66) следует, что

$$\frac{F_1}{F_2} = \frac{w_2}{w_1}, \quad (67)$$

т. е. при постоянном объемном расходе средние скорости жидкости обратно пропорциональны площадям живых сечений потока, соответствующих этим скоростям. Формулы (66) и (67) являются выражением закона непрерывности в конечной форме.

При движении сжимаемой жидкости (газа) с  $\rho \neq \text{const}$  принцип равенства входящего и выходящего объемов жидкости заменяют принципом равенства входящей и выходящей масс.

Дифференциальное уравнение непрерывности будет иметь при этом следующий вид (дано без вывода):

$$\frac{\partial \rho}{\partial \tau} + \frac{\partial (\rho w_x)}{\partial x} + \frac{\partial (\rho w_y)}{\partial y} + \frac{\partial (\rho w_z)}{\partial z} = 0. \quad (68)$$

В конечной форме аналогично формуле (66) его можно записать так:

$$F_1 w_1 \gamma_1 = F_2 w_2 \gamma_2. \quad (69)$$

Уравнение движения идеальной жидкости выводят аналогично уравнениям равновесия (54). Выведем уравнение движения для одномерного течения идеальной жидкости вдоль оси  $x$ .

Рассмотрим, как и ранее, действие сил тяжести, давления и инерции на элементарный параллелепипед (силы вязкости в идеальной жидкости отсутствуют).

Проекция силы тяжести на оси  $x$  —  $g_x \cdot \rho \cdot dV$ .

Проекция силы давления на ось  $x$  —  $\frac{\partial p}{\partial x} \cdot dV$ .

Проекция сил инерции на ось  $x$  —  $\frac{\partial w_x}{\partial \tau} \cdot \rho \cdot dV$

(произведение массы элемента  $\rho \cdot dV$  на ускорение  $\frac{\partial w_x}{\partial \tau}$ ).

Уравнение движения получим, если к силам тяжести и давления, действующим на элементарный параллелепипед, прибавим силы инерции с обратным знаком:

$$g_x \cdot \rho \cdot dV - \frac{\partial p}{\partial x} dV - \frac{\partial w_x}{\partial \tau} \rho \cdot dV = 0.$$

Для трехмерного потока при таких же преобразованиях получим

$$\left. \begin{aligned} g_x - \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial x} - \frac{\partial w_x}{\partial \tau} &= 0, \\ g_y - \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial y} - \frac{\partial w_y}{\partial \tau} &= 0, \\ g_z - \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial z} - \frac{\partial w_z}{\partial \tau} &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (70)$$

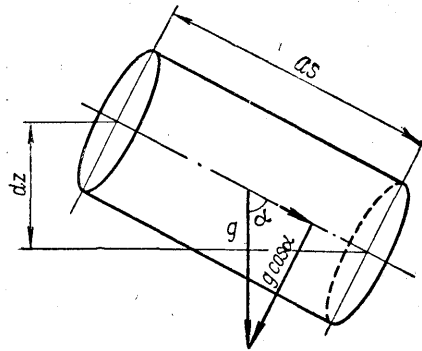


Рис. 19. Схема к выводу уравнения Бернулли (проекция ускорения силы тяжести в элементарной струйке)

ние Бернулли, к выводу которого переходим.

## УРАВНЕНИЕ БЕРНУЛЛИ

Для вывода уравнения Бернулли рассмотрим элементарную струйку капельной идеальной жидкости (рис. 19).

Воспользуемся выведенными уравнениями Эйлера. Уравнение Эйлера относительно оси  $x$  будет иметь следующий вид:

$$g_x - \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial x} - \frac{\partial w_x}{\partial \tau} = 0. \quad (71)$$

Для установившегося потока  $g_x$  — проекция ускорения силы тяжести на направление касательной к линии тока. В нашем случае (см. рис. 19)  $g_x = g \cos \alpha$ ;

$$\cos \alpha = - \frac{\partial z}{\partial s}; \quad \frac{\partial w_x}{\partial \tau} = w \frac{\partial w}{\partial s} \text{ и } \frac{\partial p}{\partial x} = \frac{\partial p}{\partial s}.$$

Подставляя указанные значения, получим

$$g \frac{\partial z}{\partial s} + \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial s} + w \frac{\partial w}{\partial s} = 0. \quad (72)$$

Интегрируя формулу (72), получим исходное выражение закона Бернулли:

$$gz + \frac{1}{\rho} p + \frac{w^2}{2} = \text{const}. \quad (73)$$

Эти уравнения называются уравнениями Л. Эйлера. Уравнение непрерывности и уравнение Эйлера являются основными в механике газов. Совместное решение этих уравнений дает бесконечное количество корней. Для однозначного решения необходимо добавить уравнения, описывающие краевые условия. До сих пор удалось получить точные решения только для небольшого количества относительно простых случаев. Одним из наиболее важных случаев является уравнение

Разделив все члены уравнения на  $g$ , получим обычный его вид:

$$z + \frac{p}{\gamma} + \frac{w^2}{2g} = \text{const}^*. \quad (73a)$$

Все члены уравнения (73a) имеют размерность  $[м]$  и следующие названия:

$z = h_r$  — геометрический напор;

$\frac{p}{\gamma} = h_p$  — пьезометрический (или статический) напор;

$\frac{w^2}{2g} = h_d$  — динамический, или скоростной, напор.

В уравнениях (73) и (73a) каждый из членов выражает энергию, приходящуюся на 1 кг газа или жидкости. Член  $h_r$  является удельной потенциальной энергией положения одного килограмма жидкости (или газа), член  $h_p$  — потенциальной энергией давления и член  $h_d = \frac{w^2}{2g}$  — кинетической энергией единицы веса. Сумма всех членов является полной удельной энергией струи жидкости. Отсюда следует, что уравнение Бернулли является одним из видов закона сохранения энергии и формулируется так: *в случае течения идеальной жидкости (или газа) сумма геометрического, пьезометрического и скоростного напоров для всех сечений данного канала есть величина постоянная.*

Если величины, входящие в уравнение Бернулли, отнести не к 1 кг, а к 1  $м^3$ , т. е. умножить каждый его член на удельный вес  $\gamma$  (в  $н/м^3$  или  $кг/м^3$ ), то каждый из членов уравнения будет выражать энергию 1  $м^3$  газа или жидкости и размерность его будет  $[н/м^2]$  или  $[кг/м^2]$ . Уравнение при этом примет вид:

$$z\gamma + p + \frac{w^2}{2g}\gamma = \text{const}, \quad (74)$$

где  $z\gamma = \delta_r$  — давление, соответствующее геометрическому напору;

$p = \delta_p$  — пьезометрическое, или статическое, давление;

$\frac{w^2}{2g}\gamma = \delta_d$  — динамическое давление, или давление, необходимое для создания скорости  $w$ .

\* В системе СИ  $p$  имеет размерность  $\left[\frac{н}{м^2}\right]$  и  $\gamma = \left[\frac{н}{м^3}\right]$ , в технической системе единиц  $p$  имеет размерность  $\left[\frac{кг}{м^2}\right]$  и  $\gamma = \left[\frac{кг}{м^3}\right]$ .

Уравнение Бернулли было выведено для элементарной струйки идеальной жидкости. Этот вывод можно использовать и для всего сечения потока, принимая вместо величины  $w$  среднюю скорость потока  $w_{\text{ср}} = \frac{V}{F}$ .

При этом уравнение Бернулли примет следующий вид:

$$z + \frac{p}{\gamma} + \alpha \frac{w_{\text{ср}}^2}{2g} = \text{const.} \quad (736)$$

Коэффициент  $\alpha$  представляет собой отношение фактической кинетической энергии потока к кинетической энергии, подсчитанной по средней скорости.

При равномерном турбулентном движении потока в каналах небольшого сечения коэффициент  $\alpha \approx 1,1$ . Для ламинарного потока, определение которого дано ниже,  $\alpha = 2,0$ .

При движении реальной вязкой жидкости равенство составляющих уравнения Бернулли между двумя последовательными сечениями нарушается, так как часть энергии тратится на преодоление потерь на трение и в местных сопротивлениях.

В этом случае в уравнение Бернулли добавляют дополнительный член  $h_{\text{пот}}$ , которым учитывают потерю напора на участке между двумя сечениями:

$$z_1 + \frac{p_1}{\gamma} + \frac{w_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\gamma} + \frac{w_2^2}{2g} + h_{\text{пот}} \quad (75)$$

или

$$h_{r_1} + h_{n_1} + h_{d_1} = h_{r_2} + h_{n_2} + h_{d_2} + h_{\text{пот}}. \quad (75a)$$

При практическом использовании закона Бернулли для подсчетов, связанных с движением сжимаемых жидкостей (газов), необходимо подсчитывать объемный вес газа в каждом сечении, учитывая изменение давления, а для печей — особенно изменение температуры.

## § 11. ВИДЫ И РЕЖИМЫ ДВИЖЕНИЯ ЖИДКОСТЕЙ И ГАЗОВ

Изучение характера движения газов и жидкостей в замкнутых каналах показало, что существуют два режима движения: ламинарный и турбулентный. Эти режимы отличаются как по структуре потока, так и по закономерностям, определяющим гид-

равлическое сопротивление и теплопередачу от жидкости к стенке.

При ламинарном движении силы сцепления между частицами жидкости преобладают над скоростными, инерционными. Наблюдения за движением подкрашенной жидкости в трубах показывают, что жидкость течет параллельными струйками, не смешивающимися между собой.

В практике работы печей ламинарный режим встречается редко. В частности, он наблюдается в трубопроводах небольшого диаметра при течении жидкостей повышенной вязкости, например в мазутопроводах к форсункам печей.

Турбулентный режим характеризуется неупорядоченным, хаотическим движением частиц. Каждая частица, двигаясь по общему направлению, совершает дополнительные вихревые движения по сложным траекториям. При замерах параметров регулярного потока (скорость, температура и давление) в отдельных точках особо точными приборами можно наблюдать систематические изменения этих параметров вокруг некоторого среднего значения (рис. 20). Средние значения фиксируют приборы обычного типа, обладающие большей инерционностью.

При ламинарном режиме перенос тепла от потока к стенке осуществляется за счет теплопроводности и диффузии частиц из одной струи в другую.

Теплопередача при турбулентном режиме происходит за счет макроскопического (молярного) переноса тепла отдельными вихревыми скоплениями жидкости.

Подробные исследования показали, что при турбулентном движении жидкостей по трубам и каналам у стенок образуется тонкая пленка с ламинарным движением жидкости. Толщина этой ламинарной пленки, распределение скоростей и температур в ней значительно влияют на процесс теплопередачи и гидравлического сопротивления при движении жидкости.

О. Рейнольдс впервые обнаружил, что переход ламинарного движения к турбулентному происходит при некотором (критиче-

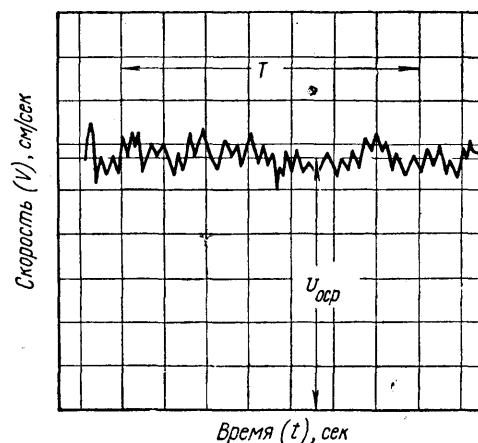


Рис. 20. Пульсация осевой скорости в турбулентном потоке



ском) значении критерия подобия  $Re$ , называемого критерием Рейнольдса. Критерий  $Re$  для круглых труб находят из следующего выражения:

$$Re = \frac{wD}{\nu}, \quad (76)$$

где  $w$  — средняя скорость жидкости, м/сек;

$D$  — диаметр трубопровода, м;

$\nu$  — коэффициент кинематической вязкости, м<sup>2</sup>/сек.

В том случае, если трубопровод не имеет круглого сечения, в качестве определяющего размера вместо  $D$  берут величину гидравлического или эквивалентного диаметра  $D_g$ :

$$D_g = \frac{4f}{u} [м], \quad (77)$$

где  $f$  — площадь поперечного сечения, м<sup>2</sup>;

$u$  — периметр сечения, м.

Для круглых труб критическое значение числа Рейнольдса колеблется в пределах 2000—2500. При  $Re < Re_{кр}$  наблюдается устойчивый ламинарный режим. При  $Re > Re_{кр}$  возникает турбулентный режим движения жидкости.

В пределах от  $Re \approx 2000$  до  $Re \approx 5000$ —7000 (для круглых труб) находится так называемый переходный режим.

При переходном режиме приводимые ниже значения коэффициентов местных сопротивлений неустойчивы и точность гидравлических расчетов соответственно снижается.

Переходный режим необходимо учитывать также при расчетах теплоотдачи.

Для прямых квадратных и прямоугольных труб величина  $Re_{кр}$  близка к значениям  $Re_{кр}$  для круглых труб.

Необходимо отметить, что в ряде случаев величина критерия  $Re_{кр}$  может иметь другие значения.

На величину  $Re_{кр}$  влияет, например, форма потока (в расширяющихся каналах  $Re_{кр}$  уменьшается), форма входа в трубу (при хорошем округлении ввода  $Re_{кр} = 4000$ ), длина прямолинейного участка и др.

При ламинарном движении критерий Рейнольдса не сказывается на распределении скоростей по сечению трубы. Теоретические расчеты, подтвержденные экспериментально, показывают, что при ламинарном движении

$$\frac{w}{w_{\max}} = 1 - \frac{r^2}{R^2}, \quad (78)$$

где  $w$  — скорость в данной точке сечения;

$r$  — расстояние этой точки до центра трубы;

$w_{\max}$  — максимальная скорость в центре трубы;

$R$  — радиус трубы.

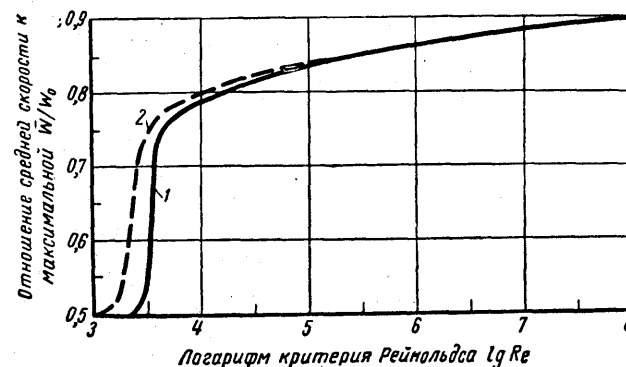


Рис. 21. Отношение средней скорости к максимальной в зависимости от критерия Рейнольдса  $\frac{w_{\text{ср}}}{w_{\text{макс}}} = f(Re)$  при движении жидкости (или газа) в

гладкой трубе:

$$1 - Re = w_0 d / \nu; \quad 2 - Re = w d / \nu; \\ w / w_0 = f(Re)$$

Интегрируя это выражение, получим постоянное отношение средней скорости по сечению к максимальной

$$\frac{w_{\text{ср}}}{w_{\text{макс}}} = 0,5 = \text{const.} \quad (78a)$$

При  $Re > Re_{кр}$  это отношение быстро возрастает и доходит до 0,8—0,9. На рис. 21 выражена зависимость  $\frac{w_{\text{ср}}}{w_{\text{макс}}} = f(Re)$  для гладких труб, полученная экспериментально.

Необходимо отметить, однако, что на практике многие факторы могут изменять это отношение в значительных пределах.

Критерий  $Re$  выражает меру отношения инерционных сил в потоке к вязкостным силам и является одной из наиболее важных величин, характеризующих условия движения жидкости и теплопередачи.

## § 12. РАСЧЕТ ДВИЖЕНИЯ ГАЗОВ В ПЕЧНОЙ УСТАНОВКЕ

Пользуясь уравнением Бернулли, можно произвести расчет движения газа в печной установке. Обычно в задачу расчета входит определение необходимого разрежения, создаваемого

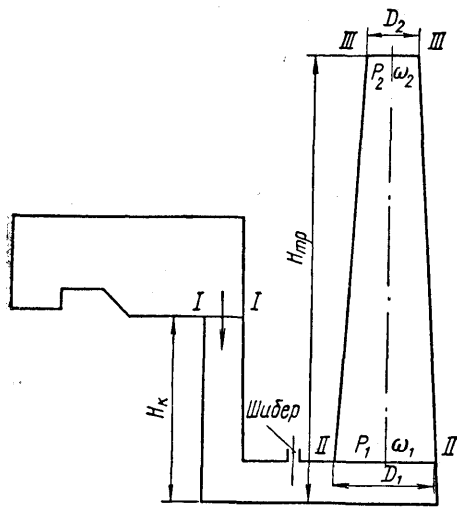


Рис. 22. Схема к расчету движения газов в печи

В газовых и мазутных печах необходимого положительного давления достигают за счет подачи воздуха, мазута или газа под давлением через форсунку или горелку.

При удалении газов из печи по ходу движения газов на участке от I—I до II—II (см. рис. 22) создаются следующие потери давления: потери на опускание газов в отводящем вертикальном канале —  $H_k(\gamma_v - \gamma_r)$ ; потери на трение, повороты и другие сопротивления в соединительных газоходах до трубы, возникающие при движении газов по тракту,  $\delta_{тр}$ ,  $\delta_{пов}$ ; потери в выходном шибере —  $\delta_{ш}$  и т. д.

Разрежение, создаваемое дымососом или дымовой трубой, затрачивается в основном на преодоление указанных сопротивлений

$$\Delta p_1 = h_k(\gamma_v - \gamma_r) + \delta_{тр} + \delta_{пов} + \delta_{ш}. \quad (79)$$

Изменяя величину открытия шибера, добиваются того, чтобы установилось необходимое положительное давление на поду печи.

Подробные данные о расчете тяги, создаваемой дымовой трубой, а также о расчете потерь давления по тракту приведены ниже.

При расчете необходимо учитывать, что удельные веса газов меняются с потерей температуры газов при движении по тракту.

дымовой трубой или дымососом. Давление на поду печи при этом должно быть нулевым или слабоположительным  $\sim 0 \div 5 \text{ н/м}^2$ .

Рассмотрим особенности движения газов на примере печи, сжигающей жидкое топливо (мазут) с удалением газов через дымовую трубу (рис. 22).

При малом пути и небольшой скорости движения газов в рабочем пространстве движение газов в самой печи можно не рассчитывать. Исходя из этого, подсчитывают сопротивления от рабочей камеры до основания дымовой трубы или до всасывающей трубы дымососа.

Изменение удельного веса в этом случае подсчитывают по формуле (47).

Существует несколько способов удаления продуктов горения из печи.

Из нагревательных печей малой производительности дымовые газы отводят из печи через рабочие окна в помещение цеха. Основной побудительной силой является в этом случае давление, создаваемое при принудительной подаче воздуха для горения и топлива. Разновидностью этого способа является отвод газов вверх через вертикальный дымоход, в котором устанавливают рекуператор.

При выпуске продуктов сгорания в цех необходима установка специальных зонтов, связанных с системой вытяжной вентиляции. Применение непосредственного выпуска значительно удешевляет печную установку, но повышает требования к вентиляции цеха.

Большинство более крупных нагревательных печей работает с дымовыми трубами (часто общей трубой для группы печей), которые связаны с печью соединительными газоходами (боровами).

Для определения разрежения, создаваемого дымовой трубой, используют уравнение Бернулли. Расчет ведут для сечения II—II у основания трубы и сечения III—III у ее устья (см. рис. 22):

$$H_{тр}(\gamma_v - \gamma_r) + p_1 + \frac{w_1^2}{2g} \gamma_r = p_0 + \frac{w_2^2}{2g} \gamma_r + \delta_{тр}, \quad (80)$$

где

$p_1$  — давление у основания трубы,  $\text{н/м}^2$ ;

$p_0$  — атмосферное давление,  $\text{н/м}^2$ ;

$w_1$  и  $w_2$  — скорости газов у основания и устья трубы,  $\text{м/сек}$ ;

$\gamma_v$  и  $\gamma_r$  — удельные веса воздуха и отходящих газов,  $\text{н/м}^3$ ;

$H_{тр}$  — высота дымовой трубы,  $\text{м}$ ;

$\delta_{тр}$  — потеря давления от трения газов при движении их в дымовой трубе.

Отсюда разрежение, создаваемое дымовой трубой у основания:

$$p_0 - p_1 = \Delta p_1 = H_{тр}(\gamma_v - \gamma_r) - \frac{w_2^2 - w_1^2}{2g} \gamma_r - \delta_{тр}. \quad (81)$$

Плотность (удельный вес) дымовых газов подсчитывают по формуле (47)

$$\rho_r = \rho_0 \frac{273}{T} [\text{кг/м}^3]$$

или

$$\gamma_r = \gamma_0 \frac{273}{273 + t_{cp}} [\text{н/м}^3],$$

где  $\rho_0 = 1,3 \text{ кг/м}^3$ ; $\gamma_0 = 13 \text{ н/м}^3$ ; $t_{cp}$  — средняя температура газов в трубе, °С.

Средняя температура газов в трубе

$$t_{cp} = \frac{t_1 + (t_1 + CH_{тр})}{2}, \quad (82)$$

где  $t_1$  — температура уходящих газов у основания трубы, подсчитываемая с учетом температурных потерь в газопроводах; $H_{тр}$  — высота трубы, м; $C = (1,5 + 2,5) \text{ град/м}$  для кирпичных труб или $C = (3 + 4) \text{ град/м}$  для металлических труб.При расчете по формуле (85) для предварительного определения высоты пользуются зависимостью  $H_{тр} = (25 + 30) D_1$ .

Удельный вес воздуха подсчитывают таким же образом по формуле (47) по температуре его в летнее время года, т. е. в худших условиях. Это создает дополнительный запас тяги при работе в зимнее время.

Скорость дымовых газов в устье трубы принимают равной  $w_0 = 2,5 - 4 \text{ м/сек}$  при н. ф. у. [для использования формулы (81) необходимо сделать соответствующий пересчет на фактическую температуру].Скорость у основания трубы подсчитывают по диаметру трубы  $D_1$ .У кирпичных труб обычно  $D_1 = 1,5 D_2$ , причем  $D_1$  делают не меньше 800 мм.

Металлические трубы часто выполняют цилиндрическими. Потери напора в трубе определяют обычным способом:

$$\delta_{тр} = \frac{\lambda H_{тр}}{D_{cp}} \cdot \frac{w_{cp}^2}{2g} \gamma_{cp}, \quad (83)$$

где  $w_{cp}$  и  $\gamma_{cp}$  подсчитывают по средней температуре газов и среднему диаметру трубы.

Высоту дымовой трубы, определенную по уравнению (81), увеличивают на 15—25% для создания необходимого запаса и покрытия дополнительных потерь, неучтенных расчетом.

В том случае, когда дымовая труба обслуживает несколько печей, расчет ведут на суммарное количество дымовых газов и разрежение по наибольшему сопротивлению, полученному при расчете всех газовых трактов.

При обслуживании одной трубой нескольких печных агрегатов следует брать наибольший запас, так как совместная работа создает ряд дополнительных неблагоприятных условий (подсосы от неработающих печей, взаимное влияние нескольких подводимых потоков и пр.).

Приведенный расчет движения газов дает возможность только определить необходимые затраты давления (общие и по отдельным участкам движения), т. е. рассчитать энергию, расходуемую в процессе.

Однако этот метод не может дать полной картины движения газов, т. е. характер и размеры вихревых потоков в местах поворота, в суженных и расширенных каналах, характер вихрей, создаваемых форсунками или горелками и т. д. Последние вопросы решаются обычно моделированием движения газов, на моделях, рассчитанных с помощью теории подобия. В последнее время делаются попытки математически решить задачу о движении вязкой жидкости с учетом возникающих вихрей.

Крупные печи высокой производительности работают иногда с отводом газов дымососами. Чаще всего это наблюдается при установке запечных котлов-утилизаторов, создающих значительные дополнительные сопротивления.

Основное затруднение при переводе печей на искусственную тягу заключается в том, что вентиляторы и дымососы обычных конструкций с лопатками из обычной углеродистой стали даже при водяном охлаждении подшипников и вала не могут работать при температуре газов выше  $\sim 250^\circ \text{С}$ .

При больших температурах отходящих газов следует устанавливать котлы-утилизаторы или другие теплоиспользующие устройства, снижающие температуру дыма. В тех случаях, когда это невозможно, применяют дымососы с лопатками из жароупорной стали, работающие при температуре газов до  $400 - 600^\circ \text{С}$ .

Часто в качестве дымососов за печами используют стандартные центробежные вентиляторы, так как специальные дымососы, предназначенные для котельных установок, имеют очень большую производительность.

При выборе по справочникам вентилятора для использования в качестве дымососа необходимо руководствоваться следующими указаниями:

1. Производительность должна равняться

$$V_t = V_0 \frac{T_r}{273} [\text{м}^3/\text{сек}], \quad (84)$$

где  $V_0$  — количество дымовых газов,  $\text{м}^3/\text{сек}$  при н. ф. у.,  
 $T_r$  — температура газов перед дымососом, °С.

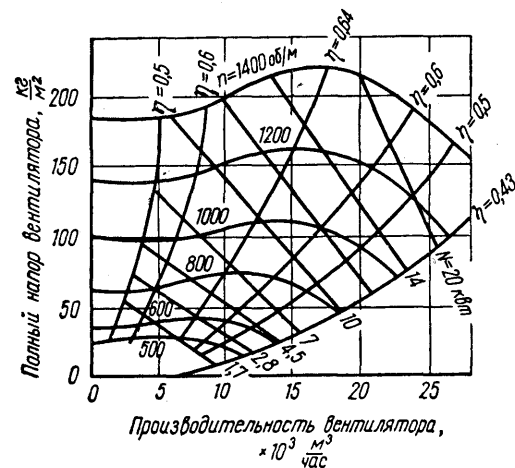


Рис. 23. Характеристика центробежного вентилятора

2. Напор, создаваемый вентилятором, в справочниках дан при плотности воздуха  $1,2 \text{ кг/м}^3$ . При меньшем объемном весе он снижается пропорционально фактической плотности. Расчетный напор, создаваемый вентилятором при  $\rho = 1,2 \text{ кг/м}^3$ , который должен быть найден по справочнику, равен:

$$H_{\text{расч}} = H \frac{1,2}{\rho_t} [\text{н/м}^2], \quad (85)$$

где  $\rho_t$  — плотность при данной температуре газов.

3. Общий напор, развиваемый вентилятором  $H_{\text{общ}}$ , равен:

$$H_{\text{общ}} \approx H_{\text{всас}} + H_{\text{нагн}}, \quad (86)$$

где  $H_{\text{всас}}$  и  $H_{\text{нагн}}$  — разрежение во всасывающей трубе и давление в нагнетательной трубе вентилятора. Так как в справочниках дана величина общего напора, то во избежание ошибок величину потерь давления во всасывающей линии нужно предварительно подсчитать.

4. При подборе вентилятора необходимо помнить, что создаваемый им напор не постоянен и может значительно меняться в зависимости от его производительности.

Поэтому следует проверить напор, создаваемый вентилятором при разных вариантах работы, по его характеристике (рис. 23).

В тех случаях, когда температура уходящих газов превышает

ет  $250^\circ \text{С}$ , можно применять искусственную тягу непрямого действия.

Сущность ее заключается в том, что отходящие газы эжектируются вентиляторным или компрессорным воздухом, а также перегретым паром. Подобные данные по подсчету и принципу действия этих, так называемых струйных, приборов приведены далее.

### § 13. РАСЧЕТ СОПРОТИВЛЕНИЙ ПРИ ДВИЖЕНИИ ГАЗОВ

Расчет движения газов в печи сводится в основном к подсчету сопротивлений движению газов по всему тракту.

Различают следующие виды сопротивлений при движении газов в печах: 1) гидростатические сопротивления на вертикальных участках пути; 2) сопротивления трения на прямолинейных участках; 3) местные сопротивления (потери давления на поворотах, в сужениях и расширениях, шибах, заслонках и т. д.).

Гидростатические сопротивления определяют по формуле

$$\delta_{г.с} = H(\gamma_v - \gamma_t) [\text{н/м}^2], \quad (87)$$

где  $H$  — высота канала, м;

$\gamma_v$  — удельный вес окружающего воздуха,  $\text{н/м}^3$ ;

$\gamma_t$  — удельный вес газа при средней высоте канала и данной температуре,  $\text{н/м}^3$ .

Если газы движутся по каналу вверх, то величину гидростатического давления прибавляют к силам, совершающим полезную работу. Это обстоятельство позволяет небольшим печам работать без дымовых труб. Удаление газов в таких печах происходит за счет подъемной силы (гидростатического давления) продуктов горения в вертикальных отводящих каналах.

Потери давления на трение по длине прямолинейного участка равны разности удельной потенциальной энергии в начальном и конечном сечениях, получающейся вследствие трения о стенки трубопровода. Как показывает опыт, эти потери прямо пропорциональны длине участка  $L$ , скоростному напору  $\frac{w^2}{2g}$  и объемному весу  $\gamma$  и обратно пропорциональны гидравлическому диаметру  $D_r$ .

Математически это выражается формулой Дарси:

$$\delta_{тр} = \frac{\lambda L}{D_r} \cdot \frac{w^2}{2g} \gamma [\text{н/м}^2]. \quad (88)$$

При подсчете потерь давления в печах этой формуле часто придают следующий вид:

$$\delta_{тр} = \frac{\lambda L}{D_r} \cdot \frac{w_0^2}{2g} \cdot \gamma_0 \cdot \frac{T}{273} [\text{н/м}^2]. \quad (88a)$$

Коэффициент пропорциональности  $\lambda$ , называемый коэффициентом трения, зависит в известных пределах от критерия Рейнольдса ( $Re$ ) и шероховатости стенок канала.

Наиболее хорошо изучена величина коэффициента  $\lambda$  в каналах с металлическими стенками, потери на трение в кирпичных каналах менее изучены.

При ламинарном движении коэффициент трения  $\lambda$  не зависит от шероховатости стенок. Его определяют по формуле

$$\lambda = \frac{A}{Re}. \quad (89)$$

Коэффициент  $A$  находят из специальных справочников (например, для круглых труб  $A=64$ , для квадратного сечения —  $A=57$  и т. д.).

Ламинарное движение в газоходах печей наблюдается редко.

Коэффициент сопротивления гладких труб и каналов при турбулентном движении определяют по следующим формулам: при  $Re=3000 \div 100\,000$

$$\lambda = \frac{0,316}{\sqrt[4]{Re}} \quad (\text{формула Блазиуса}); \quad (90)$$

при  $Re > 10\,000$

$$\lambda = \frac{1}{(1,8 \lg Re - 1,5)^2} \quad (\text{формула П. К. Конакова}). \quad (91)$$

При турбулентном движении в практических условиях коэффициент трения зависит от критерия  $Re$  и относительной шероховатости стенки. Относительная шероховатость стенки равна  $\frac{\Delta}{R}$ , где  $\Delta$  средняя высота выступов (абсолютная шероховатость стенки),  $R$  — радиус трубы.

При больших величинах критерия  $Re$  зависимость  $\lambda = f\left(Re, \frac{\Delta}{R}\right)$  превращается в зависимость  $\lambda = f\left(\frac{\Delta}{R}\right)$ , т. е. влияние критерия  $Re$  перестает сказываться.

В этой так называемой квадратичной зоне потери давления на трение строго пропорциональны квадрату скорости.

Величину абсолютной шероховатости труб и каналов можно взять из табл. 18.

Таблица 18

Характеристика шероховатости труб и каналов

Материал и состояние стенки	Высота выступов шероховатости $\Delta$ , мм
Стальные трубы новые . . . . .	0,20—0,25
Стальные трубы с коррозией . . . . .	0,40—0,50
Бетонные и кирпичные каналы в хорошем состоянии . . . . .	2,0—4,0
Бетонные и кирпичные каналы, требующие ремонта . . . . .	5,0—10,0

Для стальных труб, когда  $Re > 4000$  при определении коэффициента  $\lambda$  следует пользоваться графиком, предложенным Г. А. Муриным (рис. 24). Для кирпичных каналов можно использовать результаты опытов Г. Никурадзе, приведенные на рис. 25.

Для грубых предварительных подсчетов можно принимать следующие значения коэффициентов трения: для кирпичных стенок  $\lambda \approx 0,03—0,05$ ; для металлических стенок  $\lambda \approx 0,02—0,04$ .

При внезапном изменении сечения или направления потока отдельные струи не сразу меняют свое направление и сечение. При этом образуются мертвые пространства, заполненные вихрями.

Потери энергии, связанные с образованием этих вихрей, называются потерями в местном сопротивлении.

Существует очень много видов местных сопротивлений. К ним относятся внезапные расширения и сужения, повороты и тройники, запорные приспособления разного рода и многие другие.

Потери в местном сопротивлении определяют по формуле

$$\delta_{мест} = \xi \frac{w_0^2}{2g} \cdot \gamma_0 \cdot \frac{273 + t}{273} [\text{н/м}^2]. \quad (92)$$

Величины коэффициентов местного сопротивления  $\xi$  зависят от следующих факторов: 1) вида местного сопротивления; 2) геометрических размеров и степени открытия (при запорных органах); 3) критерия  $Re$  (в некоторых случаях).

Коэффициенты местных сопротивлений определяют экспериментально. Величины их приведены в специальных справочниках.

В табл. 19 и 20 приведены значения коэффициентов местного сопротивления для наиболее характерных случаев.

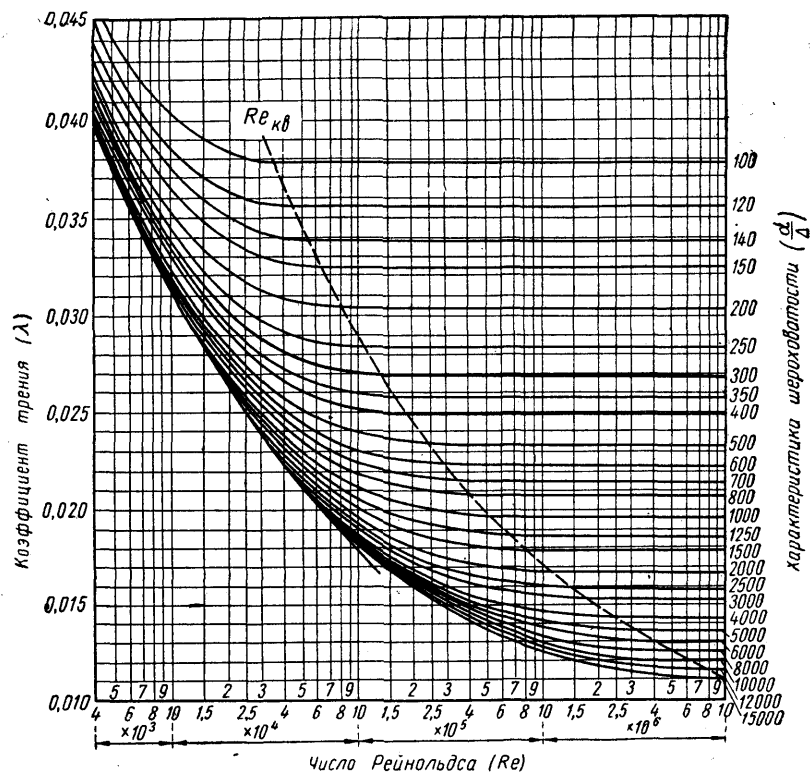


Рис. 24. Зависимость коэффициента трения ( $\lambda$ ) от критерия Рейнольдса ( $Re$ ) и относительной шероховатости для стальных труб.  $Re_{кр}$  — значение критерия Рейнольдса, соответствующее режиму автомодельности

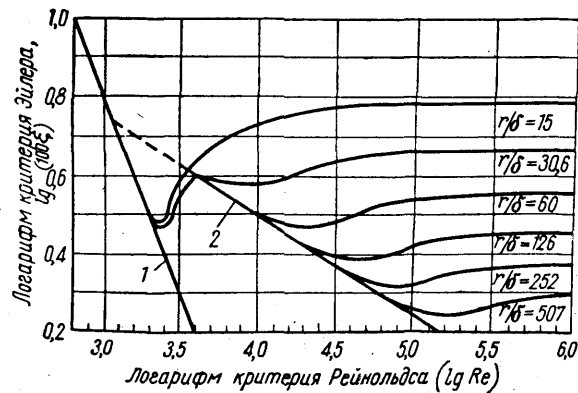


Рис. 25. Зависимость  $\lambda = f(Re; \frac{r}{\delta})$  для шероховатых труб, по опытам Никурадзе:

1 — кривая, выражающая закон Пуазейля; 2 — кривая, выражающая закон Блазиуса

1. Внезапное расширение сечения (рис. 26, а).  $\xi = \left(1 - \frac{F_1}{F_2}\right)^2$ , причем скорость рассчитывают по площади более узкого (подводящего) сечения.

Величина коэффициента  $\xi$  зависит от  $\frac{F_1}{F_2}$  следующим образом.

Таблица 19

Значения коэффициента $\xi$							
$\frac{F_1}{F_2}$	До 0,01	0,1	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0
$\xi$	1,0	0,81	0,64	0,36	0,16	0,04	0

При  $\frac{E_1}{F_2} = 0$   $\xi = 1,0$ . Это соответствует случаю потерь энергии при выходе потока из трубы в достаточно большой резервуар.

2. Внезапное сужение сечения (рис. 26, б). Коэффициент местного сопротивления  $\xi$  зависит от отношения  $\frac{F_2}{F_1}$  (скорость подсчитывается по узкому сечению).

Таблица 20

Коэффициент $\xi$							
$\frac{F_2}{F_1}$	0—0,01	0,1	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0
$\xi$	0,5	0,47	0,45	0,38	0,25	0,15	0

При постепенном уменьшении сечения (рис. 26, в) коэффициенты, полученные из приведенной таблицы, умножают на коэффициент 0,1.

В предельном случае при входе в отверстие с острыми краями из бесконечно большого сечения при  $\frac{F_1}{F_2} = 0$   $\xi = 0,5$ . При закругленных краях отверстия этот коэффициент уменьшается до  $\xi = 0,02—0,12$ . При коническом раструбе на входе  $\xi = 0,15$ . Если труба на входе не находится на уровне стенки, то  $\xi = 0,55—0,95$  (рис. 26, г).

Если имеется несколько рядом расположенных входных отверстий (вход в систему каналов) (рис. 26, д), то принимают следующие значения коэффициентов местных сопротивлений:

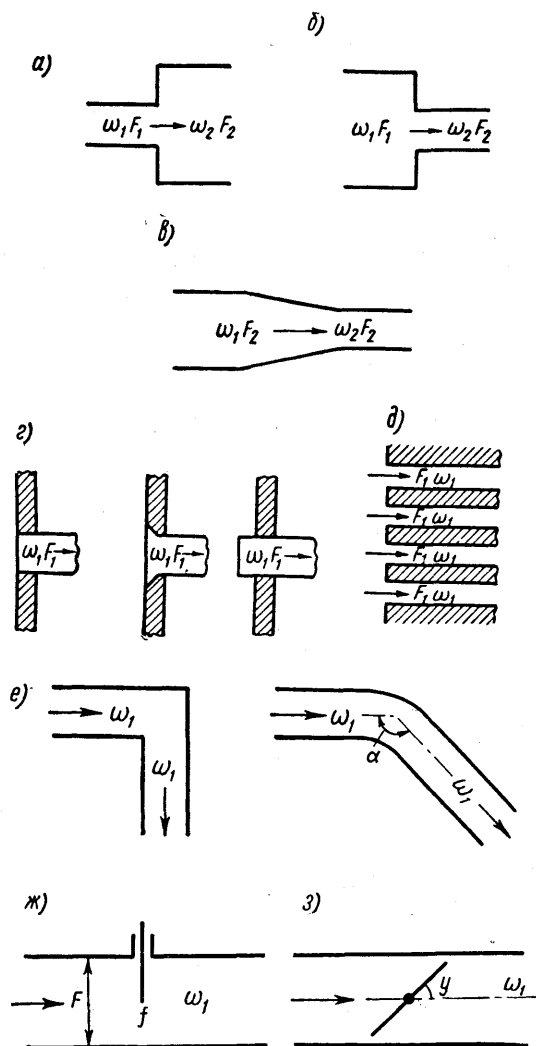


Рис. 26. Виды местных сопротивлений: а — внезапное расширение; б — внезапное сужение; в — конфузур в прямом канале; г — вход в отверстие из бесконечно большого сечения; д — вход в систему каналов; е — резкий и плавный поворот на 90°; ж — подъемная заслонка; з — поворотная заслонка;  $\omega_1$  и  $\omega_2$  — расчетные скорости.

при квадратном сечении  $\xi = 2,0 \div 2,5$ ; круглом сечении  $\xi = 2,5 \div 3,5$ ; прямоугольном сечении  $\xi = 1,5 \div 2,0$ .

При подсчете берут среднюю скорость в единичном сечении.

**3. Изменение направления потока.** Рассмотрим следующие основные случаи: резкий поворот на 90°; плавный поворот на 90°; поворот на любой угол (рис. 26, е). Сечение потока и расчетная скорость остаются неизменными.

При резком повороте на 90° принимают  $\xi = 1,5$ . При плавном повороте на 90° коэффициент  $\xi$  определяют в зависимости от  $R/D$  (табл. 21).

Таблица 21

Коэффициент $\xi$								
$R/D$	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,4	1,8	2,0
$\xi$	0,09	0,14	0,16	0,21	0,29	0,66	1,41	1,92

При повороте на любой угол  $\varphi$  с закруглением

$$\xi_{\varphi} = \xi_{90} \cdot \frac{\varphi}{90}. \quad (93)$$

**4. Шибер или заслонка (рис. 26, ж).** Коэффициент сопротивления зависит от степени открытия шибера (табл. 22).

Таблица 22

Изменение коэффициента сопротивления $\xi$ от степени открытия шибера					
Степень открытия шибер, %	10	30	50	80	100
$\xi$	230	16,7	4,0	0,5	0,1

**5. Поворотная заслонка (рис. 26, з).** Коэффициент сопротивления зависит от угла поворота  $\alpha$  (табл. 23).

Таблица 23

Изменение коэффициента сопротивления от угла поворота $\alpha$							
$\alpha$	5	10	20	40	60	70	90
$\xi$	0,24	0,52	1,54	10,8	118	751	$\infty$

№ п/п	2	Наименование участка	Размеры канала			Динамический напор							Определение потерь			17 $h_r, \text{ кг/м}^2$ Приращение геометрического напора	18 $h_{\text{общ}} = h_{\text{пот}} \pm h_r$ Общие потери на участке $\left[ \frac{\text{кг}}{\text{м}^2} \right]$
			3 Длина участка $L, \text{ м}$	4 Живое сечение $f, \text{ м}^2$	5 Гидравлический диаметр $D_r, \text{ м}^2$	6 Подъем $l_1 - z_2, \text{ м}$	7 Расход газа $V_0, \frac{\text{м}^3}{\text{сек}}$	8 Скорость газа $w_0, \text{ м/сек}$	9 Средняя температура газа $t, \text{ }^\circ\text{C}$	10 Динамический напор $\frac{w_0^2}{273 + t} \cdot 10^{-2} \text{ кг/м}^2$	11 Коэффициент $\lambda$	12 $\frac{\lambda}{D_r} \cdot L$	13 Виды местных сопротивлений	14 $\sum \xi$	15 $\sum \xi + \frac{\lambda}{D_r}$		

Потери давления на трение и местные сопротивления складываются в соответствии с принципом наложения потерь.

Согласно этому принципу потеря напора в канале равна арифметической сумме обоих видов потерь:

$$\delta_{пот} = \Sigma \delta_{тр} + \Sigma \delta_{мест}. \quad (94)$$

При значительном преобладании потерь на местное сопротивление влияние отдельных участков может привести к нарушению принципа наложения. Однако этим обстоятельством обычно пренебрегают.

Потери давления можно подробно рассчитывать по табл. 24.

При разбивке всего тракта на отдельные участки последние выбирают с одинаковой скоростью газов. Сопротивления на участках с плавным изменением скорости (диффузоры и конфузоры) подсчитывают отдельно. К таблице обязательно прилагают расчетную схему, на которую наносят отдельные участки с указанием их геометрических размеров и совместного расширения.

При подсчетах необходимо учитывать падение температуры в подводящих боровых и удельного веса, которое происходит из-за присосов холодного воздуха и потерь тепла через стенки.

Эти потери можно оценить на основании следующих практических данных (табл. 25).

Таблица 25

Потери температуры при движении газа по дымоходу

Средняя температура газов, $^{\circ}C$	Падение температуры, град, на 1 м	
	Дымоходы новые	Дымоходы после длительной эксплуатации
1000—1200	5,2	6,3
800—1000	4,6	5,2
600—800	3,7	4,3
400—600	2,8	3,6

Сечение каналов отводящих дымовых газов определяют предварительно по формуле

$$F = \frac{V_0}{3600 w_0} [м^2], \quad (95)$$

где  $V_0$  — объем отводимых продуктов горения,  $м^3/сек$  при н. ф. у.;

$w_0$  — скорость газов, приведенная к нормальным условиям; ее принимают равной  $w_0 = 2—5 м/сек$ .



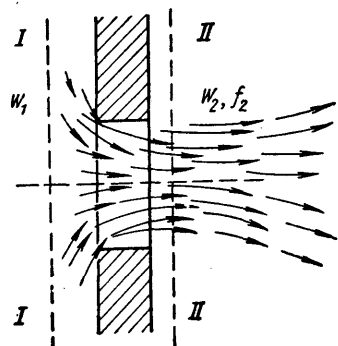


Рис. 27. Истечение газа из отверстия в тонкой стенке

После этого рассчитывают сопротивления и в случае необходимости корректируют сечения дымоходов.

При расчете следует избегать разрежений, превышающих 20—30 мм вод. ст., так как при больших разрежениях получаются значительные присосы воздуха через кладку.

#### § 14. ИСТЕЧЕНИЕ ГАЗОВ ИЗ ОТВЕРСТИЙ

Вопросы истечения газов приходится решать при расчете горелок и форсунок, при определении расхода газа, вытекающего через отверстия в стенках печей, и в ряде других случаев. При этом возможны два случая: 1) газ вытекает при небольшом начальном давлении и его практически можно считать несжимаемым; расчеты ведут по формулам гидравлики; 2) газ вытекает при большом начальном давлении и изменением удельного веса при истечении газа пренебречь нельзя.

Разберем первый случай (рис. 27). Напишем уравнение Бернулли для двух сечений: для сечения I—I перед отверстием и для сечения II—II в выходном сечении:

$$\frac{p_1}{\gamma} + \frac{w_1^2}{2g} = \frac{p_2}{\gamma} + \frac{w_2^2}{2g}. \quad (96)$$

Пренебрегая скоростью подхода ( $w_1=0$ ), получим теоретическую скорость истечения без учета потерь

$$w_T = \sqrt{\frac{2g(p_1 - p_2)}{\gamma}} \text{ [м/сек]}. \quad (97)$$

Теоретическое количество вытекающего газа при этом будет равно

$$V_T = f \cdot 3600 \sqrt{\frac{2g(p_1 - p_2)}{\gamma}} \text{ [м}^3\text{/час]}. \quad (98)$$

В реальных условиях количество вытекающего газа будет менее теоретического за счет сужения струи при истечении и

потерь энергии. Отношение действительного расхода газа  $V$  к теоретическому  $V_T$  называется коэффициентом расхода  $\mu$ :

$$\mu = \frac{V}{V_T}. \quad (99)$$

Аналогично отношение фактической скорости  $w$  к теоретической  $w_T$  называется коэффициентом скорости

$$\varphi = \frac{w}{w_T}. \quad (100)$$

Средние значения коэффициентов скорости и расхода для разных случаев приведены в табл. 26.

Таблица 26

Значение коэффициента скорости и расхода газа

Характеристика отверстия	$\varphi$	$\mu$
Круглое и квадратное отверстие в тонкой стенке	0,97	0,62—0,63
Цилиндрическая насадка (или круглое отверстие) в толстой стенке	0,82	0,82
Сужающаяся коническая насадка	0,97	0,97
Конически расширяющаяся насадка (действительно при $Re > 10\,000$ )	0,45±0,5	0,45±0,5

Пользуясь значениями, приведенными в табл. 26, находим фактическую скорость и расход газа:  $w = w_T \varphi$  и  $V = V_T \mu$ .

Применение формул (98) и (99) возможно лишь при разности давлений  $p_1 - p_2 \leq \sim 5000 \text{ н/м}^2$ .

Как показано на рис. 28, погрешность, связанная с изменением удельного веса газа при истечении и давлениях, больших  $\sim 5000 \text{ н/м}^2$ , превышает 2%, что может сказаться на точности расчета. При ориентировочных расчетах, в которых можно допустить погрешность 4—5%, формулы для истечения несжимаемой жидкости можно применять до  $p_1 - p_2 \leq \sim 10\,000 \text{ н/м}^2$ .

Частным случаем истечения газов является перетекание газов через отверстие, которое нижней кромкой совпадает с подом печи (с плоскостью нулевого давления). Легкий газ при этом сливается через стенку, отделяющую его от более тяжелой среды — холодного воздуха (рис. 29).

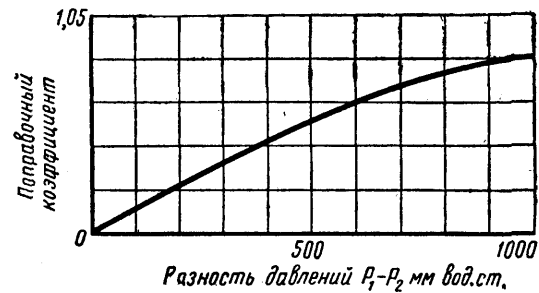


Рис. 28. Зависимость поправочного коэффициента от разности давлений для результатов подсчета скорости истечения воздуха по формуле для несжимаемой жидкости

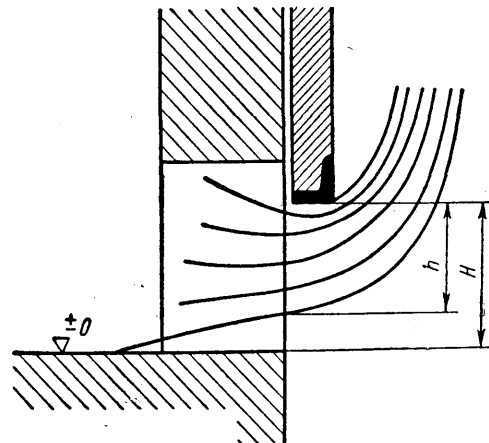


Рис. 29. Схема газослива

И. Г. Есьман, рассматривая этот случай как «опрокинутый» водослив, предложил формулу для определения расхода газа через газослив. Формула приведена в измененном виде:

$$V_0 = Ah^{\frac{3}{2}}b \text{ [м}^3\text{/сек при н. ф. у.]}, \quad (101)$$

где  $V_0$  — расход газа, м<sup>3</sup>/сек при н. ф. у.;

$b$  — ширина, окна, м;

$h$  — высота газослива, м;

$A$  — коэффициент, зависящий от температуры газов (табл. 27).

Таблица 27

Зависимость коэффициента газослива от температуры

$t$ °C	400	600	800	1000	1500
$A$	1,25	1,18	1,10	1,04	0,92

При расчете форсунок высокого давления, работающих на сжатом воздухе или паре, а также в ряде других случаев возникает необходимость в определении скорости истечения и расхода газа при высоких начальных давлениях. Подробные данные об этом даны в курсах термодинамики.

Ниже приведены основные формулы для этого случая.

Скорость при изэнтропическом истечении:

$$w = \sqrt{2g \frac{K}{K-1} \cdot RT \left[ 1 - \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{K-1}{K}} \right]} \text{ [м/сек]}, \quad (102)$$

где  $K$  — отношение теплоемкости при постоянном давлении к теплоемкости при постоянном объеме ( $K=1,41$  для двухатомного газа;  $K=1,3$  для перегретого пара);

$T$  — температура вытекающего газа, °K;

$p_2$  — давление среды, в которую происходит истечение (чаще всего  $p_1 \approx 100\,000$  н/м<sup>2</sup>);

$p_1$  — начальное абсолютное давление газа, н/м<sup>2</sup>;

$R$  — газовая постоянная, дж/кг · град;

$g$  — ускорение силы тяжести, равное 9,8 м/сек<sup>2</sup>.

Произведение  $RT$  можно заменить равной ему величиной  $P_1 V_1 = RT$ , где  $V_1$  — удельный объем газа, м<sup>3</sup>/кг.

Когда отношение  $\frac{p_2}{p_1}$  достигает некоторой критической величины

$\beta = \frac{p_2}{p_1}$ , характер истечения резко меняется.

В этом случае устанавливается постоянная скорость истечения, определяемая по формуле:

$$w_{кр} = \sqrt{2g \cdot \frac{K}{K+1} \cdot RT} \text{ [м/сек]}. \quad (103)$$

Давление в выходном отверстии при этом устанавливается равным:

$$p_2 = \beta p_1. \quad (104)$$

Критическое отношение давлений  $\beta$  равно для двухатомных газов 0,528, для перегретого пара — 0,546, для сухого насыщенного пара — 0,577. Дальнейшее повышение давления не дает увеличения скорости, которая остается постоянной, расход газа при этом можно определить по табл. 28.

Таблица 28

Зависимость скорости и расхода газа от давления

Параметры	Двухатомные газы	Сухой насыщенный пар	Перегретый пар
Скорость ( $w_{кр}$ ), м/сек	$3,38 \sqrt{p_1 V_1}$	$3,23 \sqrt{p_1 V_1}$	$3,33 \sqrt{p_1 V_1}$
Расход ( $g_{кр}$ ), кг/ч	$2,14f \sqrt{\frac{p_1}{V_1}}$	$1,99f \sqrt{\frac{p_1}{V_1}}$	$2,09f \sqrt{\frac{p_1}{V_1}}$

Применением расширяющих сопел можно достигнуть полного расширения газа. В этом случае скорость истечения будет больше критической.

## § 15. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПОТОКОВ В РАЗДЕЛЯЮЩИХСЯ КАНАЛАХ

На рис. 30 показано разветвление горизонтального канала, по которому движется газ, на две параллельные ветви с после-

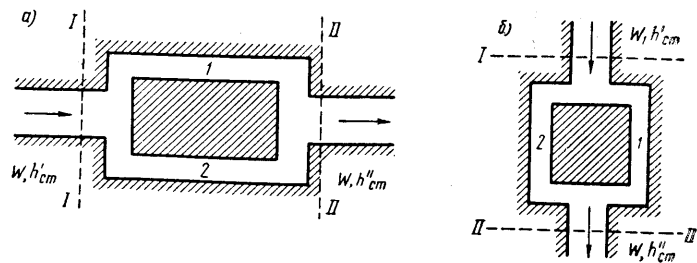


Рис. 30. Схема распределения потоков:

а — при движении в горизонтальном направлении; б — при движении в вертикальном направлении; 1 и 2 — каналы

дующим их соединением. Уравнение Бернулли для сечений I—I и II—II будет иметь следующий вид:

$$\delta_{ст}^I + \frac{w_I^2}{2g} \gamma + \delta_{геом}^I = \delta_{ст}^{II} + \frac{w_{II}^2}{2g} \gamma + \delta_{геом}^{II} + \delta_{пот}. \quad (105)$$

Исходя из того, что  $w_I = w_{II}$  и  $\delta_{геом}^I = \delta_{геом}^{II}$ , получим:

$$\delta_{пот} = \delta_{ст}^I - \delta_{ст}^{II} \quad [H/M^2] \text{ или } [мм \text{ вод. ст.}] \quad (106)$$

$$\text{Для первого канала } \delta_{пот} = \frac{K_1 \cdot w_I^2}{2g} \gamma [H/M^2] \text{ или } [мм \text{ вод. ст.}] \quad (107)$$

$$\text{Для второго канала } \delta_{пот} = \frac{K_2 w_{II}^2}{2g} \gamma [H/M^2] \text{ или } [мм \text{ вод. ст.}],$$

$$\text{где } K = \Sigma \xi + \frac{\lambda l}{d}. \quad (108)$$

Приравнявая оба выражения, получим:

$$\left( \frac{w_I}{w_{II}} \right)^2 = \frac{K_2}{K_1}. \quad (109)$$

Так как скорость потока  $w = \frac{V}{F}$ ,

где  $V$  — расход,  $м^3/сек$ ;  
 $F$  — площадь сечения,  $м^2$ ,

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{F_1}{F_2} \cdot \frac{\sqrt{K_2}}{\sqrt{K_1}} = \frac{F_{1 экв}}{F_{2 экв}}. \quad (110)$$

Выражение  $F_9 = \frac{F}{\sqrt{K}}$  носит название уравнения площади

эквивалентного сечения.

Эквивалентное сечение — это площадь, при которой были бы данные потери давления при неизменном расходе и коэффициенте  $K=1,0$ :

$$\delta_{пот} = K \frac{V^2 \gamma}{F^2 2g} = \frac{V^2}{\left( \frac{F}{\sqrt{K}} \right)^2} \cdot \frac{\gamma}{F_9^2} = \frac{V^2}{F_9^2} \cdot \frac{\gamma}{2g} [H/M^2]. \quad (111)$$

Отсюда следует, что при горизонтальном разделении потока потоки будут распределяться обратно пропорционально эквивалентным сечениям параллельных каналов.

При движении газов по вертикальным каналам уже не будет равенства геометрических отметок и уравнение Бернулли для начального и конечного сечений примет следующий вид (рис. 30, б):

$$\delta_{\text{ст}}^I + \frac{w_I^2}{2g} \gamma = \delta_{\text{ст}}^I + \frac{w_{II}^2}{2g} \gamma \pm (\delta_{II \text{ геом}} - \delta_{I \text{ геом}}) + \delta_{\text{пот}}. \quad (112)$$

$$\text{При } w_I = w_{II} \quad \delta_{\text{ст}}^I - \delta_{\text{ст}}^{II} = \delta_{\text{пот}} \pm \Delta \delta_{\text{геом}}. \quad (113)$$

Знак члена  $\Delta \delta_{\text{геом}}$  будет зависеть от направления потока газов.

Если в системе каналов движется газ с меньшим удельным весом, чем окружающий воздух, то при восходящем движении газа геометрический напор будет способствовать, а при нисходящем движении препятствовать движению газа.

Для равномерного распределения газов между каналами I и II необходимо соблюдать следующее условие:

$$(\delta_{\text{пот}})_I \pm (\delta_{\text{геом}}) = (\delta_{\text{пот}})_{II} \pm (\delta_{\text{геом}}). \quad (114)$$

Согласно правилу, впервые сформулированному С. В. Лукашевичем, а затем подробно разработанному В. Е. Грум-Гржимайло для равномерного распределения газов по параллельным вертикальным каналам, остывающие газы необходимо направлять сверху вниз, а нагревающиеся — снизу вверх. В этом случае при нарушении равенства температур по параллельным каналам изменение геометрического напора будет способствовать восстановлению нарушенного равенства температур и равномерному заполнению газами всех параллельных каналов.

В том случае, когда движение газов совершается под действием создаваемых газом в канале давлений, значительно больших, чем гидростатическое давление, правило Лукашевича — Грум-Гржимайло становится недействительным.

## § 16. ДВИЖЕНИЕ ГАЗОВ В ЗАМКНУТОМ ПРОСТРАНСТВЕ ПЕЧИ

При выходе из форсунок или горелок газовая струя движется в пространстве, заполненном тем же газом.

Законы движения струи при затопленном истечении в неограниченном и ограниченном пространстве изучали многие исследователи (Г. А. Абрамович, А. Е. Предводителев, Г. П. Иванов, Д. Н. Ляховский, М. А. Глинков, В. И. Миткалинный и др.).

В результате этих работ были достаточно подробно изучены законы движения струи в неограниченном свободном пространстве.

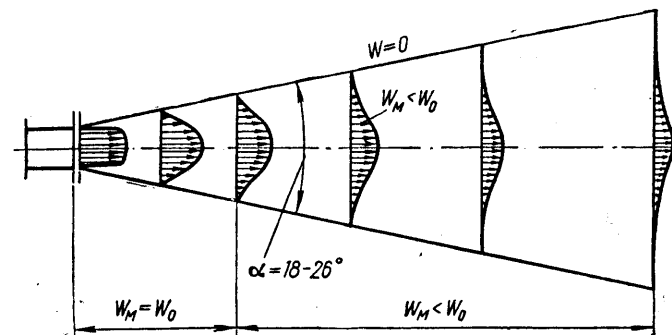


Рис. 31. Схема свободной струи:

$w=0$  — граница струи;  $\alpha$  — угол расширения;  $w_M = w_0$  — начальный участок;  $w_M < w_0$  — основной участок

В экспериментах было выяснено, что по мере удаления струи от места выхода скорость ее уменьшается, а площадь поперечного сечения и количество движущегося газа увеличивается. Это происходит в результате действия сил трения между струей и окружающей средой. В области соприкосновения с окружающей неподвижной средой возникают вихри, которые проникают внутрь среды и вызывают перемешивание газов. Из-за сопротивления окружающей среды струя на некотором расстоянии от выхода затухает (рис. 31).

Характерной особенностью свободной затопленной струи является подобие скоростных полей во всех сечениях основного участка струи:

$$\frac{w_M}{w_0} = f\left(\frac{al}{r_0}\right), \quad (115)$$

где  $w_0$  и  $r_0$  — скорость (в м/сек) и радиус (в м) для начального сечения струи;

$w_m$  — осевая скорость, м/сек;

$l$  — расстояние от начала струи (выход из сопла) до данного сечения, м;

$a$  — постоянный коэффициент.

По утверждению Г. Н. Абрамовича, для круглой струи действительны следующие соотношения:

$$\frac{w_M}{w_0} = \frac{0,96}{\frac{al}{r_0} + 0,29} \quad (116)$$

и

$$\frac{V}{V_0} = 0,207 \frac{l}{2r_0} + 1,0, \quad (117)$$

где  $\frac{V}{V_0}$  — отношение количества газа, проходящего через сечение, к начальному (кратность циркуляции);  $a = 0,07 \div 0,08$  для круглой струи.

Распределение температур по оси струи при истечении струи в свободное пространство, а также отношение  $\frac{w_m}{w_0}$  можно определить по следующей кривой, построенной по данным Центрального котлотурбинного института (рис. 32).

Струя, вытекающая из прямоугольного насадка на определенном расстоянии от начала, превращается в круглую осесимметрическую струю, которая движется по приведенным выше закономерностям.

В нагревательных печах затопленная струя в большинстве случаев в процессе расширения сближается с поверхностью стенки, поэтому законы движения свободной затопленной струи теряют силу. Однако в пределах самой струи эти закономерности в какой-то мере сохраняются (рис. 33).

При распределении в замкнутой камере давление в струе возрастает по направлению движения, в связи с частичным превращением скоростного напора в статический. Внешние слои, имеющие малые скорости, отслаиваются от струи и возвращаются к местам пониженного давления, т. е. к месту выхода струи из насадки. В среде, окружающей струю, возникают циркуляционные токи.

Рассмотрим движение газов в камерной печи, которая отопляется одной газовой горелкой (рис. 34).

Уравнение смешения газов будет иметь следующий вид:

$$V_0 t_0 c_0 + V_1 t_1 c_1 = (V_0 + V_1) t_{cp} c_{cp}, \quad (118)$$

где  $V_0$  — количество газа, поступающего в камеру;  
 $V_1$  — количество газа, инжектируемого струей;  
 $t_0$  и  $t_1$  — температура газа в струе и в окружающей среде;  
 $t_{cp}$  — температура смеси;  
 $c_0, c_1, c_{cp}$  — теплоемкости, соответствующие температурам.

Приняв  $c_0 = c_1 = c_{cp}$  и обозначив через  $m = \frac{V_1}{V_0}$ , получим после соответствующих преобразований

$$\frac{t_1 - t_0}{t_1 - t_{cp}} = m + 1 = \frac{V_0 + V_1}{V_0} = n, \quad (119)$$

где  $n$  — кратность циркуляции.

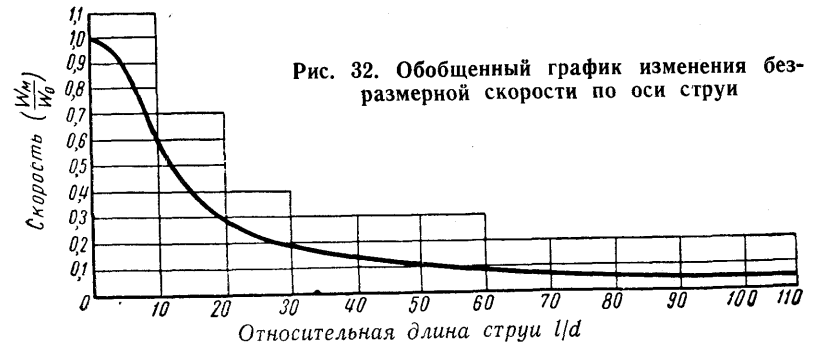


Рис. 32. Обобщенный график изменения безразмерной скорости по оси струи

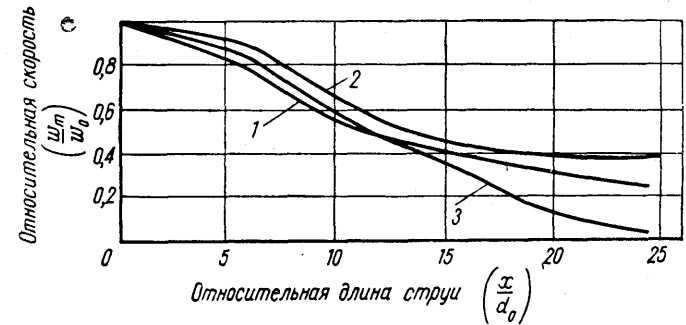


Рис. 33. Падение осевой скорости в свободной (1), настильной (2) и ограниченной (3) струях

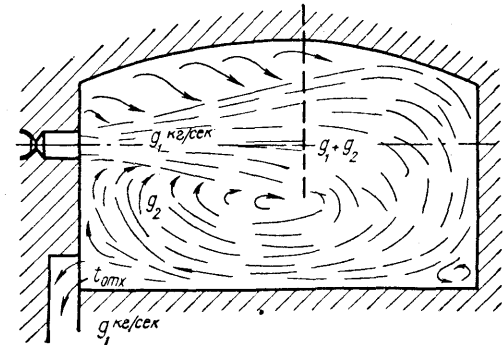


Рис. 34. Схема циркуляции газов в камерной печи (к расчету зависимости равномерности распределения температур от кратности циркуляции):

$q_1$  — количество движущегося газа;  $q_2$  — количество подсосанного газа;  $t_{отх}$  — температура отходящих газов

Из полученного выражения следует, что с увеличением кратности циркуляции  $n$  повышается равномерность температурного поля.

Увеличения степени циркуляции, по данным Г. П. Иванцова, можно достигнуть при: 1) увеличении количества движения, вносимого струями газа, т. е. увеличении скорости при одном и том же количестве газа; для большей кратности циркуляции следует брать выходное сечение малого диаметра при большем количестве горелок; 2) применении шахматного расположения горелок; 3) недопущении встречного расположения горелок.

Еще не создан инженерный метод расчета гидродинамики движения затопленной струи в замкнутом объеме. Его изучают в каждом отдельном случае на моделях.

Еще большие затруднения возникают при определении длины факела пламени, так как процессы, происходящие в этом случае, очень сложны из-за совмещения гидродинамических факторов с процессом горения. Приведем эмпирические зависимости, полученные некоторыми авторами.

По данным Б. И. Китаева и И. В. Левченко, длину свободно горящего турбулентного факела (при холодном газе) определяют по формуле:

$$\frac{L}{d_0} = (13,5 \div 14,0) k w_0^{0,39} d_0^{-0,17}, \quad (120)$$

где  $L$  — длина факела;

$d_0$  — диаметр сопла, м;

$w_0$  — скорость истечения газа из сопла, м/сек;

$k$  — коэффициент, зависящий от теплотворности и состава газа (для генераторного газа  $k \approx 0,65$ , для коксовального газа  $k \approx 1,0$ ).

Е. И. Казанцев и И. Д. Семикин предлагают для доменного, коксовального и коксодоменного газов следующую формулу:

$$\frac{L}{d_0} = \frac{w_0}{3,75 + 0,925 w_0} (5,6 + 0,0021 Q_p^p). \quad (121)$$

## § 17. СТРУЙНЫЕ ПРИБОРЫ

Назначение струйных приборов — повышение давления газа или жидкости за счет смешения ее с дополнительным количеством другого газа или жидкости, вытекающим в камеру смешения с большей скоростью.

Струйные приборы применяют для увеличения тяги в дымовых трубах, принудительной подачи воздуха в горелки, откачки воды из боровов печей и во многих других случаях.

В тех случаях, когда струйный прибор предназначен для нагнетания жидкости или газа, его называют инжектором. При использовании прибора для всасывания газа или жидкости без создания существенного давления его называют эжектором (рис. 35).

В качестве эжектирующей среды чаще всего применяют сжатый воздух, газ или перегретый пар.

Энергетический баланс камеры смешения струйного прибора имеет следующий вид (рис. 36):

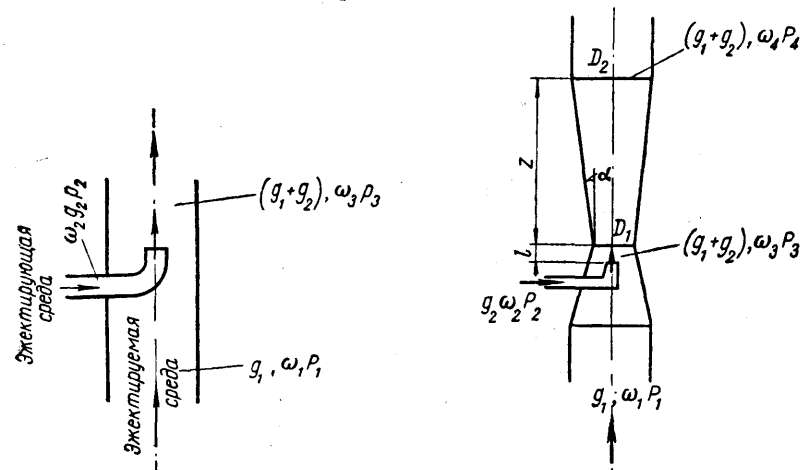


Рис. 35. Расчетная схема простого эжектора без диффузора

Рис. 36. Расчетная схема эжектора с диффузором

### Приход энергии

(Обозначения даны на чертеже)

1. Кинетическая энергия эжектирующей среды —  $\frac{g_0 w_0^2}{2g} [\delta m]$ .
2. Кинетическая энергия эжектируемой среды —  $\frac{g_1 w_1^2}{2g} [\delta m]$ .

### Расход энергии

1. Кинетическая энергия смеси  $(g_1 + g_2) \frac{w_3^2}{2g} [\delta m]$ .
2. Работа, потраченная на повышение давления эжектируемой среды  $(g_1 + g_2) (p_3 - p_2) [\delta m]$ .

3. Потеря кинетической энергии при ударе за счет уменьшения скорости эжектирующей среды

$$g_1 \frac{(w_1 - w_3)^2}{2g} [\text{вт}].$$

4. Потеря кинетической энергии при ударе за счет увеличения скорости эжектируемой среды

$$g_2 \frac{(w_2 - w_3)^2}{2g} [\text{вт}].$$

В приведенных формулах приняты следующие обозначения:

$g_1$  — расход эжектирующей среды, кг/сек;

$g_2$  — расход эжектируемой среды, кг/сек;

$\gamma_1, \gamma_2$  — соответствующие удельные веса, н/м<sup>3</sup>;

$w_1, w_2$  — начальные скорости эжектирующей и эжектируемой среды, м/сек;

$p_2$  — давление эжектируемой среды, н/м<sup>2</sup>;

$p_3$  — давление смеси, н/м<sup>2</sup>.

Приравняв обе части энергетического баланса, получим основное расчетное уравнение струйного нагнетателя:

$$g_1 \frac{w_1^2}{2g} + g_2 \frac{w_2^2}{2g} = (g_1 + g_2) \frac{w_3^2}{2g} + \left( \frac{g_1}{\gamma_1} + \frac{g_2}{\gamma_2} \right) (p_3 - p_2) + g_1 \frac{(w_1 - w_3)^2}{2g} + g_2 \frac{(w_2 - w_3)^2}{2g}. \quad (122)$$

При расчетах обычно эта формула служит для определения скорости  $w_1$ , а по ней вычисляют необходимое давление эжектирующего газа (или жидкости)  $p_1$ . Если известно  $p_1$  и  $w_1$ , по формуле (122) определяют величину  $p_3$  и  $w_3$ , задаваясь одной из них.

В тех случаях, когда прибор создает повышение давления, на выходе устанавливают диффузор, в котором за счет уменьшения скорости потока увеличивается статическое давление газа (см. рис. 36).

Прирост давления в диффузоре определяют следующим образом:

$$p_4 - p_3 = \eta_d (w_3^2 - w_4^2) \frac{\gamma}{2g} \text{ н/м}^2, \quad (123)$$

где  $p_4 - p_3$  — прирост давления в диффузоре, н/м<sup>2</sup>;

$w_3$  — скорость на входе в диффузор, м/сек;

$w_4$  — скорость на выходе из диффузора, м/сек;

$\eta_d$  — к. п. д. диффузора ( $\eta_d = 0,80 \div 0,85$ ).

Диаметры сечений струйного прибора определяют по расчетным скоростям.

Длину диффузора  $L$  находят по формуле:

$$L = \frac{D_2 - D_1}{2} \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}, \quad (124)$$

где  $\alpha$  — угол конусности диффузора ( $\alpha = 5 \div 7^\circ$ ).

Для работы струйного аппарата большое значение имеет расстояние от сопла до камеры смешения  $l$ . В первом приближении  $l = (2 \div 3) d_1$ , где  $d_1$  — диаметр выходного сечения сопла. При конструктивном выполнении эжектора следует предусмотреть возможность изменения этого расстояния при наладке прибора.

Отношение площадей сечения камеры смешения и выходного сечения сопла, по данным Всесоюзного теплотехнического института, — на уровне

$$\frac{f_{\text{см}}}{f_1} = 4,0 \div 6,0,$$

диаметр камеры смешения в этом случае

$$D_{\text{см}} = d_1 \sqrt{\frac{f_{\text{см}}}{f_1}}. \quad (125)$$

Длина камеры смешения  $L = (4 \div 6) D_{\text{см}}$ .

Коэффициенты полезного действия эжектора невелики и находятся в пределах  $\eta = 0,10 \div 0,15$  без диффузора и  $\eta = 0,25 \div 0,30$  при наличии диффузора.

Основным преимуществом струйного прибора является простота изготовления и устройства, а также надежность в эксплуатации.

## ТЕОРИЯ ПОДОБИЯ

## § 18. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Сложные процессы, протекающие в тепловых агрегатах, зависят от различных факторов. Взаимодействие этих факторов можно с известной степенью точности описать математически с помощью обыкновенных или дифференциальных уравнений. Решение таких уравнений обычно крайне затруднено или возможно лишь при условии введения ряда упрощающих условностей.

Такое положение приводит к необходимости экспериментального исследования интересующих нас процессов на моделях или на действующих агрегатах.

В задачу теории подобия входит установление способов обобщения результатов эксперимента и выяснение возможности использования их для других аналогичных объектов.

Подобными называются явления, у которых отношение характеризующих их величин есть величина постоянная. В дальнейшем будут рассмотрены следующие виды подобия явлений: геометрическое, механическое, гидромеханическое и тепловое подобие.

## § 19. ГЕОМЕТРИЧЕСКОЕ ПОДОБИЕ

Наиболее простым является геометрическое подобие.

Из геометрии известно, что все стороны подобных треугольников (и вообще подобных систем), а также любые отрезки, соединяющие две пары соответственных точек, пропорциональны.

Если обозначим стороны и другие соответствующие линии в подобных треугольниках через  $l_1, l_2, l_3, l_4 \dots$  в одном тре-

угольнике и через  $l_1'', l_2'', l_3'', l_4'' \dots$  в другом (рис. 37), то получим:

$$\frac{l_1''}{l_1'} = \frac{l_2''}{l_2'} = \frac{l_3''}{l_3'} = \dots = \frac{l_4''}{l_4'} = \dots = K_l,$$

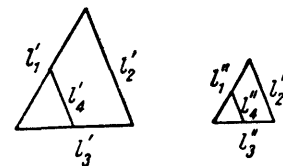


Рис. 37. Геометрическое подобие

где  $K_l$  — коэффициент пропорциональности, называемый в данном случае константой геометрического подобия.

Далее будет показано, что при подобии других физических величин возможны другие константы подобия.

Из уравнения (126) следует, что

$$\frac{l_1'' - l_2''}{l_1' - l_2'} = \frac{dl''}{dl'} = K_l. \quad (127)$$

Отсюда ясно, что в подобных системах отношение приращений величин, выраженное в конечной или дифференциальной форме, также равно константе подобия.

Отношение между двумя сходственными отрезками одной системы равно такому же отношению в другой системе

$$\frac{l_1'}{l_2'} = \frac{l_1''}{l_2''} = \dots = \text{idem}^*. \quad (128)$$

Здесь впервые встречаемся с величинами в подобных системах, которые сохраняют одно и то же значение.

При одинаковых размерностях составляющих величин эти величины называются симплексами, при разных размерностях — инвариантами, или критериями подобия.

## § 20. МЕХАНИЧЕСКОЕ ПОДОБИЕ

Более сложным случаем является механическое подобие явлений. При механическом подобии, кроме обязательного сохранения геометрического подобия, необходимо кинематическое и динамическое подобие. При этом необходимо соблюдать одинаковое отношение скоростей и сохранять отношение действующих сил, приложенных в сходственных точках подобных систем.

\* Обозначение idem означает «одно и то же».



Исходным уравнением для анализа условий механического подобия является второй закон Ньютона:

$$F = ma = m \frac{w}{\tau}, \quad (129)$$

где

$F$  — сила, н;  
 $m$  — масса тела, кг

$a = \frac{w}{\tau}$  — ускорение движущегося тела, м/сек<sup>2</sup>

( $w$  — скорость, м/сек;  $\tau$  — время процесса, сек).

Рассмотрим две подобных системы:

для первой системы  $F_1 = m_1 \frac{w_1}{\tau_1}$ ;

для второй системы  $F_2 = m_2 \frac{w_2}{\tau_2}$ ,

$$\text{откуда } \frac{F_1}{F_2} = \frac{m_1}{m_2} \cdot \frac{w_1}{w_2} \cdot \frac{\tau_2}{\tau_1}. \quad (130)$$

Все члены этого уравнения являются соответствующими константами подобия:

$\frac{F_1}{F_2} = K_F$  — константа динамического подобия;

$\frac{w_1}{w_2} = K_w$  — константа кинематического подобия;

$\frac{m_1}{m_2} = K_m$  — константа материального подобия;

$\frac{\tau_1}{\tau_2} = K_\tau$  — константа временного подобия.

Произведя соответствующие подстановки, получим:

$$\frac{K_\tau K_F}{K_m K_w} = 1,0. \quad (131)$$

Это условие определяет выбор констант подобия, которые не могут иметь произвольных, независимых друг от друга, значений.

Подставив в уравнение (130) приведенные выше значения констант подобия, получим:

$$\frac{F' \tau'}{m' w'} = \frac{F'' \tau''}{m'' w''} = \dots = \frac{F \tau}{m w} = \text{idem}. \quad (132)$$

Полученный критерий подобия называется критерием Ньютона и имеет обозначение

$$Ne = \frac{F \tau}{m w} = \text{idem}. \quad (133)$$

Чаше критерию  $Ne$  придают другую форму при замене  $\tau = \frac{l}{w}$ :

$$Ne = \frac{F l}{m w^2} = \text{idem}. \quad (134)$$

Заменяя силу  $F$  через  $F = \frac{m w}{\tau}$ , получим другое выражение критерия Ньютона:

$$Ne = \frac{F l}{m w^2} = \frac{l}{w \tau}. \quad (135)$$

Обратную величину часто называют критерием гомохронности:

$$Ho = \frac{1}{Ne} = \frac{w \tau}{l}. \quad (136)$$

Величина  $l$  в формулах (135) и (136), численно равная пути, пройденному телом при движении со скоростью  $w$ , является определяющим размером критерия подобия.

Величину определяющего размера можно выбрать произвольной вследствие геометрического подобия систем, но при всех случаях дальнейшего использования критерия нужно сохранять сходственное значение. Так, если в качестве определяющего критерия выбран радиус тела, то в дальнейшем при подсчете критериев других систем следует подставлять только радиус.

Критерии подобия, в состав которых входит время, называют критериями гомохронности вообще. Эти критерии устанавливают связь между временем протекания процесса и другими характеризующими его параметрами. Выведенный выше критерий  $Ho$  является наиболее простым из критериев такого рода. Другой критерий гомохронности — критерий Фурье будет приведен ниже.

Критерии гомохронности используют при анализе неустановившихся (нестационарных) процессов.

Нетрудно убедиться, что размерность критериев подобия всегда равна единице. При вычислении критериев подобия необходимо особенно внимательно следить за тем, чтобы в окончательном результате получалась безразмерная величина.

Рассмотренный способ определения критериев подобия называется способом масштабных преобразований. Этот способ усложняется, если исходное уравнение дано в дифференциальной форме.

В этом случае может быть использован способ, впервые предложенный А. А. Гухманом (описан без доказательства). При нахождении критериев подобия в исходном уравнении отбрасывают символы дифференцирования, индексы, знаки суммирования и др.

## § 21. ГИДРОМЕХАНИЧЕСКОЕ ПОДОБИЕ

Критерии подобия при движении сжимаемых и несжимаемых жидкостей получаются за счет преобразования основного критерия Ньютона. В этом случае в уравнении (134) вместо силы  $F$  можно подставить следующие величины: силы трения, тяжести, давления и поверхностного натяжения.

Рассмотрим последовательно все перечисленные случаи за исключением последнего, который относится целиком к капельным жидкостям.

Выделим в потоке вязкой несжимаемой жидкости элементарный куб с ребрами  $dx$ . Выделенный объем движется со скоростью  $w$  м/сек. Масса элементарного куба  $dm = \rho dx^3$  и определяющий размер в критерии подобия  $l = dx$  (рис. 38).

Сила внутреннего трения согласно уравнению (42) равна

$$F = T = \mu \frac{dw}{dx} dx^2. \quad (137)$$

Подставляя это значение в уравнение (134), получим

$$Ne = \frac{\mu \frac{dw}{dx} dx^2 dx}{dx^3 \rho w^2}. \quad (138)$$

Используя метод А. А. Гухмана, получим

$$Ne = \frac{\mu}{\rho w x} = \text{idem}. \quad (139)$$

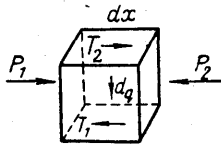


Рис. 38. Схема к выводу основных критериев гидромеханического подобия

Обратная величина этого выражения представляет собой критерий Рейнольдса:

$$Re = \frac{wl}{\nu} = \text{idem}, \quad (140)$$

где  $l = x$  — определяющий размер критерия;  
 $\nu$  — кинематическая вязкость, м<sup>2</sup>/сек.

Подставив вместо  $F$  силу тяжести  $F = mg$  и произведя аналогичные преобразования, получим критерий Фруда:

$$Fr = \frac{gl}{w^2} = \text{idem}. \quad (141)$$

Если критерий Рейнольдса является мерой отношения инерционных и вязкостных сил при движении жидкости, то критерий Фруда является мерой отношения инерционных и гравитационных сил.

Вместо критерия Фруда можно применять критерий Галилея —  $Ga$ , равный произведению

$$Ga = Fr Re^2 = \frac{gl}{w^2} \cdot \frac{w^2 l^2}{\nu^2} = \frac{gl^3}{\nu^2} = \text{idem}. \quad (142)$$

Критерий Галилея применяют в тех случаях, когда скорость потока невозможно определить по каким-либо причинам.

В практике строительства печей большое значение имеет критерий Архимеда  $Ar$ , который учитывает действие подъемной силы газов. Критерий  $Ar$  получится, если в критерий Галилея вместо ускорения силы тяжести  $g$  подставить ускорение подъемной силы  $a = g \frac{\rho_0 - \rho}{\rho_0}$ , где  $\rho_0$  и  $\rho$  — плотности холодных и горячих газов:

$$Ar = \frac{gl^3}{\nu^2} \cdot \frac{\rho - \rho_0}{\rho}. \quad (143)$$

Если плотность меняется при изменении температуры, то  $\rho = \rho_0(1 + \beta \Delta t)$ , где  $\beta$  — коэффициент объемного расширения для жидкости, который берут из справочных таблиц, а для газа

$$\beta = \frac{1}{273} \cdot \frac{1}{\alpha}.$$

Подставляя значение  $\rho$  в уравнение (143), получим критерий Грасгофа:

$$Gr = \beta \frac{gl^3}{\nu^2} \Delta t = \text{idem}. \quad (144)$$

Физический смысл критериев  $Fr$ ,  $Ga$ ,  $Ar$ ,  $Gr$  одинаков. По существу, это четыре разновидности одного и того же критерия.

Результирующая сил давления, действующих на грани элементарного куба, равна:  $F = (p_1 - p_2) dx^2 = \Delta p \cdot dx^2$  (см. рис. 38). Отсюда:

$$Ne = \frac{\Delta p dx^2 dx}{\rho dx^2 w^2}. \quad (145)$$

Используя метод Гухмана, получим:

$$Ne = \frac{p}{\rho w^2} = \text{idem}. \quad (146)$$

Этот критерий называют критерием Эйлера ( $Eu$ ). Часто вместо абсолютного давления  $p$  в критерии используют потерю давления  $\Delta p$  в пределах исследуемого объекта. В этом случае критерий Эйлера определяют следующим образом:

$$Eu = \frac{\Delta p}{\rho w^2} = \text{idem}. \quad (147)$$

Вопросы подобия тепловых процессов рассмотрены в следующей главе.

## § 22. ОСНОВНЫЕ ТЕОРЕМЫ ТЕОРИИ ПОДОБИЯ

При практическом применении теории подобия используют три основных ее теоремы.

Первая теорема теории подобия: *физические процессы, подобные друг другу, имеют одинаковые по величине одноименные критерии подобия.*

Из этой теоремы следует, что при экспериментальных исследованиях в первую очередь необходимо измерять величины, входящие в состав критериев подобия.

Вторая теорема утверждает, что *решение дифференциальных уравнений, выражающих сущность данного физического процесса, можно представить в виде функциональной связи между критериями подобия.*

Так, при изучении движения вязкой жидкости в трубах на-

ходят зависимость вида  $Eu = f\left(Re, \frac{l}{d}\right)$ , где  $\frac{l}{d}$  — отношение длины трубы к диаметру (симплекс).

Предположим, что определяют опытным путем потерю давления в трубопроводе. Опыты проводят с разными жидкостями и газами при разных скоростях. В результате опытов получена обобщенная зависимость  $Eu = f(Re)$ , приведенная на рис. 39. Эта кривая характеризует любую жидкость и газ, независимо от того, использовали их при проведении эксперимента или нет.

Кривые критериальных зависимостей обычно обрабатывают в виде степенных функций. Для нашего случая такую кривую можно выразить следующей формулой:

$$Eu = A Re^m \left(\frac{l}{d}\right)^n. \quad (147a)$$

Постоянные коэффициенты  $A$ ,  $m$  и  $n$  находят в результате обработки опытных данных.

Третья теорема теории подобия (теорема В. М. Кирпичева и А. А. Гухмана) определяет условия обеспечения подобия физических явлений: *у подобных явлений условия однозначности одинаковы и критерии, полученные из условий однозначности, равны между собой.*

Таким образом, из третьей теоремы подобия возникает необходимость обеспечить одинаковые условия однозначности процесса.

Дифференциальные уравнения, выражающие физический процесс, имеют обычно бесконечное количество решений. Для выделения нужного нам конкретного процесса в дополнение к дифференциальным уравнениям должны быть указаны дополнительные условия, которые называются условиями однозначности или краевыми условиями.

Обычно устанавливают следующие условия однозначности: 1) геометрическую характеристику процесса (формы и размеры тела); 2) физические свойства тела; 3) граничные условия, которые определяют характер процесса на границах исследуемого объекта; 4) временные условия, определяющие характер изменения процесса во времени.

Для стационарных процессов необходимость задания временных условий отпадает.

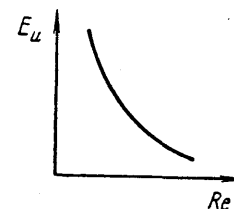


Рис. 39. Зависимость критерия Эйлера от критерия Рейнольдса  $Eu = f(Re)$  при неизменных геометрических условиях

В соответствии с третьей теоремой критерии подобия разделяют на определяющие и неопределяющие.

Определяющие критерии состоят из величин, входящих в условия однозначности. Если в критерий входит величина, которая не содержится в условиях однозначности и которая не может быть определена заранее, то критерий называется неопределяющим.

Так, в зависимости  $Eu = f\left(Re, \frac{l}{d}\right)$  критерий  $Eu$  является неопределяющим, поскольку величина  $\Delta p$  неизвестна и в краевые условия не входит.

С третьей теоремой подобия тесно связана так называемая  $\pi$ -теорема, которая дает возможность установить количество безразмерных критериев и симплексов, определяющих данное физическое явление.

Предположим, что имеем уравнение, выражающее процесс, в который входят следующие величины:  $N$  — количество членов уравнения;  $n$  — количество членов с неодинаковыми размерностями;  $(N-n)$  — количество членов с одинаковыми размерностями;  $k$  — количество единиц измерения, не зависящих друг от друга.

Тогда согласно  $\pi$ -теореме общее количество критериев будет равно:  $r = N - k$ , количество симплексов  $s = N - k - n + k = N - n$ .

Для примера рассмотрим потери давления, возникающие при течении вязкой жидкости внутри трубы.

Будем считать, что падение давления  $\Delta p$  ( $\text{н/м}^2$ ) на участке трубы длиной  $l$  ( $\text{м}$ ) зависит от средней скорости  $w$  ( $\text{м/сек}$ ), диаметра  $d$  ( $\text{м}$ ), плотности жидкости  $\rho$  ( $\text{кг/м}^3$ ) и динамической вязкости  $\mu$  ( $\text{н} \cdot \text{сек/м}^2$ ):

$$\Delta p = f(l, w, d, \rho, \mu). \quad (148)$$

Общее количество величин, участвующих в процессе  $N=6$ , количество членов с неодинаковыми размерностями  $n=5$ , количество самостоятельных размерностей  $k=3$ .

В соответствии с  $\pi$ -теоремой количество критериев  $r = n - k = 5 - 3 = 2$  критерия (критерии  $Eu$  и  $Re$ ), количество симплексов  $s = N - n = 6 - 5 = 1$  (симплекс  $\frac{l}{d}$ ).

Критериальное уравнение, соответствующее уравнению (148), будет иметь следующий вид:

$$Eu = f\left(Re, \frac{l}{d}\right). \quad (149)$$

## § 23. МОДЕЛИРОВАНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ

Теория подобия дает подробные указания к исследованию процессов на уменьшенных объектах — моделях.

Если модель изготовлена в соответствии с указаниями теории подобия, то имеются основания утверждать, что полученные результаты можно использовать при проектировании и наладке действующих агрегатов.

Из третьей теоремы теории подобия можно вывести следующие требования, которые необходимо выполнить, чтобы модель была подобна оригиналу: 1) геометрическое подобие модели и оригинала; 2) описание процессов в модели и оригинале одинаковыми дифференциальными уравнениями (процессы должны относиться к одинаковому классу явлений); 3) тождество краевых условий; 4) выбор критериев подобия должен быть таким, чтобы определяющие критерии в модели и оригинале были численно равны между собой.

Точное выполнение всех перечисленных условий часто затруднительно. В связи с этим М. В. Кирпичев и М. А. Михеев разработали принципы приближенного моделирования гидродинамических явлений и процессов теплообмена.

Возможность приближенного моделирования обуславливается стабильностью и автомодельностью.

При моделировании процессов движения вязкой жидкости распределение скоростей по сечению сохраняется одинаковым в модели и на оригинале при соблюдении равенства критериев  $Re$  и идентичности геометрических факторов. Это явление, называемое стабильностью, намного облегчает процесс моделирования.

Сущность явления автомодельности заключается в том, что при увеличении критерия  $Re$  в условиях развитого турбулентного режима распределение скоростей по сечению остается почти неизменным. При этом критерий  $Eu$  остается постоянным и не зависит от  $Re$ . Для выяснения величины числа  $Re$ , при котором возникает явление автомодельности, на модели производят опыты, на основании которых строится зависимость  $Eu = f(Re)$ .

Когда достигается режим  $Eu = \text{const}$ , наступает режим автомодельности (рис. 40).

В тех случаях, когда нельзя достигнуть удовлетворительной точности моделирования, целесообразно применить метод локального моделирования. При локальном моделировании условия подобия соблюдаются на определенном участке исследуемого объекта. Изучая последовательно отдельные участки, удается составить картину работы объекта в целом.

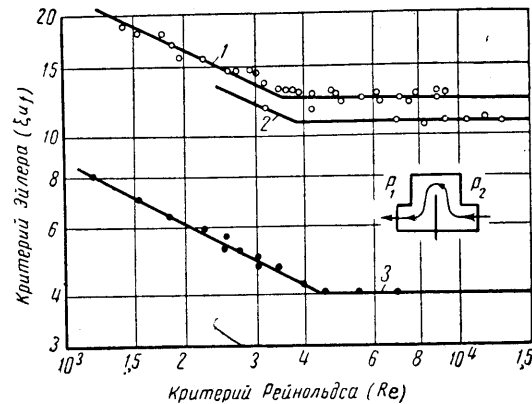


Рис. 40. Пример экспериментального определения сопротивления воздухоподогревателя: 1 — на водяной модели; 2 — на образце с воздухом; 3 — на водяной модели с направляющими лопатками

сечения модели в этом случае  $0,2 \cdot 0,15 = 0,03 \text{ м}^2$ . В качестве моделирующей жидкости принимаем воду при температуре  $20^\circ \text{С}$ . Из условия равенства критериев Рейнольдса в печи и на модели следует:

$$\frac{w_d l_d}{\nu_d} = \frac{w_m l_m}{\nu_m}, \quad (150)$$

где  $w_d$  и  $w_m$  — скорости движения газов и воды в действительности и на модели;

$\nu_d = 258 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{сек}$  — кинематическая вязкость дымовых газов в печи при  $t_r = 1400^\circ \text{С}$ ;

$\nu_m = 1,0 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{сек}$  — кинематическая вязкость воды в модели при  $t_b = 20^\circ \text{С}$ .

Из уравнения (150) определяем масштаб скоростей:

$$M_w = \frac{w_m}{w_d} = \frac{l_d}{l_m} \cdot \frac{\nu_m}{\nu_d} = \frac{10 \cdot 1,0}{258} = 0,039. \quad (151)$$

Соотношение расходов дымовых газов в печи  $Q_d$  и воды на модели  $Q_m$  можно определить из выражения

$$M_Q = \frac{Q_m}{Q_d} = \frac{w_m}{w_d} \cdot \frac{F_m}{F_d} = 0,039 (1/10)^2 = 0,00039.$$

Рассмотрим пример моделирования движения газов в камерной нагревательной печи при следующих исходных данных: сечении рабочего пространства —  $2,0 \times 1,5 = 3,0 \text{ м}^2$ ; объеме протекающих газов —  $1,166 \text{ м}^3/\text{сек}$  при н. ф. у.; средней температуре газов —  $1400^\circ \text{С}$ .

Моделирование выполняем при условии  $Re = \text{const}$ .

Задаемся геометрическим масштабом  $M_l = 1/10$ . Размеры сечения модели в этом случае  $0,2 \cdot 0,15 = 0,03 \text{ м}^2$ . В качестве моделирующей жидкости принимаем воду при температуре  $20^\circ \text{С}$ . Из условия равенства критериев Рейнольдса в печи и на модели следует:

Объем газов в печи в пересчете на реальные условия (температура  $1400^\circ \text{С}$ )

$$Q_d = 4200 \frac{1400 + 273}{273} = 25\,800 \text{ м}^3/\text{сек}.$$

Расход воды при моделировании

$$Q_m = 0,00039 \cdot 7,15 = 0,0028 \text{ м}^3/\text{сек} = 2,8 \text{ л/сек}.$$

Соотношение перепада давлений на модели  $\Delta p_m$  и в действительности  $\Delta p_d$  определяем, исходя из условий равенства критериев Эйлера:

$$\frac{\Delta p_d}{\rho_d w_d^2} = \frac{\Delta p_m}{\rho_m w_m^2}, \quad (152)$$

откуда масштаб давлений:

$$M_p = \frac{\Delta p_m}{\Delta p_d} = \left( \frac{\rho_m}{\rho_d} \right) \left( \frac{w_m}{w_d} \right)^2, \quad (153)$$

где

$$\rho_d = 1,3 \frac{273}{273 + 1400} = 0,21 \text{ кг/м}^3 \text{ — плотность дымовых газов;}$$

$$\rho_b \approx 1000 \text{ кг/м}^3 \text{ — плотность воды;}$$

$$\frac{w_m}{w_d} = 0,039.$$

Подставляя приведенные значения в формулу (153), получим

$$M_p = 0,039^2 \cdot \frac{1000}{0,21} = 7,2.$$

Следовательно, для определения действительного перепада давления в печи нужно потери давления, найденные экспериментально, разделить на 7,2:

$$\Delta p_d = \frac{\Delta p_m}{M_p} = \frac{\Delta p_m}{7,2}. \quad (153a)$$

В заключение необходимо отметить, что моделирование в настоящее время является единственным методом, позволяющим получать исчерпывающие данные о характере движения газов в печах.

Для примера на рис. 41 показаны распределение давлений и схема движения газов в сварочной камере при различном расположении форсунок (экспериментальные данные).

## § 24. МЕТОД АНАЛОГИИ

В ряде случаев совершенно различные по природе физические явления описывают одинаковыми по структуре математическими уравнениями. При этом одно и то же уравнение (или система уравнений) будет выражать разные явления в зависимости от того, какое значение придают входящим в него величинам.

Так, дифференциальное уравнение процесса для установившейся теплопередачи имеет следующий вид:

$$\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} = 0, \quad (154)$$

где  $t$  — температура;  $x, y, z$  — направления движения теплового потока по осям координат.

Уравнение для установившегося электрического тока имеет такой же вид:

$$\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial z^2} = 0, \quad (155)$$

где  $V$  — напряжение.

Математическое подобие уравнений, описывающих физические процессы, встречается достаточно часто.

Так, оно существует для уравнений неустановившегося движения вязкой жидкости, теплопередачи теплопроводностью и диффузии.

Метод аналогии применяют для исследования физических явлений на гидравлических и электрических моделях. Сущность моделирования заключается в том, что на лабораторном стенде собирают гидравлическую или электрическую схему, изменение параметров которой описывают уравнениями, аналогичными уравнениям исследуемого физического процесса.

Основной параметр процесса моделируется изменением уровня воды в сосудах на гидравлической модели или величиной напряжения на электрической модели.

Задача исследования сводится к решению заданного уравнения с помощью моделирующего устройства.

Метод аналогии применяют в тех случаях, когда математическое решение исходных уравнений процесса затруднено или практически невозможно.

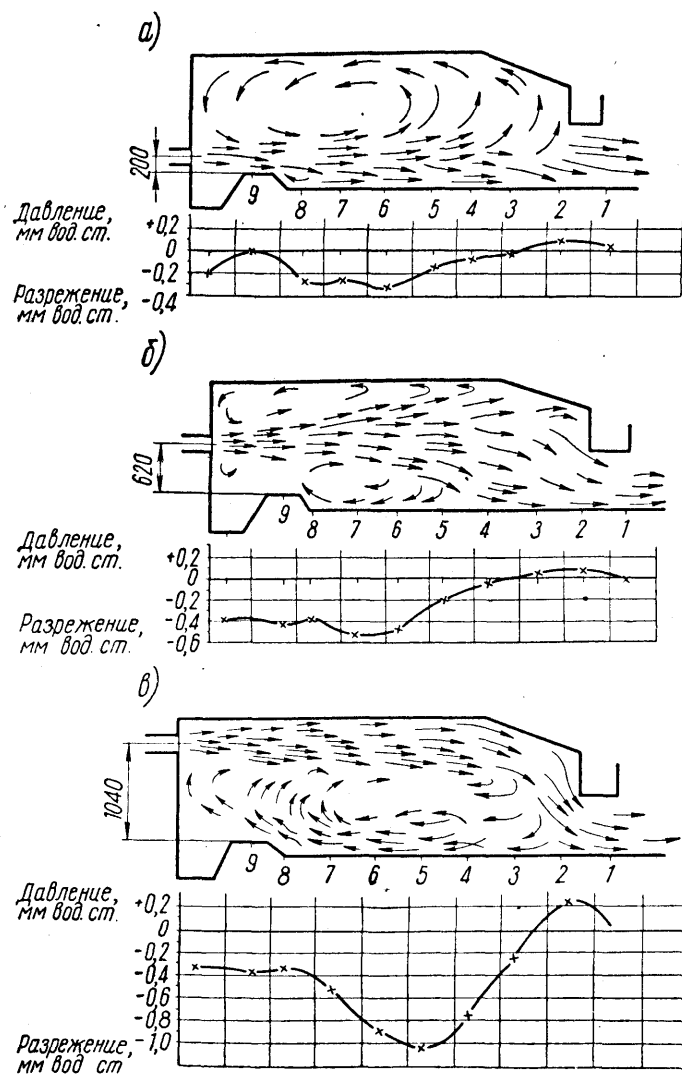


Рис. 41. Схема движения газов и распределение давлений в сварочной камере методической печи, полученное моделированием:

а — при низком расположении форсунок; б — при расположении форсунок по середине высоты камеры; в — при высоком расположении форсунок

# ОСНОВЫ ТЕОРИИ ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ

## § 25. ОБЩИЕ ПОНЯТИЯ

Процесс теплопередачи, т. е. процесс распространения в пространстве тепловой энергии, является одним из основных процессов, происходящих в нагревательных устройствах.

Распространение тепловой энергии связано с распределением в пространстве температуры, т. е. с температурным полем.

В общем случае распределение температуры может изменяться не только в пространстве, но и во времени. Такое температурное поле называется нестационарным, или неустановившимся, его выражают уравнением:

$$t = f(x, y, z, \tau). \quad (156)$$

Если же температурное поле неизменно во времени, оно называется стационарным, или установившимся, и уравнение его будет иметь следующий вид:

$$t = f(x, y, z). \quad (157)$$

Температурное поле может быть одномерным, двумерным и трехмерным, если температура является функцией одной, двух или трех координат.

Тепло, как всякий вид энергии, распространяется в направлении от более высокого потенциала к более низкому, т. е. от мест с более высокой к местам с более низкой температурой.

Количество тепла, которое передается в температурном поле в каком-либо направлении, называется тепловым потоком и имеет размерность в системе СИ  $[вт/м^2]$ , а в технической системе единиц —  $[1 ккал/м^2 \cdot ч = 1,163 вт/м^2]$ .

Процессы теплопередачи и теплообмена, происходящие в природе вообще и в нагревательных устройствах в частности, по своей природе очень сложны. Для облегчения их изучения и луч-

шего выявления закономерностей, связанных с этими процессами, введем понятия о трех видах теплопередачи: теплопроводности, конвекции и излучении (лучеиспускание).

Теплопроводность — распространение тепла, связанное с колебательным движением молекул и движением свободных электронов. Этот вид теплопередачи наиболее характерен для твердых тел, но он бывает и в жидкостях и газах.

Конвекция — перенос тепла за счет движения более или менее нагретых частиц. Этот вид теплопередачи бывает только в жидкостях и газах и связан с характером их движения. Конвекция всегда сопровождается явлением теплопроводности.

Излучение (лучеиспускание) — этот вид теплопередачи связан с распространением в пространстве электромагнитных волн. На поверхности излучающего тела тепловая энергия превращается в электромагнитные колебания (волны), которые, попадая на поверхность какого-либо другого тела, опять превращаются в тепловую энергию.

## § 26. ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ

Все случаи распространения тепла теплопроводностью выражает общее дифференциальное уравнение теплопроводности — уравнение Фурье.

Выделим в теле элементарный объем, причем координаты расположим так, чтобы направление теплового потока было параллельно одной из осей, например оси  $x$  (рис. 42).

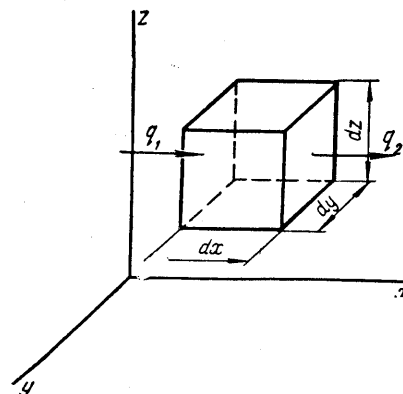


Рис. 42. Схема к выводу основного дифференциального уравнения теплопроводности

В выделенный объем входит тепловой поток  $q_1$ , а выходит тепловой поток  $q_2$ . Если  $q_2 < q_1$ , то какое-то количество тепла будет оставаться в элементарном объеме, температура его будет повышаться. Это случай нагрева.

Если же  $q_1 < q_2$ , то тепло будет уходить из выделенного объема. Это случай охлаждения.

Количество тепла, которое остается в выделенном элементарном объеме (при  $q_2 < q_1$ ):

$$dQ = - \frac{\partial q}{\partial x} dx \cdot dy \cdot dz \cdot d\tau. \quad (158)$$

При нагревании тепловой градиент  $\frac{\partial q}{\partial x}$  — величина отрицательная, поэтому в уравнении (158) надо ставить перед ним знак минус.

Величину теплового потока определяют из уравнения

$$q = - \lambda \frac{\partial t}{\partial x}, \quad (159)$$

где  $\frac{\partial t}{\partial x}$  — температурный градиент;

$\lambda$  — коэффициент теплопроводности (подробно о нем сказано ниже), *вт/м · град*.

Знак минус ставят ввиду того, что тепловой поток направлен в сторону снижения температур и будет положительным при отрицательном  $\frac{\partial t}{\partial x}$ .

Подставляя значение  $q$  в уравнение (158), получим:

$$dQ = \lambda \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} \cdot dx \cdot dy \cdot dz \cdot d\tau. \quad (160)$$

Изменение температуры выделенного элементарного объема, связанное с накоплением в нем тепла за элемент времени  $d\tau$ , определяется выражением  $\frac{\partial t}{\partial \tau} d\tau$ , а количество тепла, которое необходимо для этого, будет вычислено по формуле

$$dQ = d\nu \rho c \frac{\partial t}{\partial \tau} d\tau = dx \cdot dy \cdot dz \cdot \rho c \frac{\partial t}{\partial \tau} \cdot d\tau, \quad (161)$$

где  $\rho$  — плотность;

$c$  — теплоемкость материала.

Приравняв величину  $dQ$ , полученную по этому уравнению, к величине, найденной по уравнению (160), будем иметь

$$dx \cdot dy \cdot dz \cdot \rho c \frac{\partial t}{\partial \tau} d\tau = \lambda \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} dx \cdot dy \cdot dz \cdot d\tau. \quad (162)$$

Сокращая уравнение на величину  $dx \cdot dy \cdot dz \cdot d\tau$ , имеющуюся в обоих его частях, и перенося величину  $\rho c$  в правую часть уравнения, получим

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\lambda}{c\rho} \cdot \frac{\partial^2 t}{\partial x^2}. \quad (163)$$

Вводя обозначение

$$\frac{\lambda}{c\rho} = a \text{ [м}^2/\text{сек]},$$

получим окончательно

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 t}{\partial x^2}. \quad (163a)$$

Величина  $a$  называется коэффициентом температуропроводности и выражение (163a) формулируется так: *первая производная от температуры по времени равна второй производной от температуры по координате  $x$ , умноженной на коэффициент температуропроводности*.

Если тепловой поток направлен не параллельно оси  $x$ , то уравнение (163a) примет следующий вид:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \left( \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right). \quad (163b)$$

Это и будет основное уравнение теплопроводности, или уравнение Фурье.

Однако математически уравнение Фурье решать сложнее, чем уравнение (163a). Поэтому оси координат всегда стремятся выбрать так, чтобы тепловой поток был параллелен какой-либо из них.

Для цилиндра уравнение (163) принимает вид:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \left( \frac{\partial^2 t}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial t}{\partial r} \right), \quad (164)$$

а для шара —

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \left( \frac{\partial^2 t}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \cdot \frac{\partial t}{\partial r} \right), \quad (165)$$

где  $r$  — переменный радиус цилиндра или шара.

При стационарном тепловом поле температура во времени не изменяется  $\frac{\partial t}{\partial \tau} = 0$  и основное дифференциальное уравнение упрощается, принимая вид

$$\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} = 0. \quad (166)$$



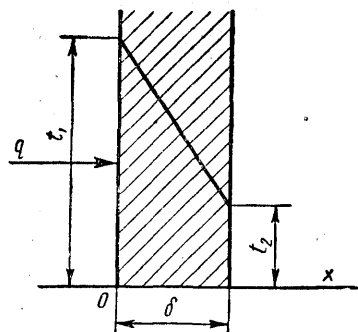


Рис. 43. Схема распределения температур при теплопередаче теплопроводностью через плоскую стенку

параллельно тепловому потоку, т. е. перпендикулярно поверхности.

Постоянные интегрирования  $A$  и  $B$  определяем из принятых условий, которые в рассматриваемом случае будут выражены так:

при  $x = 0$

$$t = t_1 = \text{const}, \quad (168)$$

при  $x = \delta$

$$t = t_2 = \text{const}. \quad (169)$$

Подставляя эти значения в уравнение (167), получим:

$$B = t_1, \quad A = \frac{t_2 - t_1}{\delta}, \quad (170)$$

$$t = t_1 - \frac{t_1 - t_2}{\delta} x. \quad (171)$$

Величину теплового потока  $q$  определяем по формуле

$$q = -\lambda \frac{\partial t}{\partial x} = \lambda \frac{t_1 - t_2}{\delta} [\text{Вт/м}^2], \quad (172)$$

так как из уравнения (170) выражение  $\frac{\partial t}{\partial x} = A = -\frac{t_1 - t_2}{\delta}$ .

Из уравнения (172) видно, что коэффициент теплопроводности  $\lambda$  есть количество тепла, которое протекает между двумя сечениями площадью, равной единице, отстоящими на расстоянии 1°С за время, равное единице.

Интегрируя это уравнение, получим

$$\frac{\partial t}{\partial x} = A \text{ и } t = Ax + B, \quad (167)$$

где  $A$  и  $B$  — постоянные интегрирования.

Уравнение (167) показывает, что при стационарном тепловом состоянии температура изменяется по закону прямой линии.

Рассмотрим случай теплопередачи теплопроводностью через плоскую стенку (рис. 43).

Координату  $x$  направляем

В системе СИ  
 $\lambda = \text{Вт/м} \cdot \text{град.}$   
 В технической системе единиц

$$\lambda \text{ ккал} \cdot \text{м/м}^2 \cdot \text{ч} \cdot ^\circ\text{С} = \text{ккал/м} \cdot \text{ч} \cdot ^\circ\text{С}.$$

Значения  $\lambda$  изменяются в очень широких пределах для разных материалов, причем обычно коэффициент теплопроводности с изменением температуры не остается постоянной величиной, для некоторых материалов он увеличивается при повышении температуры, а для некоторых уменьшается. На рис. 44 приведены зависимости  $\lambda$  от температуры для некоторых металлов и сплавов, а также огнеупорных и теплоизоляционных материалов.

В первом приближении можно считать

$$\lambda = a \pm bt [\text{Вт/м} \cdot \text{град.}]. \quad (173)$$

В этом случае величина теплового потока будет

$$q = -(a \pm bt) \frac{\partial t}{\partial x} [\text{Вт/м}^2]. \quad (174)$$

Разделив переменные и проинтегрировав левую часть в пределах от 0 до  $\delta$ , а правую часть — от  $t_1$  до  $t_2$ , получим

$$q = \frac{a(t_1 - t_2) \pm \frac{b}{2}(t_1^2 - t_2^2)}{\delta} [\text{Вт/м}^2]. \quad (175)$$

Для цилиндрической стенки с наружным радиусом  $R_{\text{нар}}$ , внутренним  $R_{\text{вн}}$  и высотой  $L$  при  $\lambda = \text{const}$  количество тепла, пе-

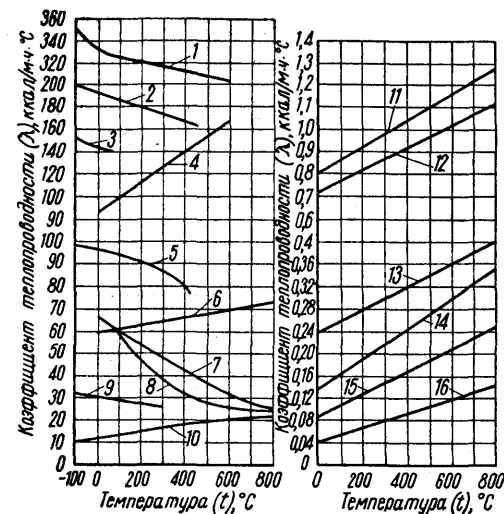


Рис. 44. Зависимость коэффициента теплопроводности ( $\lambda$ ) некоторых металлов, огнеупорных и теплоизоляционных материалов от температуры:

1 — медь; 2 — алюминий (95,95%); 3 — марганец; 4 — латунь (90% олова, 10% цинка); 5 — цинк; 6 — платина; 7 — мягкая сталь; 8 — сталь 45; 9 — свинец; 10 — сталь 1Х19Н9; 11 — диноас; 12 — шмот; 13 — пеношмот ( $\gamma = 0,95 \text{ г/см}^3$ ); 14 — диатомовый кирпич ( $\gamma = 0,7 \text{ г/см}^3$ ); 15 — диатомовый кирпич ( $\gamma = 0,5 \text{ г/см}^3$ ); 16 — шлаковая вата

редаваемое теплопроводностью с внутренней поверхности на наружную, будет

$$Q = \frac{2\pi L \lambda}{\ln \frac{R_{\text{нар}}}{R_{\text{вн}}}} (t_1 - t_2) [\text{Вт}]. \quad (176)$$

Величина теплового потока, отнесенная к 1 м<sup>2</sup> наружной поверхности:

$$q = \frac{\lambda}{R_{\text{нар}} \ln \frac{R_{\text{нар}}}{R_{\text{вн}}}} (t_1 - t_2) [\text{Вт}/\text{м}^2] \quad (176a)$$

и количество тепла на 1 м длины цилиндра

$$Q = \frac{2\pi \lambda}{\ln \frac{R_{\text{нар}}}{R_{\text{вн}}}} (t_1 - t_2) [\text{Вт}/\text{м}]. \quad (176b)$$

При  $\lambda = a \pm bt$  количество тепла, передаваемое через цилиндрическую стенку, будет

$$Q = \frac{2\pi L}{\ln \frac{R_{\text{нар}}}{R_{\text{вн}}}} \left[ a(t_1 - t_2) \pm \frac{b}{2} (t_1^2 - t_2^2) \right] [\text{Вт}]. \quad (177)$$

При нестационарном температурном поле  $-\frac{\partial t}{\partial \tau} \neq 0$  уравнение Фурье для одномерного теплового потока (бесконечной протяженности пластины) имеет ряд решений:

$$t = A\tau + \frac{1}{2} \frac{Ax^2}{a} + C, \quad (178)$$

$$t = A + Bx + Ce^{-P\tau} e^{qx}, \quad (179)$$

$$t = A + Bx + Ce^{-aq^2\tau} \cos(qx), \quad (180)$$

$$t = A + Bx + Ce^{-aq^2\tau} \sin(qx), \quad (181)$$

$$t = A + Bx + \frac{C}{\sqrt{\tau}} e^{-\frac{(q-x)^2}{4a\tau}}, \quad (182)$$

$$t = A + Bx + C \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_{\eta=0}^{\eta=\frac{x}{2\sqrt{a\tau}}} e^{-\eta^2} d\eta, \quad (183)$$

где  $A, B, C, P, q$  — постоянные интегрирования. Они могут быть равны нулю, положительными, отрицательными и мнимыми величинами.

Решение, удовлетворяющее данной конкретной задаче, а также определение постоянных величин интегрирования выполняются на основании начальных и граничных условий (условий однозначности).

Начальным условием называется распределение температуры в теле в какой-либо момент времени (обычно в начальный  $\tau=0$ ). Граничными или поверхностными условиями называются условия, характеризующие изменение температуры на границе (на поверхности) тела или тепловое взаимодействие поверхности тела с окружающей его средой.

Различают поверхностные (граничные) условия: первого рода, если задано распределение температуры на поверхности тела, как функция координат и времени; второго рода, если известна величина теплового потока на поверхности тела; третьего рода, если задана температура среды, окружающей тело, и известен закон теплообмена между поверхностью тела и окружающей средой.

Рассмотрим подробно решение одной конкретной задачи, а затем результаты решения ряда других задач, практически важных и интересных.

## 1. Внезапное однократное изменение температуры поверхности бесконечно толстой стенки

**Начальное условие.** В начальный момент времени (при  $\tau=0$ ) температура в любой точке тела (при  $x=x$ ) одинакова и равна

$$t = t_{\text{нач}} = \text{const.}$$

**Граничные условия** (первого рода). Внезапно температура поверхности (координата  $x$  располагается по направлению теплового потока, т. е. перпендикулярно поверхности, а начало координат принимаем на поверхности стенки) повышается до какого-то значения и остается постоянной, т. е. при  $x=0$  и  $\tau=\tau$ ;  $t=t_{\text{пов}}=\text{const}$  (рис. 45).

Физические параметры материала стенки следующие: коэффициент теплопроводности —  $\lambda$  Вт/м·град; теплоемкость —  $c$  кДж/кг·град; плотность —  $\rho$  кг/м<sup>3</sup>; температуропроводность —

$$a = \frac{\lambda}{c\rho} [\text{м}^2/\text{сек}].$$

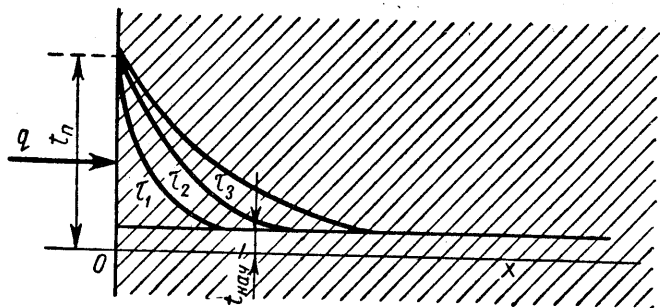


Рис. 45. Схема к задаче о прогреве бесконечно толстой стенки;  $t_1$ ,  $t_2$  и  $t_3$  — распределение температур в различные периоды времени

Для нашего случая подходит последнее решение, в котором выражение

$$\frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\eta} e^{-\tau^2} d\eta \quad (184)$$

называется интегралом Гаусса, или функцией Крампа. Значения его могут быть взяты из графика (рис. 46) или из приложения 3. При  $\eta=0$  значение функции тоже равно 0, при  $\eta \rightarrow \infty$  значение функции равно 1.

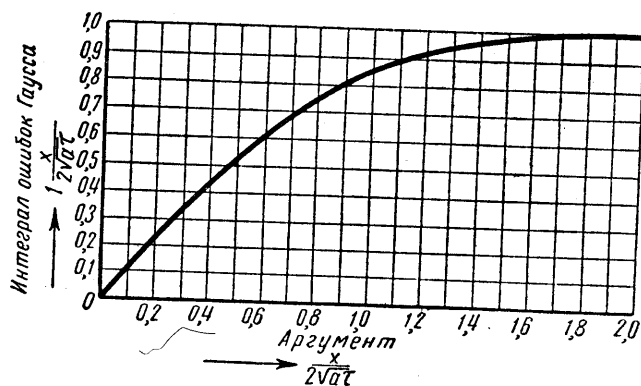


Рис. 46. График значений интеграла ошибок Гаусса  $f \frac{x}{2\sqrt{a\tau}}$  для различных значений аргумента  $\frac{x}{2\sqrt{a\tau}}$

Тогда из граничного условия имеем

$$t_{\text{пов}} = A + Bx + C - \frac{[2]}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\eta} l^{-\tau^2} d\eta = A = \text{const.} \quad (185)$$

Из начального условия имеем

$$t_{\text{нач}} = A + Bx + C = t_{\text{пов}} + Bx + C. \quad (186)$$

Так как согласно условной  $t_{\text{нач}} = \text{const}$ , то постоянная  $B$  должна быть равна нулю и постоянная  $C$  равна

$$C = t_{\text{нач}} - t_{\text{пов}}. \quad (187)$$

Таким образом, решение нашей задачи сведется к решению уравнения

$$t = t_{\text{пов}} + (t_{\text{нач}} - t_{\text{пов}}) \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\eta} l^{-\tau^2} d\eta, \quad (188)$$

или

$$t = t_{\text{пов}} - (t_{\text{пов}} - t_{\text{нач}}) f\left(\frac{x}{2\sqrt{a\tau}}\right), \quad (188a)$$

где  $f\left(\frac{x}{2\sqrt{a\tau}}\right)$  — интеграл Гаусса, или функция Крампа.

Уравнение (188) определяет зависимость температуры от времени  $\tau$  и координаты  $x$ .

Величина теплового потока

$$q = -\lambda \frac{\partial t}{\partial x} = \lambda (t_{\text{пов}} - t_{\text{нач}}) \frac{e^{-\frac{x^2}{4a\tau}}}{\sqrt{\pi a\tau}} = \frac{\sqrt{\lambda c \gamma}}{\sqrt{\pi}} (t_{\text{пов}} - t_{\text{нач}}) \frac{e^{-\frac{x^2}{4a\tau}}}{\sqrt{\tau}} [\text{Вт}/\text{м}^2]. \quad (189)$$

Величину  $b = \sqrt{\lambda c \gamma} \text{ кДж}/\text{м}^2 \cdot \text{сек}^{0,5} \cdot \text{град}$  называют коэффициентом аккумуляции тепла, или коэффициентом термоинерции. Тепловой поток на поверхности стенки при  $x=0$

$$q_{x=0} = \frac{b}{\sqrt{\pi}} \cdot \frac{(t_{\text{пов}} - t_{\text{нач}})}{\sqrt{\tau}} [\text{Вт}/\text{м}^2]. \quad (190)$$

Общее количество тепла, полученное стенкой за время от 0 до  $\tau_1$ , будет равно

$$Q = \int_0^{\tau_1} \frac{b}{\sqrt{\pi}} \cdot \frac{t_{\text{пов}} - t_{\text{нач}}}{\sqrt{\tau}} d\tau = \frac{2b}{\sqrt{\pi}} (t_{\text{пов}} - t_{\text{нач}}) \sqrt{\tau_1} [\text{кДж/м}^2]. \quad (191)$$

В литературе приведено решение этой задачи для более общего случая, когда температура поверхности бесконечно толстой стенки изменяется по закону  $t_{\text{пов}} = \Theta \tau^n$ , а начальная температура  $t_{\text{нач}} = 0$ .

## 2. Нагрев тела при постоянной температуре поверхности

### Первый случай

Начальное условие — при  $\tau = 0$ ,  $t = t_{\text{нач}} = \text{const}$ . Граничное условие (первого рода) — при  $x = \pm s$ ,  $t = t_{\text{пов}} = \text{const}$ . Решение уравнения Фурье для пластины бесконечной протяженности (рис. 47) при этих граничных и начальных условиях выражают следующим бесконечным рядом:

$$t_x = t_{\text{пов}} - (t_{\text{пов}} - t_{\text{нач}}) \frac{4}{\pi} \left[ e^{-\left(\frac{\pi}{2}\right)^2 \frac{a\tau}{s^2}} \cos \frac{\pi x}{2s} - \frac{1}{3} e^{-9\left(\frac{\pi}{2}\right)^2 \frac{a\tau}{s^2}} \cos \frac{3\pi x}{2s} + \frac{1}{5} e^{-25\left(\frac{\pi}{2}\right)^2 \frac{a\tau}{s^2}} \cos \frac{5\pi x}{2s} - \dots \right] [^\circ\text{C}]. \quad (192)$$

Для центра пластины при  $\frac{x}{s} = 0$ :

$$t_{\text{цен}} = t_{\text{пов}} - (t_{\text{пов}} - t_{\text{нач}}) f\left(\frac{a\tau}{s^2}\right) [^\circ\text{C}]. \quad (193)$$

Комплекс величин  $\frac{a\tau}{s^2} = Fo$  носит название критерия Фурье и характеризует подобие при распространении тепла теплопроводностью внутри тела.

Критерий Фурье является одним из критериев гомохронности и называется иногда относительным временем

$$f(Fo) = \frac{t_{\text{пов}} - t_{\text{цен}}}{t_{\text{пов}} - t_{\text{нач}}}. \quad (193a)$$

Значения функции  $f(Fo)$  можно взять из графика рис. 48, на котором приведены также значения функций, определяющих температуру центра цилиндра и шара при мгновенном подъеме температуры поверхности.

Температура по толщине тела распределяется по закону косинуса или закону параболы, поэтому значение температуры в любой точке тела, находящейся на расстоянии  $x$  от центра пластины или  $r$  от оси цилиндра, можно определить по формулам:

$$t_x = t_{\text{цен}} + (t_{\text{пов}} - t_{\text{цен}}) \left(\frac{x}{s}\right)^2 [^\circ\text{C}], \quad (194)$$

$$t_r = t_{\text{цен}} + (t_{\text{пов}} - t_{\text{цен}}) \left(\frac{r}{R}\right)^2 [^\circ\text{C}]. \quad (194a)$$

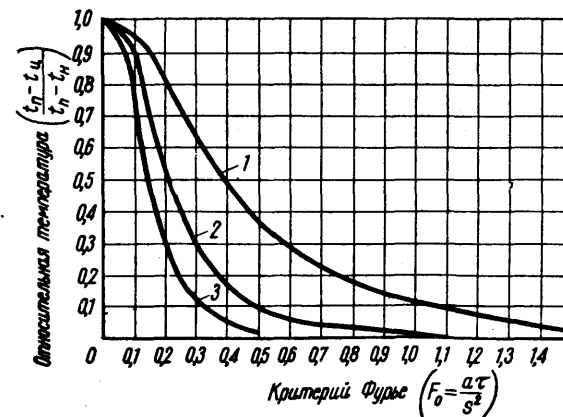


Рис. 48. Изменение относительной температуры центра тела от относительного времени (критерия Фурье) при мгновенном изменении температуры поверхности:

1 — бесконечная пластина; 2 — бесконечный цилиндр; 3 — шар

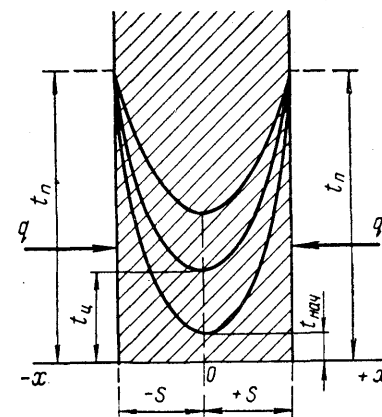


Рис. 47. Схема к задаче о нагреве бесконечной пластины при мгновенном повышении температуры ее поверхностей

Практически рассмотренный случай может быть при нагреве металла в свинцовых и соляных ваннах, для которых интенсивность теплопередачи на поверхность тела велика, а также при нагреве тел с очень малой теплопроводностью.

Второй случай.

Начальное условие во втором случае при  $\tau=0$ : температура распределяется по сечению тела согласно уравнению (194) или (194а).

Граничные условия (первого рода):  $t_{\text{пов}} = \text{const}$ .

Этот случай имеет большое практическое значение, так как соответствует случаю нагрева слитка или заготовки после того, как температура их поверхности достигла заданной величины и остается постоянной, а температура центра приближается к температуре поверхности (так называемая выдержка).

Решение задачи для этого случая можно выразить бесконечным рядом аналогично формуле (192) или формулой

$$\frac{t_{\text{пов}} - t_{\text{цен}}}{t_{\text{пов}} - t_{\text{нач}}} = f'(Fo). \quad (195)$$

Значения  $f'(Fo)$  для пластины и цилиндра в зависимости от  $Fo$  могут быть взяты из графика рис. 49.

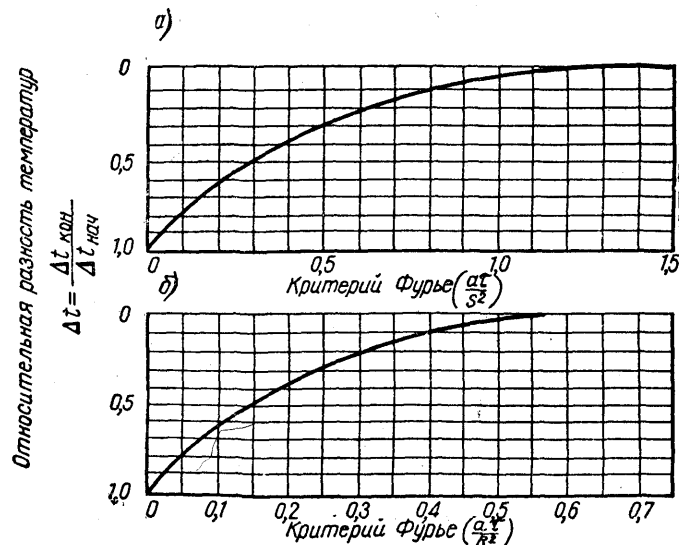


Рис. 49. Кривые выравнивания температур при  $t_{\text{пов}} = \text{const}$  (по Г. П. Иванову):

а — для пластины толщиной  $2s$ ; б — для цилиндра радиусом  $R$

Если отбросить все члены бесконечного ряда, кроме первого (что можно сделать для пластины при  $Fo = \frac{\alpha\tau}{s^2} \gg 0,06$ , а для цилиндра при  $Fo = \frac{\alpha\tau}{R^2} \gg 0,08$ ), то получим:

$$\frac{t_{\text{пов}} - t_{\text{цен}}}{t_{\text{пов}} - t_{\text{нач}}} = 1,03e^{-2,47 \frac{\alpha\tau}{s^2}}; \quad (196)$$

для цилиндра

$$\frac{t_{\text{пов}} - t_{\text{цен}}}{t_{\text{пов}} - t_{\text{нач}}} = 1,11e^{-5,76 \frac{\alpha\tau}{R^2}}. \quad (196a)$$

Величину теплового потока на поверхности тела можно найти по формулам:

для пластины

$$q_{\text{пов}} = \frac{2\lambda}{s} (t_{\text{пов}} - t_{\text{нач}}) F(Fo); \quad (197)$$

для цилиндра

$$q_{\text{пов}} = \frac{2\lambda}{R} (t_{\text{пов}} - t_{\text{нач}}) F'(Fo). \quad (197a)$$

Значения  $F(Fo)$  и  $F'(Fo)$  могут быть взяты из графика на рис. 50.

На рис. 51 приведен график для расчета выравнивания температур в пластине, которую нагревали сначала с двух сторон, а затем температуры по сечению выравнивали при теплопередаче только с одной стороны. Такой случай наблюдается при нагреве слитков и заготовок в трехзонных методических печах, когда I и II зоны оборудованы нижними топками, а III зона — зона выдержки не имеет нижнего обогрева.

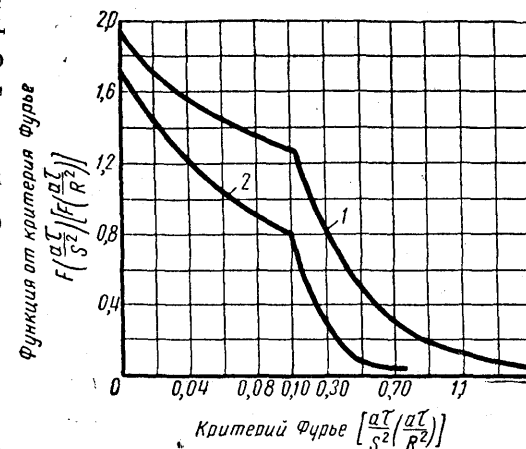


Рис. 50. Функции  $F$  и  $F'$  для определения величины теплового потока на поверхности тела во время «выдержки»:

1 — пластина толщиной  $2s$ ; 2 — цилиндр радиусом  $R$

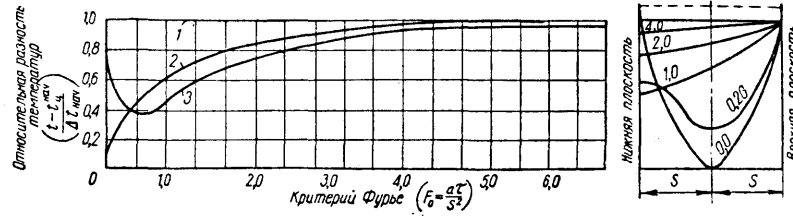


Рис. 51. График выравнивания температур в пластине на нетеплопроводном поду после двустороннего нагрева:

1 — температура верхней поверхности; 2 — температура центра; 3 — температура нижней поверхности

### 3. Нагрев тела при изменении температуры поверхности по закону прямой линии

Начальное условие: при  $\tau=0$ ,  $t=t_{\text{нач}}=0$  или  $t=t_{\text{нач}}=\text{const}$ .

Граничное условие (первого рода):  $t_{\text{пов}}=A\tau$  или

$$t_{\text{пов}} = A\tau + t_{\text{нач}} [^{\circ}\text{C}],$$

где  $A$  — постоянная величина, характеризующая скорость подъема температуры поверхности,  $^{\circ}\text{C}/\text{ч}$ .

Температуру в центре пластины определяем по формуле

$$t_{\text{цен}} = \frac{As^2}{a} f(Fo) [^{\circ}\text{C}], \quad (198)$$

в центре цилиндра — по формуле

$$t_{\text{цен}} = \frac{AR^2}{a} f'(Fo) [^{\circ}\text{C}]. \quad (198a)$$

Значения функций  $f(Fo)$  и  $f'(Fo)$  можно взять на графиках рис. 52, а и б, на котором приведены также значения функции  $\Phi(Fo)$  для определения величины теплового потока на поверхности тела:

$$q_{\text{пов}} = AsC\gamma\Phi(Fo) [\text{вт}/\text{м}^2]. \quad (199)$$

Из графиков видно, что через некоторое время, определяемое для пластины значением критерия Фурье  $Fo = \frac{a\tau}{s^2} \geq 1,0$ , а для цилиндра  $Fo = \frac{a\tau}{R^2} \geq 0,5$ , кривые, характеризующие температуру центра пластины и цилиндра, переходят в прямые, параллельные прямой, характеризующим температуру поверхности, а значение теплового потока на поверхности тела стремится к по-

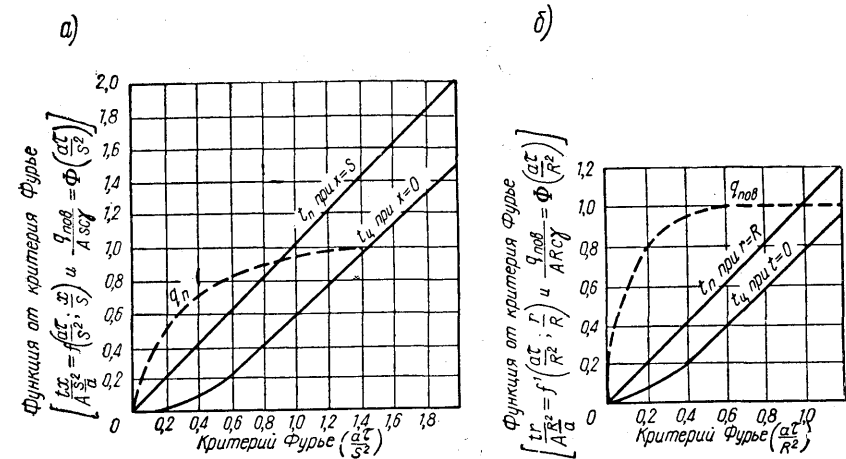


Рис. 52. Графики расчета нагрева пластины толщиной  $2s$  (а) и цилиндра радиусом  $R$  (б) при повышении температуры поверхности с постоянной скоростью  $A$   $^{\circ}\text{C}/\text{ч}$

стоянной величине. В этом случае решение можно записать в виде формулы

$$t_x = A\tau - k_{\Phi} \frac{As^2}{a} \left[ 1 - \left( \frac{x}{s} \right)^2 \right] [^{\circ}\text{C}], \quad (200)$$

где  $k_{\Phi}$  — коэффициент, характеризующий форму тела. Он имеет следующие значения: для пластины бесконечной протяженности  $k_{\Phi}=0,5$ ; для призмы бесконечной длины с отношением сторон

$a:b = 1$	1,5	2
$k_{\Phi} = 0,295$	0,410	0,455;

для цилиндра с отношением высоты к диаметру

$\frac{H}{2R} = 1,0$	1,5	2,0
$k_{\Phi} = 0,201$	0,245	0,25;

для куба —  $k_{\Phi} = 0,221$ ; для шара —  $k_{\Phi} = 0,167$ .

Температура центра тела —  $\frac{x}{s} = 0$

$$t_{\text{цен}} = t_{\text{пов}} - k_{\Phi} \frac{As^2}{a} [^{\circ}\text{C}], \quad (201)$$

а разность температур между поверхностью и центром

$$\Delta t_{\text{мет}} = t_{\text{пов}} - t_{\text{цен}} = k_{\text{ф}} \frac{As^2}{a} \text{ } ^\circ\text{C}. \quad (202)$$

#### 4. Нагрев тела при постоянном тепловом потоке на поверхности (граничное условие второго рода)

Начальное условие при  $\tau=0$ :  $t=t_{\text{нач}}=\text{const}$  или  $t=t_{\text{нач}}=0$ .

Граничное условие:

$$-\lambda \frac{\partial t}{\partial x} \text{ (при } x=\pm s) = q_{\text{пов}} = \text{const}.$$

Температуру в любой точке по сечению пластины в этом случае определяем по формуле

$$t_x = q_{\text{пов}} \frac{s}{\lambda} f\left(Fo; \frac{x}{s}\right), \quad (203)$$

по сечению цилиндра — по формуле

$$t_r = q_{\text{пов}} \frac{R}{\lambda} f'\left(Fo; \frac{r}{R}\right). \quad (203a)$$

Графики для определения значений функций  $f\left(Fo; \frac{x}{s}\right)$  и  $f'\left(Fo; \frac{r}{R}\right)$  в зависимости от критерия Фурье для поверхности  $\frac{x}{s} = \frac{r}{R} = 1$ , центра  $\frac{x}{s} = \frac{r}{R} = 0$  и для половины расстояния от центра до поверхности  $\frac{x}{s} = \frac{r}{R} = 1/2$  приведены на рис. 53.

Из графиков рис. 53, а и б видно, что по истечении некоторого времени, определяемого значением критерия Фурье, для пластины  $Fo \geq 0,4$ , а для цилиндра  $Fo \geq 0,2$ , кривые, характеризующие изменение температуры поверхности и центра, переходят в прямые.

Разность температур между поверхностью и центром при этом можно выразить формулой

$$\Delta t_{\text{мет}} = t_{\text{пов}} - t_{\text{цен}} = q_{\text{пов}} \frac{s}{2\lambda} \text{ } ^\circ\text{C}. \quad (204)$$

По этому уравнению по заданной величине разности температур между поверхностью и центром нагреваемого тела —

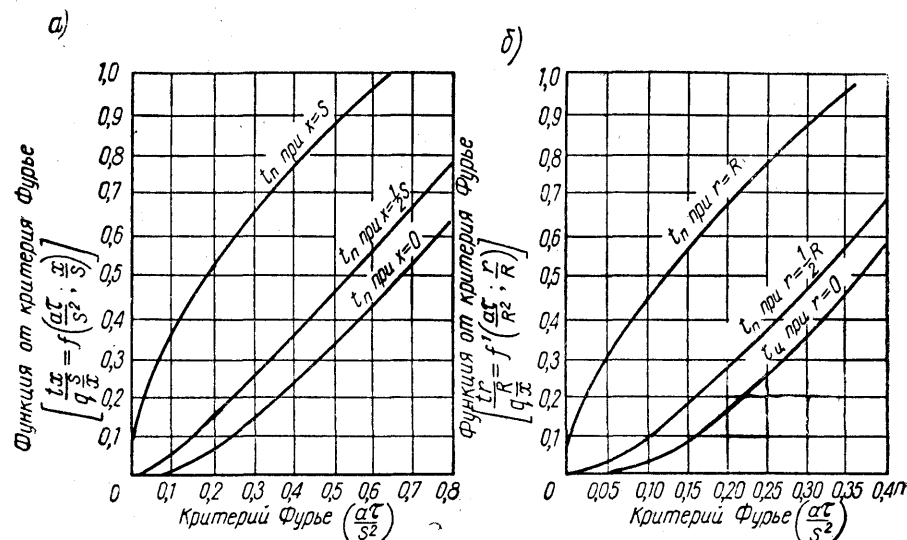


Рис. 53. Графики для определения функции  $f\left(\frac{a\tau}{s^2}\right)$  для пластины (а) и  $f'\left(\frac{a\tau}{R^2}\right)$  для цилиндра (б) при расчете их нагрева с постоянным тепловым потоком на поверхности

$\Delta t_{\text{мет}}$  можно определить величину теплового потока на поверхности тела, а по его значению — необходимую температуру среды (печи).

#### 5. Нагрев тела в среде с постоянной температурой (граничное условие третьего рода)

Начальное условие: при  $\tau=0$   $t=t_{\text{нач}}=\text{const}$ .

Граничное условие: тепловой поток на поверхности пропорционален разности температур между окружающей средой и поверхностью, т. е.

$$q_{\text{пов}} = -\lambda \frac{\partial t}{\partial x} \text{ при } x=\pm s = \alpha_{\text{л+к}} (t_{\text{среды}} - t_{\text{пов}}) [\text{Вт/м}^2], \quad (205)$$

где  $\alpha_{\text{л+к}}$  — коэффициент пропорциональности или коэффициент теплоотдачи на поверхности тела (за счет лучеиспускания и конвекции),  $\text{Вт/м}^2 \cdot \text{град}$ .

Решение основного дифференциального уравнения (163) или (163а) при этих условиях в общем виде будет:

$$\Theta = \frac{t_{\text{среды}} - t_x}{t_{\text{среды}} - t_{\text{нач}}} = f\left(Bi; Fo; \frac{x}{s}\right). \quad (206)$$

Значения функций  $f(Bi; Fo)$  для поверхности ( $x = \pm s$  или  $r = R$ ) и для центра ( $x = 0$  или  $r = 0$ ) пластины и цилиндра в зависимости от критериев Био ( $Bi = \frac{\alpha_{\text{л+к}} s}{\lambda}$  для пластины или  $Bi = \frac{\alpha_{\text{л+к}} R}{\lambda}$  для цилиндра) и Фурье приведены на рис. 54—55.

Критерий Био ( $Bi$ ) характеризует соотношение между количеством тепла, получаемым поверхностью, и количеством тепла, отводимым внутрь тела.

Распределение температуры по сечению тела подчиняется, как и во всех описанных случаях, закону параболы, а средняя по массе температура тела равна:

для пластины

$$t_{\text{мет}}^{\text{среды}} = t_{\text{цен}} + \frac{1}{3} \Delta t_{\text{мет}} = t_{\text{пов}} - \frac{2}{3} \Delta t_{\text{мет}}, \quad (207)$$

для цилиндра

$$t_{\text{мет}}^{\text{среды}} = t_{\text{цен}} + \frac{1}{2} \Delta t_{\text{мет}} = t_{\text{пов}} - \frac{1}{2} \Delta t_{\text{мет}}. \quad (207a)$$

Приведенные формулы и графики можно использовать и для случая охлаждения тел в среде с постоянной температурой, т. е. когда  $t_{\text{среды}}$  меньше  $t_{\text{нач}}$ .

Кроме приведенных графиков Д. В. Будрина, известны решения этой задачи другими авторами (Г. П. Иванцов, Н. Ю. Тайц и др.) и соответствующие графики (Гребера — Шака, Генри — Лури, Бахмана и др.).

Проф. Н. Ю. Тайц составил также графики для определения относительной разности температур  $t_{\text{пов}} - t_{\text{цен}} = \Delta t_{\text{мет}}$  при нагреве пластины и цилиндра в среде с постоянной температурой.

В. Н. Соколов решил эту же задачу, но при передаче тепла на поверхность пропорционально разности четвертых степеней абсолютных температур среды и поверхности (закон излучения), т. е. при граничном условии:

$$q_{\text{пов}} = -\lambda \frac{dt}{dx} \text{ при } x = \pm s = C_{\text{прив}} \left[ \left( \frac{T_{\text{среды}}}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_{\text{пов}}}{100} \right)^4 \right] [\text{вт/м}^2], \quad (208)$$

где  $C_{\text{прив}} = \text{const}$  — коэффициент пропорциональности, или приведенный коэффициент лучеиспускания,  $\text{вт/м}^2 \cdot \text{град}^4$ .

Аналитическое решение задачи даем в следующем виде: для поверхности

$$\Theta = \frac{T_{\text{среды}} - T_{\text{пов}}}{T_{\text{среды}}} = f(K_p; K_{\text{вр}}), \quad (209)$$

для центра

$$\Theta' = \frac{T_{\text{среды}} - T_{\text{пов}}}{T_{\text{среды}}} = f'(K_p; K_{\text{вр}}), \quad (210)$$

где  $\Theta$  и  $\Theta'$  — степени незавершенности нагрева поверхности и центра тела. Они являются функциями критериев размера  $K_p$  и времени  $K_{\text{вр}}$ .

Критерий размера  $K_p$  (впервые выведен Г. П. Иванцовым),

$$K_p = 10 \frac{C_{\text{прив}}}{\lambda} \left( \frac{T_{\text{среды}}}{1000} \right)^3 l, \quad (211)$$

где  $l = s$  — половина толщины пластины при равномерном нагреве с обеих сторон, м;

$l = r$  — радиус цилиндра при равномерном всестороннем нагреве, м.

Критерий времени:

$$\begin{aligned} K_{\text{вр}} &= K_p^2 Fo = 100a \left( \frac{C_{\text{прив}}}{\lambda} \right)^2 \left( \frac{T_{\text{среды}}}{1000} \right)^6 \tau = \\ &= 100 \left( \frac{C_{\text{прив}}}{b} \right)^2 \left( \frac{T_{\text{среды}}}{1000} \right)^6 \tau, \end{aligned} \quad (212)$$

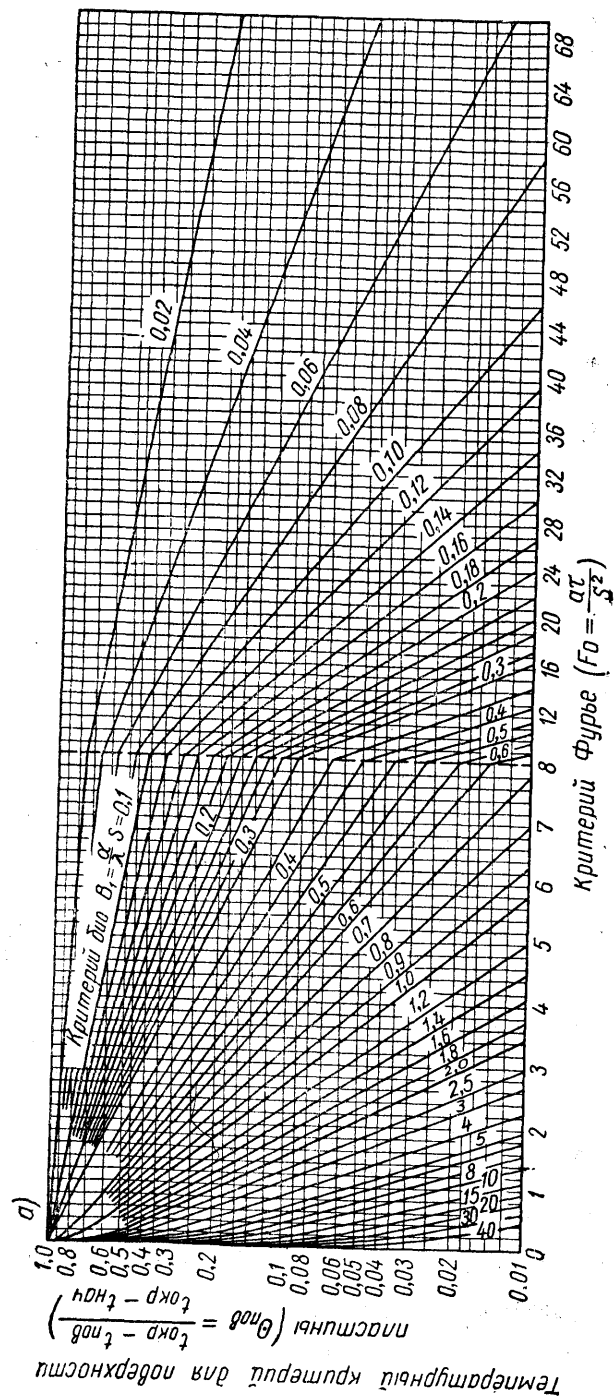
где  $b = \sqrt{\lambda c \gamma}$  [ $\text{кдж/м}^2 \cdot \text{сек}^{0.5} \cdot \text{град}$ ] — коэффициент аккумуляции, или коэффициент термоинерции.

На графиках рис. 56 и 57 приведены зависимости степени незавершенности нагрева пластины и цилиндра от критериев размера и времени при относительной начальной температуре

$$U_0 = \frac{T_{\text{нач}}}{T_{\text{среды}}} = 0,2. \quad (213)$$

В. Н. Соколов приводит также графики для определения степени неравномерности нагрева  $\Delta\Theta = \frac{t_{\text{пов}} - t_{\text{цен}}}{T_{\text{среды}}}$  в зависимости от критериев размера и времени.





6)

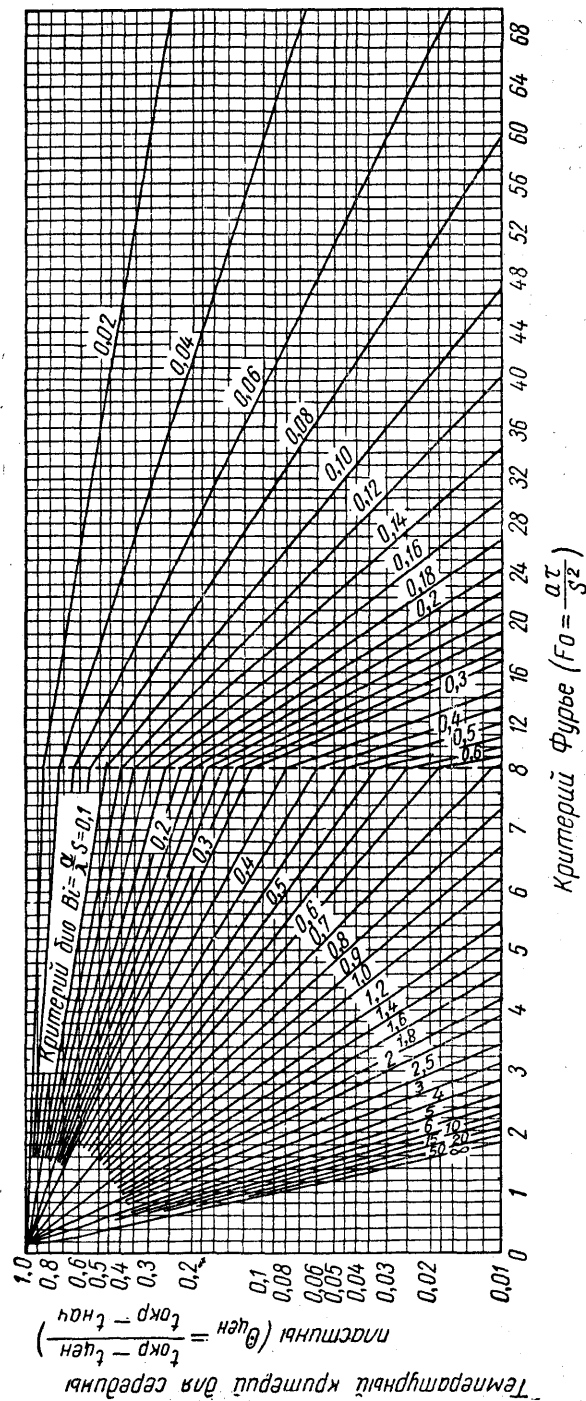


Рис. 54. Графики функций  $f$  ( $Bi$ ;  $Fo$ ) и  $f'$  ( $Bi$ ;  $Fo$ ) для расчета температуры поверхности (а) и центра (б) пластины при нагреве в среде с постоянной температурой (по Д. В. Будрину)

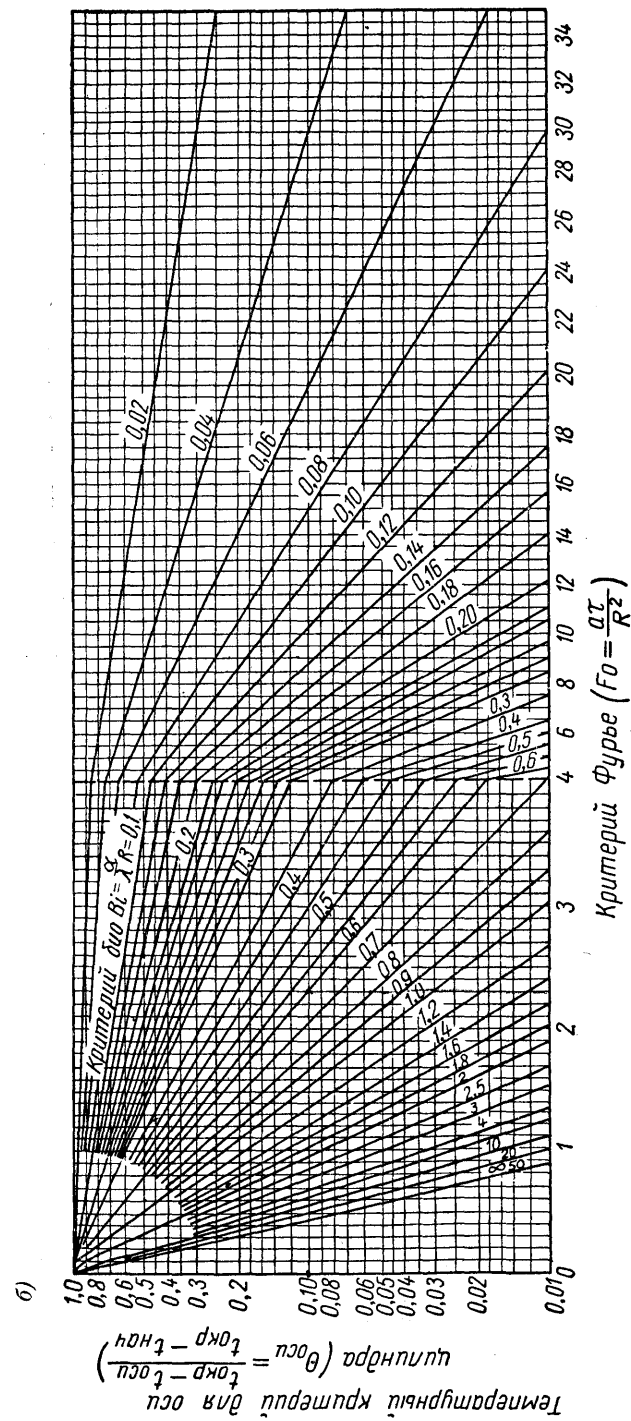
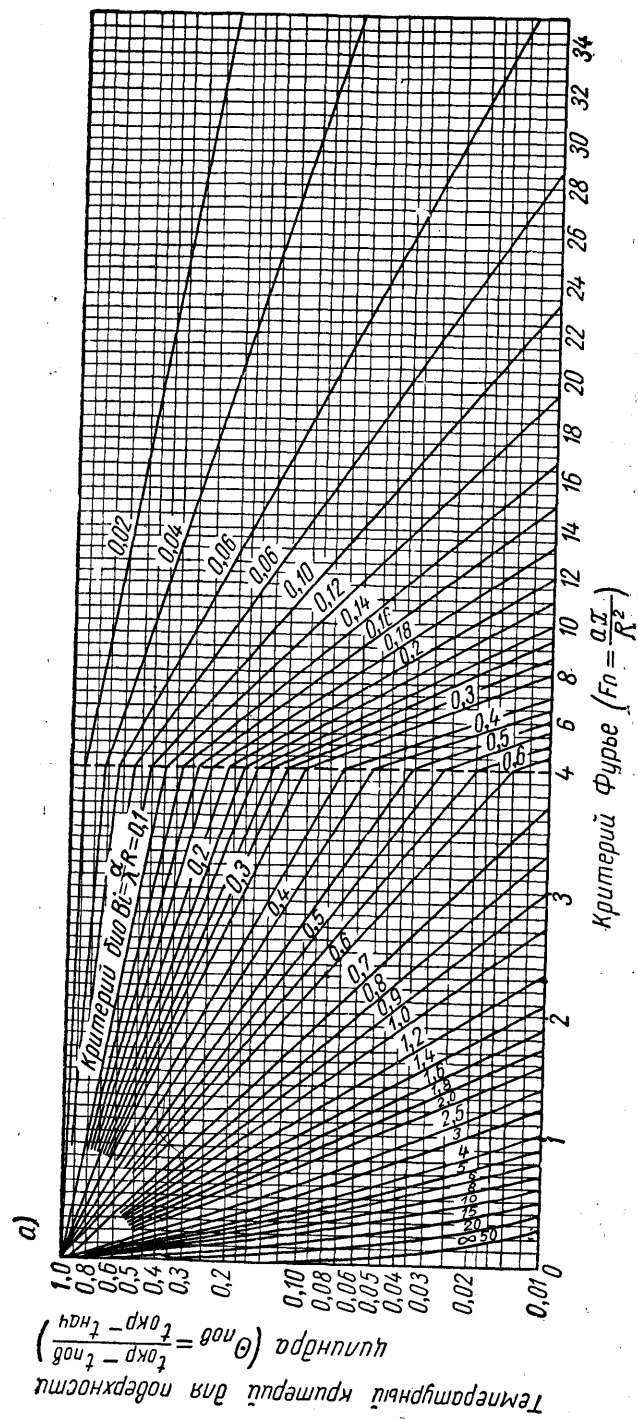
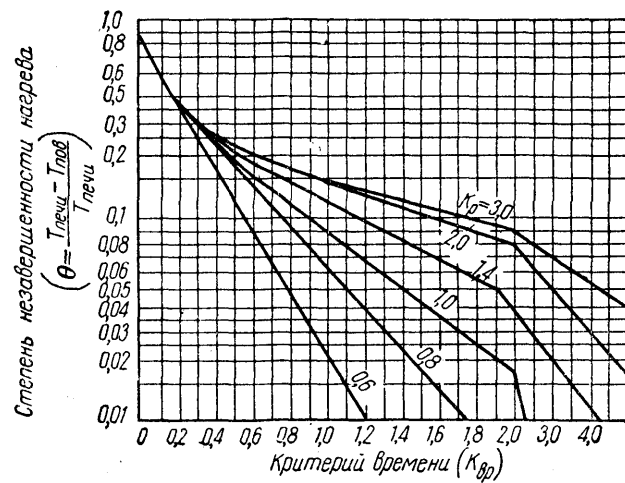


Рис. 55. График функций  $f(Bi; Fo)$  и  $f'(Bi; Fo)$  для расчета температуры поверхности (а) и центра (б) цилиндра при нагреве в среде с постоянной температурой (по Д. В. Будрину)

а)



б)

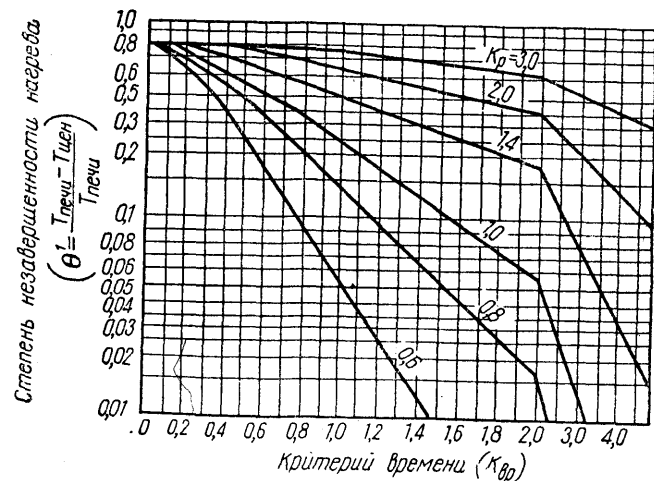
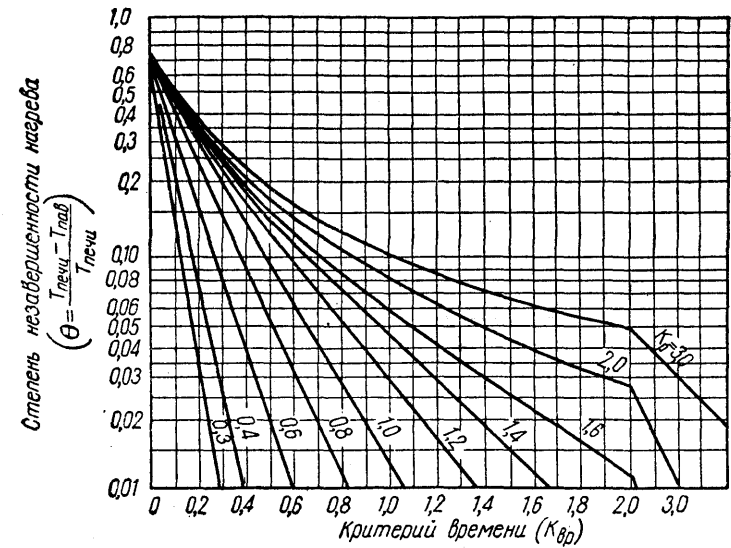


Рис. 56. Графики функций  $\Theta(K_p; K_{\text{вp}})$  и  $\Theta'(K_p; K_{\text{вp}})$  для расчета температуры поверхности (а) и центра (б) пластины при  $U_0=0,2$  (по В. Н. Соколову)

а)



б)

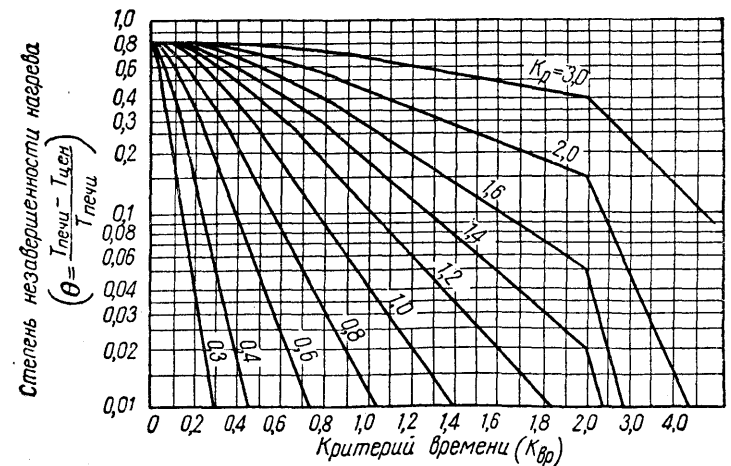


Рис. 57. Графики функций  $\Theta(K_p; K_{\text{вp}})$  и  $\Theta'(K_p; K_{\text{вp}})$  для расчета температуры поверхности (а) и центра (б) цилиндра при  $U=0,2$  (по В. Н. Соколову)

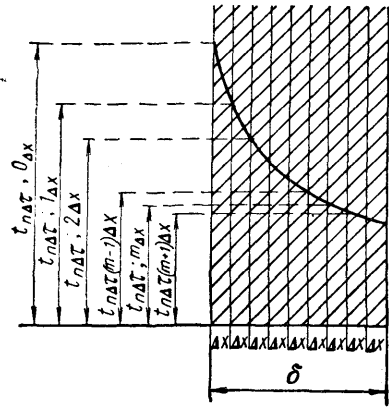


Рис. 58. Схема распределения температур к расчету методом конечных разностей

$$\frac{\Delta t_{\text{при } x=\text{const}}}{\Delta \tau} = a \frac{\Delta^2 t_{\text{при } \tau=\text{const}}}{\Delta x^2}. \quad (214)$$

Нагреваемую или охлаждаемую пластину разделим на ряд слоев толщиной  $\Delta x$  м (рис. 58), а время процесса — на ряд периодов  $\Delta \tau$  ч. Тогда  $t_{n\Delta\tau; m\Delta x}$  будем обозначать температуру через  $n$  периодов от начала процесса на расстоянии  $m\Delta x$  от поверхности пластины, принятой за начало координат ( $0\Delta x$ ) (см. схему на рис. 58).

Пользуясь этой системой обозначений, получим изменение температуры на расстоянии  $m\Delta x$  от поверхности за время от  $n\Delta\tau$  до  $(n+1)\Delta\tau$ .

$$\Delta t_{\text{при } x=\text{const}} = t_{(n+1)\Delta\tau; m\Delta x} - t_{n\Delta\tau; m\Delta x}. \quad (215)$$

Изменение температуры по толщине стенки для момента времени  $n\Delta\tau$  дает

$$\Delta t_{\text{при } \tau=\text{const}} = t_{n\Delta\tau; (m+1)\Delta x} - t_{n\Delta\tau; m\Delta x}. \quad (216)$$

Вторую разность с принятыми обозначениями можно выразить следующим образом:

$$\begin{aligned} \Delta^2 t_{\text{при } \tau=\text{const}} &= (t_{n\Delta\tau; (m+1)\Delta x} - t_{n\Delta\tau; m\Delta x}) - (t_{n\Delta\tau; m\Delta x} - t_{n\Delta\tau; (m-1)\Delta x}) = \\ &= t_{n\Delta\tau; (m+1)\Delta x} - 2t_{n\Delta\tau; m\Delta x} + t_{n\Delta\tau; (m-1)\Delta x}. \end{aligned} \quad (217)$$

## 6. Метод конечных разностей

При сложных начальных и граничных условиях математическое решение уравнения теплопроводности не всегда возможно. В этих случаях задачу иногда можно решить приближенным методом — методом конечных разностей с удовлетворительными для практики результатами.

В основном же дифференциальном уравнении теплопроводности (163а) бесконечно малые приращения заменяем приращениями конечной величины и уравнение принимает следующий вид:

Подставляя полученные выражения для  $\Delta t$  и  $\Delta^2 t$  в основное уравнение (214), будем иметь

$$\frac{t_{(n+1)\Delta\tau; m\Delta x} - t_{n\Delta\tau; m\Delta x}}{\Delta \tau} = a \frac{t_{n\Delta\tau; (m+1)\Delta x} - 2t_{n\Delta\tau; m\Delta x} + t_{n\Delta\tau; (m-1)\Delta x}}{\Delta x^2}. \quad (218)$$

Связывая значения  $\Delta \tau$  и  $\Delta x$  выражением  $2a\Delta\tau = \Delta x^2$ , получим для определения  $t_{(n+1)\Delta\tau; m\Delta x}$  очень простую формулу

$$t_{(n+1)\Delta\tau; m\Delta x} = \frac{1}{2} (t_{n\Delta\tau; (m+1)\Delta x} + t_{n\Delta\tau; (m-1)\Delta x}) [^\circ\text{C}]. \quad (219)$$

Уравнение (219) связывает температуру в какой-то точке пластины в данный момент времени  $(n+1)\Delta\tau$  с температурами соседних точек в предыдущий момент —  $n\Delta\tau$ .

Для определения температур поверхностей пластины это уравнение неприменимо, так как с поверхностью соприкасается другая среда.

Уравнение изменения температуры поверхности во времени должно быть задано или температуру поверхности можно найти, решая совместно уравнение теплоотдачи от поверхности и уравнение для теплового потока через первый слой от поверхности.

Если принять закон передачи тепла на поверхность (или с поверхности)  $q = \alpha_{\text{л+к}} (t_{\text{среды}} - t_{n\Delta\tau; 0\Delta x})$  [вт/м<sup>2</sup>], то для определения температуры поверхности  $t_{n\Delta\tau; 0\Delta x}$  будем иметь выражение:

$$t_{n\Delta\tau; 0\Delta x} = \frac{\alpha_{\text{л+к}} \Delta x \cdot t_{\text{среды}} + \lambda t_{n\Delta\tau; 1\Delta x}}{\lambda + \alpha_{\text{л+к}} \Delta x}. \quad (220)$$

Метод конечных разностей можно применять и для двухслойной стенки, но в этом случае второй слой уже нельзя делить на произвольные слои, так как интервалы времени  $\Delta \tau$  должны быть одинаковыми для первого и второго слоев:

$$\Delta \tau = \frac{\Delta x_1^2}{2a_1} = \frac{\Delta x_2^2}{2a_2}, \quad (221)$$

откуда

$$\Delta x_2 = \Delta x_1 \sqrt{\frac{a_2}{a_1}} [м]. \quad (222)$$

Температуру же на границе слоев определяют по уравнению

$$t_{n\Delta\tau; 0\Delta x_2} = \frac{\frac{\Delta x_2}{\lambda_2} t_{n\Delta\tau; (m-1)\Delta x_1} + \frac{\Delta x_1}{\lambda_1} t_{n\Delta\tau; 1\Delta x_2}}{\frac{\Delta x_1}{\lambda_1} + \frac{\Delta x_2}{\lambda_2}}. \quad (223)$$

Для иллюстрации метода конечных разностей приводим пример расчета разогрева стенки печи.

Толщина стенки — 350 мм (1½ кирпича).

Материал — шамот. Физические параметры его принимаем: теплопроводность — 1,163 вт/м·град; теплоемкость —  $c = 0,942$  кдж/кг·град; плотность  $\rho = 1800$  кг/м³.

Определим распределение температур в стенке через 10 ч от начала разогрева и количество тепла, необходимое за это время на нагрев стенки и выделенное в окружающее пространство.

Начальная температура стенки и температура окружающего воздуха равны 0°С.

Температура внутренней поверхности стенки (0·Δx) поднимается за 9000 сек (2,5 часа) до 1250°С (по 0,14 град/сек), а затем остается постоянной.

С наружной поверхности стенки тепло передается в окружающий воздух при  $\alpha_{л+к} = 16,3$  вт/м²·град.

Разделим стенку на пять слоев. Тогда

$$\Delta x = \frac{0,35}{5} = 0,07 \text{ м.}$$

Интервалы времени

$$\Delta \tau = \frac{\Delta x^2}{2a} = \frac{0,07^2}{2 \cdot \frac{1,163}{942 \cdot 1800}} \approx 3600 \text{ сек.}$$

Таблица 29

Распределение температур в стенке в разные моменты времени

Время		Расстояние от внутренней поверхности стенки					
Δτ	Часы	0·Δx=0 м	1·Δx=0,07 м	2·Δx=0,14 м	3·Δx=0,21 м	4·Δx=0,28 м	5·Δx=0,35 м
0	0	0	0	0	0	0	0
1	1,0	500	0	0	0	0	0
2	2,0	1000	250	0	0	0	0
3	3,0	1250	500	125	0	0	0
4	4,0	1250	687,5	150	62,5	0	0
5	5,0	1250	750	375	125	31,0	0
6	6,0	1250	812,5	437,5	203	62,5	31,5
7	7,0	1250	842	508	250	117	59,0
8	8,0	1250	879	546	312,5	154,5	78,0
9	9,0	1250	898	596	350	195	98,5
10	10,0	1250	923	624	395,5	224	113,0

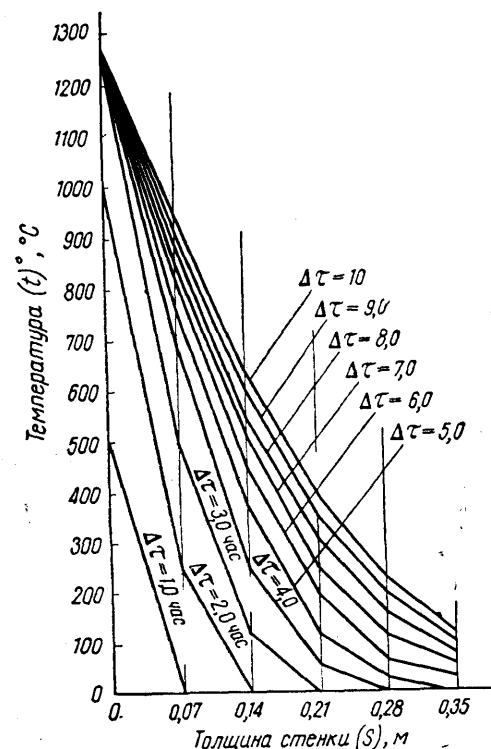


Рис. 59. График разогрева стенки печи, построенный по методу конечных разностей

Температуры на границах слоев определяем по формуле (219) и заносим в таблицу (табл. 29).

Температуры на наружной поверхности (5·Δx) стенки вычисляются по уравнению (220).

Например, для  $\Delta \tau = 6$  имеем:

$$t_{6\Delta \tau; 5\Delta x} = \frac{\alpha_{л+к} \Delta x t_{срелы} + \lambda t_{6\Delta \tau; 4\Delta x}}{\lambda + \alpha_{л+к} \cdot \Delta x} = \frac{16,3 \cdot 0,07 \cdot 0 + 1,163 \cdot 62,5}{1,163 + 16,3 \cdot 0,07} = 31,5 [\text{град}].$$

Результаты расчета приведены также на рис. 59. Количество тепла, аккумулированное стенкой за 36 000 сек, равно

$$Q_{\text{акк}} = \Sigma \gamma c \cdot \Delta x \Delta t = \gamma c \cdot \Delta x \cdot \Sigma \Delta t = 1800 \cdot 0,942 \cdot 0,07 \times \\ \times \left[ \left( \frac{1250 + 923}{2} - 0 \right) + \left( \frac{923 + 624}{2} - 0 \right) + \left( \frac{624 + 395,5}{2} - 0 \right) + \right. \\ \left. + \left( \frac{395,5 + 224}{2} - 0 \right) + \left( \frac{224 + 113}{2} - 0 \right) \right] = 339 131 \text{ кдж/м}^2.$$

Потеря тепла с наружной поверхности стенки в окружающее пространство

$$Q_{\text{луч+конв}} = \Sigma \alpha_{\text{л+к}} (t_{\text{пл+т}} - t_{\text{сред}}) \Delta \tau = \\ = \alpha_{\text{л+к}} \Delta \tau \Sigma (t_{\text{пл+т}} - t_{\text{сред}}) = 16,3 \cdot 3600 \times \\ \times \left[ \left( \frac{0 + 31,5}{2} - 0 \right) + \left( \frac{31,5 + 59}{2} - 0 \right) + \left( \frac{59 + 78}{2} - 0 \right) + \right. \\ \left. + \left( \frac{78 + 98,5}{2} - 0 \right) + \left( \frac{98,5 + 113}{2} - 0 \right) \right] = 19 510 \text{ кдж/м}^2 \text{ за } 36 000 \text{ сек.}$$

## § 27. КОНВЕКЦИЯ

Сущность передачи тепла конвекцией заключается в том, что тепло переносится вследствие движения частиц жидкости или газа. Поэтому передача тепла конвекцией тесно связана с характером движения этих частиц и может совершаться только между поверхностью твердого тела и окружающей ее жидкостью (или газом).

В соответствии с характером движения жидкости или газа различают свободную конвекцию (теплопередача при свободном движении жидкости или газа) или вынужденную конвекцию (теплопередача при вынужденном движении жидкости или газа).

Вынужденная конвекция в соответствии с режимом движения делится на теплоотдачу конвекцией при ламинарном режиме и теплоотдачу конвекцией при турбулентном режиме.

Тепловой поток при теплопередаче конвекцией по предположению, высказанному еще Ньютоном, считают пропорциональным разности температур поверхности и окружающей ее жидкости (или газа) или, наоборот, (если тепло передается от жидкости или газа к поверхности тела):

$$q_k = \alpha_k (t_{\text{макс}} - t_{\text{мин}}) [\text{вт/м}^2], \quad (224)$$

где  $t_{\text{макс}} - t_{\text{мин}} = \Delta t$  — разность температур между нагретыми телами;

$\alpha_k$  — коэффициент пропорциональности, или коэффициент теплоотдачи конвекцией, [ $\text{вт/м}^2 \cdot \text{град}$ ]. Значения коэффициента могут колебаться в широких пределах в зависимости от характера движения жидкости или газа и от ряда других факторов.

Исследования теплоотдачи конвекцией посвящены в основном методам определения этого коэффициента.

Необходимо отметить, что формула (224) имеет условный характер и не отражает всей физической сущности процесса, так как во многих случаях  $\alpha_k$  зависит также от  $\Delta t$ .

### Свободная конвекция

При свободной конвекции в жидкостях и газах, окружающих поверхность теплоотдающего или тепловоспринимающего тела, благодаря изменению плотности частиц, соприкасающихся с поверхностью, возникают вертикальные потоки. При  $t_w > t_f$  (где  $t_w$  — температура поверхности, а  $t_f$  — температура жидкости или газа в °C) частицы будут двигаться вдоль поверхности вверх, а при  $t_f > t_w$  — вниз. Свободное движение частиц зависит от теплообмена: чем интенсивнее теплообмен, тем интенсивнее и движение.

Вначале течение частиц вдоль поверхности имеет струйчатый ламинарный характер. Далее по направлению движения толщина движущегося слоя увеличивается и характер движения частиц становится неустойчивым, волновым, локонообразным, а затем переходит в вихревой, турбулентный, с отрывом вихрей от стенки. С изменением характера движения частиц изменяется теплоотдача.

При ламинарном режиме с увеличением толщины слоя коэффициент теплоотдачи по направлению движения падает, а затем при локонообразном и турбулентном режиме быстро возрастает и остается постоянным (рис. 60).

Характер движения воздуха около нагретых горизонтальных труб показан на рис.

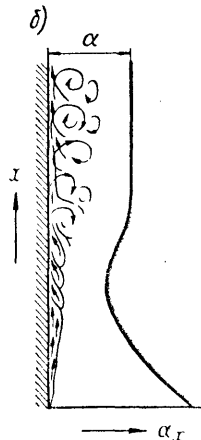
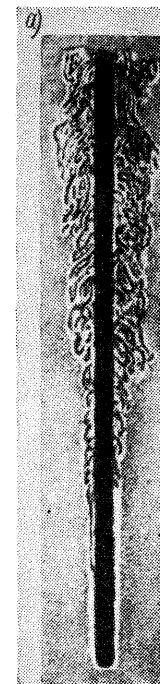


Рис. 60. Характер движения частиц (а) и изменение коэффициента теплоотдачи  $\alpha_k$  при свободном движении воздуха по высоте вертикальной трубы



Результаты расчета приведены также на рис. 59. Количество тепла, аккумулированное стенкой за 36 000 сек, равно

$$q_{\text{акк}} = \Sigma \gamma c \cdot \Delta x \Delta t = \gamma c \cdot \Delta x \cdot \Sigma \Delta t = 1800 \cdot 0,942 \cdot 0,07 \times \\ \times \left[ \left( \frac{1250 + 923}{2} - 0 \right) + \left( \frac{923 + 624}{2} - 0 \right) + \left( \frac{624 + 395,5}{2} - 0 \right) + \right. \\ \left. + \left( \frac{395,5 + 224}{2} - 0 \right) + \left( \frac{224 + 113}{2} - 0 \right) \right] = 339 131 \text{ кДж/м}^2.$$

Потеря тепла с наружной поверхности стенки в окружающее пространство

$$q_{\text{луч+конв}} = \Sigma \alpha_{\text{л+к}} (t_{\text{н}\Delta\tau; \tau\Delta x} - t_{\text{сред}}) \Delta \tau = \\ = \alpha_{\text{л+к}} \Delta \tau \Sigma (t_{\text{н}\Delta\tau; \tau\Delta x} - t_{\text{сред}}) = 16,3 \cdot 3600 \times \\ \times \left[ \left( \frac{0 + 31,5}{2} - 0 \right) + \left( \frac{31,5 + 59}{2} - 0 \right) + \left( \frac{59 + 78}{2} - 0 \right) + \right. \\ \left. + \left( \frac{78 + 98,5}{2} - 0 \right) + \left( \frac{98,5 + 113}{2} - 0 \right) \right] = 19 510 \text{ кДж/м}^2 \text{ за } 36 000 \text{ сек.}$$

## § 27. КОНВЕКЦИЯ

Сущность передачи тепла конвекцией заключается в том, что тепло переносится вследствие движения частиц жидкости или газа. Поэтому передача тепла конвекцией тесно связана с характером движения этих частиц и может совершаться только между поверхностью твердого тела и окружающей ее жидкостью (или газом).

В соответствии с характером движения жидкости или газа различают свободную конвекцию (теплопередача при свободном движении жидкости или газа) или вынужденную конвекцию (теплопередача при вынужденном движении жидкости или газа).

Вынужденная конвекция в соответствии с режимом движения делится на теплоотдачу конвекцией при ламинарном режиме и теплоотдачу конвекцией при турбулентном режиме.

Тепловой поток при теплопередаче конвекцией по предположению, высказанному еще Ньютоном, считают пропорциональным разности температур поверхности и окружающей ее жидкости (или газа) или, наоборот, (если тепло передается от жидкости или газа к поверхности тела):

$$q_k = \alpha_k (t_{\text{макс}} - t_{\text{мин}}) [\text{Вт/м}^2], \quad (224)$$

где  $t_{\text{макс}} - t_{\text{мин}} = \Delta t$  — разность температур между нагретыми телами;

$\alpha_k$  — коэффициент пропорциональности, или коэффициент теплоотдачи конвекцией,  $[\text{Вт/м}^2 \cdot \text{град}]$ . Значения коэффициента могут колебаться в широких пределах в зависимости от характера движения жидкости или газа и от ряда других факторов.

Исследования теплоотдачи конвекцией посвящены в основном методам определения этого коэффициента.

Необходимо отметить, что формула (224) имеет условный характер и не отражает всей физической сущности процесса, так как во многих случаях  $\alpha_k$  зависит также от  $\Delta t$ .

### Свободная конвекция

При свободной конвекции в жидкостях и газах, окружающих поверхность теплоотдающего или тепловоспринимающего тела, благодаря изменению плотности частиц, соприкасающихся с поверхностью, возникают вертикальные потоки. При  $t_w > t_f$  (где  $t_w$  — температура поверхности, а  $t_f$  — температура жидкости или газа в °C) частицы будут двигаться вдоль поверхности вверх, а при  $t_f > t_w$  — вниз. Свободное движение частиц зависит от теплообмена: чем интенсивнее теплообмен, тем интенсивнее и движение.

Вначале течение частиц вдоль поверхности имеет струйчатый ламинарный характер. Далее по направлению движения толщина движущегося слоя увеличивается и характер движения частиц становится неустойчивым, волновым, локонообразным, а затем переходит в вихревой, турбулентный, с отрывом вихрей от стенки. С изменением характера движения частиц изменяется теплоотдача.

При ламинарном режиме с увеличением толщины слоя коэффициент теплоотдачи по направлению движения падает, а затем при локонообразном и турбулентном режиме быстро возрастает и остается постоянным (рис. 60).

Характер движения воздуха около нагретых горизонтальных труб показан на рис.

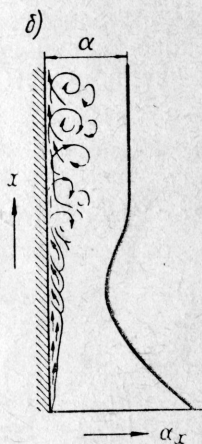


Рис. 60. Характер движения частиц (а) и изменение коэффициента теплоотдачи  $\alpha_k$  (б) при свободном движении воздуха по высоте вертикальной трубы

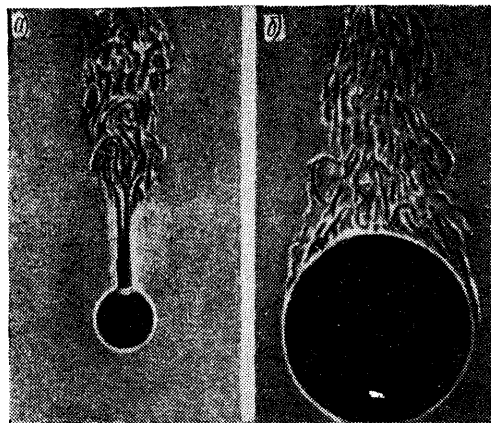


Рис. 61. Свободное движение воздуха около нагретых горизонтальных труб:  
а — при  $d=28$  мм; б — при  $d=250$  мм

дуть только по краям, что сильно замедляет движение частиц и ухудшает теплопередачу.

Обобщение исследований теплоотдачи при свободной конвекции, выполненное акад. М. А. Михеевым и другими авторами на основе теории подобия, дает следующее критериальное соотношение в общем виде:

$$Nu = C (Gr_f Pr_f)^n \left( \frac{Pr_f}{Pr_w} \right)^{0.25}, \quad (225)$$

где  $Nu = \frac{al}{\lambda_f}$  — критерий Нуссельта, в котором

$l$  — определяющий размер-диаметр  $d$  для горизонтальной трубы,

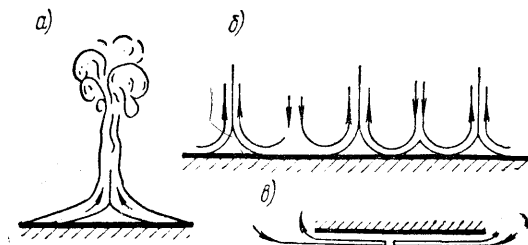


Рис. 62. Характер свободного движения жидкости (или газа) около нагретых горизонтальных поверхностей:

а — узкая горизонтальная поверхность; б — широкая горизонтальная поверхность; в — горизонтальная поверхность, обращенная вниз

61, а и б, а около горизонтальных поверхностей, обращенных вверх и вниз, — на рис. 62. Если поверхность имеет большие размеры, то вследствие сплошного потока жидкости (или газа) с краев центральная часть ее оказывается изолированной. Доступ к ней частиц холодной жидкости (или газа) происходит за счет нисходящих потоков (рис. 62, б).

Если нагретая поверхность обращена вниз, то отвод нагретых частиц может происхо-

дить только по краям, что сильно замедляет движение частиц и ухудшает теплопередачу. Обобщение исследований теплоотдачи при свободной конвекции, выполненное акад. М. А. Михеевым и другими авторами на основе теории подобия, дает следующее критериальное соотношение в общем виде:

где  $Nu = \frac{al}{\lambda_f}$  — критерий Нуссельта, в котором  $l$  — определяющий размер-диаметр  $d$  для горизонтальной трубы, высота  $h$  для вертикальной трубы или вертикальной плоскости, для горизонтальной пластины — ее меньшая сторона;

$\lambda_f$  — коэффициент теплопроводности жидкости или газа,  $вт/м \cdot град$ . Индекс  $f$  означает здесь и в других местах, что физический параметр взят при темпе-

ратуре жидкости или газа, а индекс  $w$  показывает, что параметр взят при температуре поверхности

$$Gr = \frac{l^3 g (t_w - t_f) \beta}{\nu^2}, \quad \text{для газа } Gr = \frac{l^3 \gamma^2 (t_w - t_f)}{\mu^2 g T_m} \quad (227)$$

— критерий Грасгофа, характеризующий процесс свободного движения частиц жидкости или газа, в который входят следующие условные обозначения:

$g$  — ускорение силы тяжести, равное  $9,81$  м/сек<sup>2</sup>;  
 $\beta$  — коэффициент объемного расширения,  $1/град$ ;  
 $\nu$  — коэффициент кинематической вязкости,  $м^2/сек$ ;  
 $\mu$  — коэффициент абсолютной вязкости,  $н \cdot сек/м^2$ ;  
 $\gamma$  — удельный вес жидкости или газа,  $н/м^3$ ;

$$T_m = \frac{T_w + T_f}{2} \text{ — средняя абсолютная температура;}$$

$$Pr = \frac{\nu}{a} \text{ — критерий Прандтля,}$$

где  $a$  — коэффициент температуропроводности,  $м^2/сек$ ;

$C$  и  $n$  — постоянные, связанные с величиной произведения  $Gr_f Pr_f$  и формой поверхности.

При  $10^3 < (Gr_f Pr_f) < 10^9$  (ламинарный режим)  $n=0,25$ ,  $c=0,5$  для горизонтальных труб и  $c=0,76$  для вертикальных поверхностей.

При  $(Gr_f Pr_f) > 10^9$  (турбулентный режим)  $n=0,33=1/3$ ,  $c=0,15$  для горизонтальных труб и вертикальных поверхностей.

Для газов  $Pr = \text{const}$ ,  $\frac{Pr_f}{Pr_w} = 1$  и поэтому критериальные

уравнения упрощаются.

При расчете теплоотдачи от наружных поверхностей стенок печей к воздуху можно также пользоваться следующими приближенными формулами:

$$\left. \begin{aligned} &\text{для горизонтальных поверхностей,} \\ &\text{обращенных вверх,} \\ &\alpha_k = 3,26 \sqrt[4]{\Delta t} \text{ [вт/м}^2 \cdot \text{град]}; \\ &\text{для вертикальных поверхностей} \\ &\alpha_k = 2,56 \sqrt[4]{\Delta t} \text{ [вт/м}^2 \cdot \text{град]}; \\ &\text{для горизонтальных поверхностей,} \\ &\text{обращенных вниз,} \\ &\alpha_k = 1,68 \sqrt[4]{\Delta t} \text{ [вт/м}^2 \cdot \text{град]}. \end{aligned} \right\} \quad (228)$$



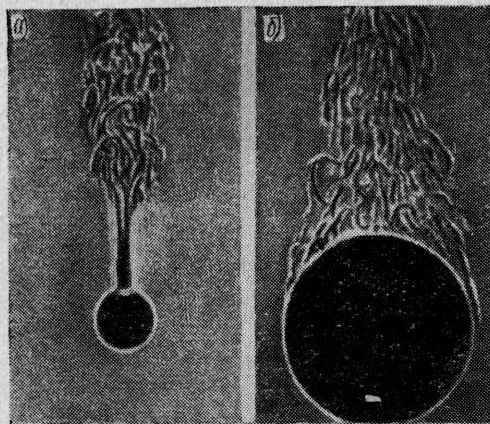


Рис. 61. Свободное движение воздуха около нагретых горизонтальных труб:  
а — при  $d=28$  мм; б — при  $d=250$  мм

дуть только по краям, что сильно замедляет движение частиц и ухудшает теплопередачу.

Обобщение исследований теплоотдачи при свободной конвекции, выполненное акад. М. А. Михеевым и другими авторами на основе теории подобия, дает следующее критериальное соотношение в общем виде:

$$Nu = C (Gr_f Pr_f)^n \left( \frac{Pr_f}{Pr_w} \right)^{0,25}, \quad (225)$$

где  $Nu = \frac{\alpha l}{\lambda_f}$  — критерий Нуссельта, в котором

$l$  — определяющий размер-диаметр  $d$  для горизонтальной трубы,

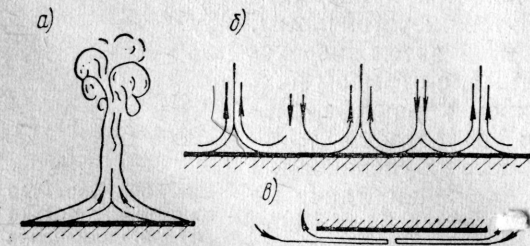


Рис. 62. Характер свободного движения жидкости (или газа) около нагретых горизонтальных поверхностей:

а — узкая горизонтальная поверхность; б — широкая горизонтальная поверхность; в — горизонтальная поверхность, обращенная вниз

61, а и б, а около горизонтальных поверхностей, обращенных вверх и вниз, — на рис. 62. Если поверхность имеет большие размеры, то вследствие сплошного потока жидкости (или газа) с краев центральная часть ее оказывается изолированной. Доступ к ней частиц холодной жидкости (или газа) происходит за счет нисходящих потоков (рис. 62, б).

Если нагретая поверхность обращена вниз, то отвод нагретых частиц может происхо-

дить только по краям, что сильно замедляет движение частиц и ухудшает теплопередачу. Обобщение исследований теплоотдачи при свободной конвекции, выполненное акад. М. А. Михеевым и другими авторами на основе теории подобия, дает следующее критериальное соотношение в общем виде:

где  $Nu = \frac{\alpha l}{\lambda_f}$  — критерий Нуссельта, в котором  $l$  — определяющий размер-диаметр  $d$  для горизонтальной трубы, высота  $h$  для вертикальной трубы или вертикальной плоскости, для горизонтальной пластины — ее меньшая сторона;

$\lambda_f$  — коэффициент теплопроводности жидкости или газа,  $вт/м \cdot град$ . Индекс  $f$  означает здесь и в других местах, что физический параметр взят при темпе-

ратуре жидкости или газа, а индекс  $w$  показывает, что параметр взят при температуре поверхности

$$Gr = \frac{l^3 g (t_w - t_f) \beta}{\nu^2}, \text{ для газа } Gr = \frac{l^3 \gamma^2 (t_w - t_f)}{\mu^2 g T_m} \quad (227)$$

— критерий Грасгофа, характеризующий процесс свободного движения частиц жидкости или газа, в который входят следующие условные обозначения:

$g$  — ускорение силы тяжести, равное  $9,81$  м/сек<sup>2</sup>;  
 $\beta$  — коэффициент объемного расширения,  $1/град$ ;  
 $\nu$  — коэффициент кинематической вязкости, м<sup>2</sup>/сек;  
 $\mu$  — коэффициент абсолютной вязкости, н · сек/м<sup>2</sup>;  
 $\gamma$  — удельный вес жидкости или газа, н/м<sup>3</sup>;

$$T_m = \frac{T_w + T_f}{2} \text{ — средняя абсолютная температура;}$$

$$Pr = \frac{\nu}{a} \text{ — критерий Прандтля,}$$

где  $a$  — коэффициент температуропроводности, м<sup>2</sup>/сек;

$C$  и  $n$  — постоянные, связанные с величиной произведения  $Gr_f Pr_f$  и формой поверхности.

При  $10^3 < (Gr_f Pr_f) < 10^9$  (ламинарный режим)  $n=0,25$ ,  $c=0,5$  для горизонтальных труб и  $c=0,76$  для вертикальных поверхностей.

При  $(Gr_f Pr_f) > 10^9$  (турбулентный режим)  $n=0,33=1/3$ ,  $c=0,15$  для горизонтальных труб и вертикальных поверхностей.

Для газов  $Pr = \text{const}$ ,  $\frac{Pr_f}{Pr_w} = 1$  и поэтому критериальные уравнения упрощаются.

При расчете теплоотдачи от наружных поверхностей стенок печей к воздуху можно также пользоваться следующими приближенными формулами:

$$\left. \begin{aligned} &\text{для горизонтальных поверхностей,} \\ &\text{обращенных вверх,} \\ &\alpha_k = 3,26 \sqrt[4]{\Delta t} \text{ [вт/м}^2 \cdot \text{град]}; \\ &\text{для вертикальных поверхностей} \\ &\alpha_k = 2,56 \sqrt[4]{\Delta t} \text{ [вт/м}^2 \cdot \text{град]}; \\ &\text{для горизонтальных поверхностей,} \\ &\text{обращенных вниз,} \\ &\alpha_k = 1,68 \sqrt[4]{\Delta t} \text{ [вт/м}^2 \cdot \text{град]}. \end{aligned} \right\} \quad (228)$$

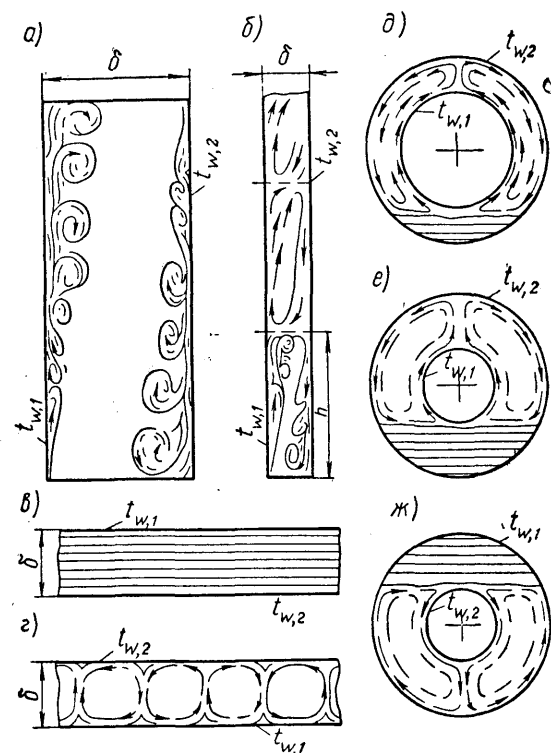


Рис. 63. Характер естественной циркуляции жидкости (или газа) в ограниченном замкнутом пространстве:

а—ж — различные формы замкнутых пространств

При свободной конвекции в ограниченном пространстве (жидкостные и газовые прослойки) характер движения частиц зависит от формы и взаимного расположения нагретых и холодных поверхностей (рис. 63).

Для упрощения расчета количество тепла, передаваемого через прослойку (без учета лучеиспускания), вычисляют по формуле теплопроводности

$$q = \frac{\lambda_{\text{эКВ}}}{\delta} (t_{w_1} - t_{w_2}) [\text{Вт}/\text{м}^2], \quad (229)$$

где  $\delta$  — толщина прослойки, м;  
 $t_{w_1}$  и  $t_{w_2}$  — температуры поверхностей, окружающих прослойку, °С;

$$t_{w_1} - t_{w_2} = \Delta t [^\circ\text{C}];$$

$\lambda_{\text{эКВ}}$  — эквивалентный коэффициент теплопроводности, учитывающий и перенос тепла за счет конвекции;

$$\lambda_{\text{эКВ}} = \epsilon_K \lambda_f [\text{Вт}/\text{м} \cdot \text{град}]; \quad (230)$$

$\epsilon_K$  — коэффициент, учитывающий влияние конвекции. Для приближенной оценки его при  $(Gr Pr) > 10^3$  применяют формулу

$$\epsilon_K = 0,18 (Gr Pr)^{0,25}. \quad (231)$$

Эту формулу можно легко привести к следующему виду:

$$\epsilon_K = A_0 \delta^4 \sqrt{\frac{\Delta t}{\delta}}. \quad (232)$$

Значения  $A_0$  для воздушных прослоек приведены в табл. 30.

Таблица 30

Изменение коэффициента  $A_0$  в зависимости от температуры

$t_m = \frac{t_{w_1} + t_{w_2}}{2}$	0	50	100	200	300	500
$A_0$	20	16	13,7	10,5	8,5	6,1

При  $(Gr Pr) \leq 1$   $\epsilon_K = 1,0$ .

## § 28. ВЫНУЖДЕННАЯ КОНВЕКЦИЯ

При ламинарном течении жидкостей и газов по трубам и каналам  $Re_f \leq 2 \cdot 10^3$ . Если считать, что струи движутся параллельно и нет переноса тепла частицами в направлении, перпендикулярном движению, то теплопередачи происходят только теплопроводностью и  $Nu = \text{const}$ .

В действительности же и при ламинарном режиме движения происходит конвективный перенос тепла в направлении, перпендикулярном скорости движения. Поэтому М. А. Михеев на основании обобщения экспериментальных данных рекомендует следующую критериальную зависимость для определения  $Nu_f$ :

$$Nu_f = 0,15 Re_f^{0,33} Pr_f^{0,43} Gr_f^{0,1} \left( \frac{Pr_f}{Pr_w} \right)^{0,25}. \quad (233)$$

При турбулентном режиме  $Re > 10^4$  критериальное соотношение принимает вид:

$$Nu_f = 0,021 Re_f^{0,8} Pr^{0,43} \left( \frac{Pr_f}{Pr} \right)^{0,25}. \quad (234)$$

Эти формулы применимы при расчете теплопередачи к стенкам труб любой формы поперечного сечения, а также для продольно омываемых пучков труб (при  $L/d_{\text{экв}} > 50$ ). За определяющий размер принимают эквивалентный диаметр  $d_{\text{экв}} = \frac{4F}{\Pi}$ ,

где  $F$  — площадь сечения трубы;

$\Pi$  — полный (смоченный) периметр независимо от того, какая часть его участвует в теплообмене.

При отношении длины трубы к эквивалентному диаметру  $L/d_{\text{экв}} < 50$  значения коэффициента теплоотдачи выше и поэтому вводят поправку  $\varepsilon_L$  (табл. 31), на которую необходимо умножить  $\alpha_k$ , полученный по формуле (234).

Таблица 31

Значения $\varepsilon_L = f(L/d_{\text{экв}}; Re_f)$									
$L/d_{\text{экв}} \backslash Re_f$	1	2	5	10	15	20	30	40	50
$2 \cdot 10^3$	1,90	1,70	1,44	1,28	1,18	1,13	1,05	1,02	1,0
$2 \cdot 10^4$	1,51	1,40	1,27	1,18	1,13	1,10	1,05	1,02	1,0
$1 \cdot 10^5$	1,28	1,22	1,15	1,10	1,08	1,06	1,03	1,02	1,0

При движении газа или жидкости в изогнутых трубах вследствие центробежного эффекта коэффициент теплоотдачи выше. В этих случаях коэффициент теплоотдачи рассчитывают по тем же формулам, что и для прямой трубы, а затем вносят поправочный коэффициент  $\varepsilon_R$ , который для змеевиков определяют из выражения

$$\varepsilon_R = 1 + 1,41 \frac{d}{R}, \quad (235)$$

где  $R$  — радиус змеевика, м;

$d$  — диаметр трубы, м.

При переходном режиме ( $Re = 2000—10\,000$ ) теплоотдачу рассчитывают по методике, указанной М. А. Михеевым.

Практическое значение имеют также формулы для определения коэффициента теплоотдачи при омывании снаружи пучка труб (расчет рекуператоров). Трубы в пучках могут быть рас-

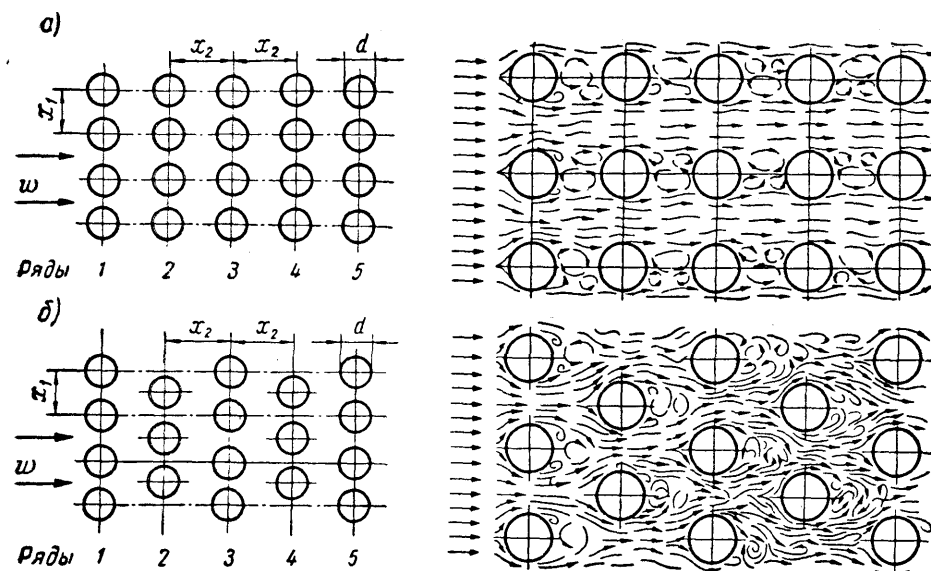


Рис. 64. Схема расположения труб и характер движения жидкости (или газа) в пучках из круглых труб

положены в коридорном (рис. 64, а) и шахматном порядке (рис. 64, б).

Характеристиками пучка являются: диаметр трубы  $d$  и относительные расстояния между осями труб по ширине и длине пучка:

$$l_1 = \frac{x_1}{d} \quad \text{и} \quad l_2 = \frac{x_2}{d}.$$

Условия теплоотдачи изменяются по рядам труб. Вследствие увеличения турбулентности теплоотдача второго и третьего ряда постепенно возрастает по сравнению с первым.

Для третьего и последующих рядов труб коэффициент можно найти из следующих критериальных соотношений: при коридорном пучке

$$Nu_f = 0,23 Re_f^{0,65} Pr_f^{0,33} \left( \frac{Pr_f}{Pr_w} \right)^{0,25}; \quad (236)$$

при шахматном пучке

$$Nu_f = 0,41 Re_f^{0,60} Pr_f^{0,33} \left( \frac{Pr_f}{Pr_w} \right)^{0,25}. \quad (237)$$

Эти формулы справедливы для  $Re_f = 2 \cdot 10^3 \div 2 \cdot 10^5$ .

В данных формулах в качестве определяющей температуры

принята средняя температура жидкости, в качестве определяющей скорости — скорость в самом узком сечении ряда, в качестве определяющего размера — диаметр трубки.

Для трубок первого ряда значение  $\alpha_k$  составляет 60% от полученного по этим формулам, для трубок второго ряда при коридорном расположении в пучке — 90%, а при шахматном — 70%.

Средний коэффициент теплоотдачи для пучка определяют, применяя усредненные значения  $\alpha_k$  для разных рядов

$$\alpha_{\text{пучка}} = \frac{\alpha_1 F_1 + \alpha_2 F_2 + \dots + \alpha_n F_n}{F_1 + F_2 + \dots + F_n} \quad [\text{вт/м}^2 \cdot \text{град}], \quad (238)$$

где  $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n$  — коэффициент теплоотдачи для отдельных рядов;

$F_1, F_2, \dots, F_n$  — поверхность нагрева всех трубок в соответствующем ряду.

В теплообменниках промышленных предприятий вследствие загрязнения поверхностей нагрева обычно коэффициент теплоотдачи уменьшается на 20—25%.

Коэффициенты теплоотдачи конвекцией  $\alpha_k$  в практике обычно находятся в следующих пределах:

Для газов при естественной конвекции	6—116 вт/м <sup>2</sup> ·град
» воды при естественной конвекции	116—1160 „
» газов при движении в трубах и каналах или между трубами	12—350 „
» воды при движении в трубах	600—11 600 „
При кипении воды (пузырчатое)	2320—46 400 „

Теплоотдача конвекцией имеет значение при нагреве металла в низкотемпературных печах  $t_{\text{печи}} \leq 600^\circ \text{C}$ , а также при расчете теплоиспользующих устройств (рекуператоры, регенераторы, воздухоподогреватели и др.).

## § 29. ИЗЛУЧЕНИЕ

### 1. Основные понятия и законы

Тепловое излучение представляет собой один из видов лучистой энергии. Тепловая энергия на поверхности тела превращается частично в электромагнитные колебания, тогда как электромагнитные волны, попадающие на поверхность тела, полностью или частично превращаются в тепловую энергию.

Тепловые лучи являются одной из разновидностей электромагнитных излучений, различающихся длиной волны. Они характеризуются длиной волны  $\lambda$  от 0,4 до 400 мкм (световые лучи

$\lambda \approx 0,4—0,8$  мкм и инфракрасные лучи  $\lambda \approx 0,8—400$  мкм). Более короткие волны имеют ультрафиолетовые лучи ( $\lambda \approx 0,001—0,40$  мкм), лучи Рентгена ( $\lambda = 0,05—1,0$  нм), гамма-лучи ( $\lambda = 0,005—0,05$  нм) и космические лучи ( $\lambda < 0,005$  нм).

Каждое тело непрерывно излучает и поглощает лучистую энергию. Суммарный эффект определяет, будет ли тело нагреваться или охлаждаться вследствие излучения.

Если на поверхность тела падает пучок лучей, несущих определенное количество энергии  $Q$ , то часть этой энергии поглощается телом ( $AQ$ ), часть отражается ( $RQ$ ) и часть может проходить сквозь тело ( $DQ$ ) (рис. 65). При этом имеем

$$A + R + D = 1, \quad (239)$$

где  $A$  — коэффициент поглощения;

$R$  — коэффициент отражения;

$D$  — коэффициент прозрачности.

При  $A=1, A=D=0$  тело поглощает всю падающую на него лучистую энергию. Такое тело называется абсолютно черным телом.

При  $R=1, A=D=0$  тело отражает всю падающую на него лучистую энергию. Такое тело называется абсолютно зеркальным телом.

При  $D=1, A=R=0$  тело будет пропускать насквозь все лучи. Такое тело называется абсолютно прозрачным.

В природе нет абсолютно черных, зеркальных или прозрачных тел. Большее количество неметаллических и все металлические твердые и жидкие тела, встречающиеся в печах и нагревательных устройствах, совершенно непрозрачны. Для них  $D=0$  и  $A+R=1$ . Газообразные продукты горения полупрозрачны. Для них  $R=0$  и  $A+D=1$ .

Чистые двухатомные газы, например воздух, при технических расчетах можно рассматривать абсолютно прозрачными ( $D=1$ ).

Свойствами абсолютно черного тела обладает небольшое отверстие в стенке полого замкнутого тела, так как почти все лучи, попадающие в это отверстие, поглощаются внутренней полостью тела.

Интенсивностью излучения  $I_{0\lambda}$  называется количество энергии, передаваемое волной определенной длины на единицу поверхности в единицу времени. Согласно закону М. Планка, интен-

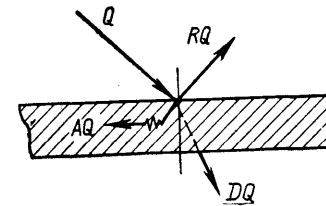


Рис. 65. Схема распределения падающего потока лучистой энергии

сивность излучения абсолютно черного тела связана с длиной волны и температурой по формуле:

$$I_{0\lambda} = \frac{C_1 \lambda^{-5}}{e^{\frac{C_2}{\lambda T}} - 1} [\text{вт/м}^2], \quad (240)$$

где  $T$  — абсолютная температура тела, °К;  
 $C_1$  и  $C_2$  — постоянные Планка:  $C_1 = 3,8 \cdot 10^{-16} \text{ вт} \cdot \text{м}^2$ ;  $C_2 = 1,43 \cdot 10^{-2} \text{ м} \cdot \text{град}$ , или  $1,43 \text{ см} \cdot \text{град}$ .

Графическое выражение закона Планка приведено на рис. 66. Из графика видно, что  $I_{0\lambda}$  с увеличением  $\lambda$  растет до некоторого максимума, а затем убывает. С увеличением температуры максимум смещается в сторону более коротких волн.

По закону Вина (закон смещения), произведение длины волны, несущей максимум энергии, на абсолютную температуру есть величина постоянная:

$$\lambda_{\text{макс}} T = 2,897 \text{ мм} \cdot \text{°К}. \quad (241)$$

При расчетах, связанных с теплопередачей в печах, нас интересует не количество тепла, передаваемое одной волной, а общее количество тепла, передаваемое волнами всех длин — так называемая суммарная интенсивность излучения  $E$ :

$$E = \int_{\lambda=0}^{\lambda=\infty} I_{0\lambda} d\lambda [\text{вт/м}^2]. \quad (242)$$

Подставив в это интегральное уравнение значение  $I_{0\lambda}$  из закона Планка, после преобразования получим для абсолютно черного тела

$$E = 5,67 \cdot 10^{-8} \cdot T^4 = C_{\text{ч.т}} \left( \frac{T}{100} \right)^4 [\text{вт/м}^2]. \quad (243)$$

Эта формула выражает закон Стефана — Больцмана (закон четвертых степеней).

Коэффициент  $C_{\text{ч.т}}$  называется коэффициентом лучеиспускания абсолютно черного тела.

Для реальных — серых тел закон Стефана — Больцмана применяют в следующей форме:

$$E = C \left( \frac{T}{100} \right)^4 [\text{вт/м}^2], \quad (244)$$

где  $C$  — коэффициент лучеиспускания данного тела. Для реальных тел коэффициент  $C$  всегда меньше  $C_{\text{ч.т}} =$

$5,67 \text{ вт/м}^2 \cdot \text{град}$  и зависит не только от материала тела, но и от состояния его поверхности (табл. 32).

Отношение

$$\frac{C}{C_{\text{ч.т}}} = \varepsilon \quad (245)$$

называется степенью черноты тела.

**Закон Ламберта** (закон косинусов). Закон Стефана — Больцмана определяет общее количество тепла, испускаемое телом во всех направлениях. Зависимость же интенсивности излучения от направления лучей по отношению к поверхности излучающего тела определяется законом Ламберта, который формулируется так: количество тепловой энергии, излучаемой элементарной площадью в

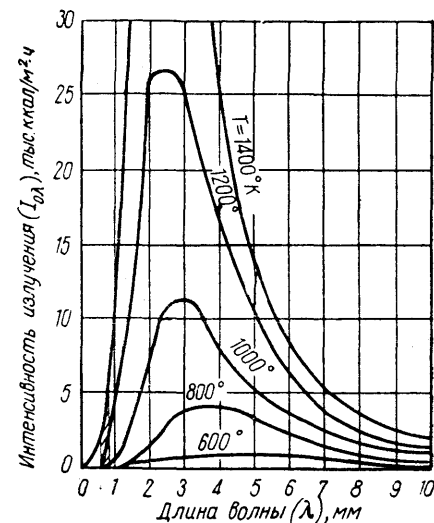


Рис. 66. Графическое выражение закона Планка

Таблица 32

Коэффициент лучеиспускания и степень черноты нормального излучения для различных материалов

Материал	$t, \text{°C}$	$C, \text{вт/м}^2 \cdot \text{град}^4$	$\varepsilon$
Алюминий полированный . . . . .	225—575	0,222—0,324	0,039—0,057
Алюминий, окисленный при 600° С . . . . .	200—600	0,628—1,082	0,11—0,19
Латунная пластина прокатанная . . . . .	22	0,349	0,061
Латунь, окисленная при 600° С . . . . .	200—600	3,361—3,487	0,59—0,61
Медь электролитная полированная . . . . .	80—115	0,1023—0,1314	0,018—0,023
Медь, окисленная при 600° С . . . . .	200—600	3,245—4,954	0,57—0,087
Медь расплавленная . . . . .	1075—1275	0,744—0,907	0,13—0,16
Стальное литье полированное . . . . .	770—1040	2,966—3,187	0,525—0,56
Сталь, окисленная при 600° С . . . . .	200—600	4,559	0,8
Окись железа . . . . .	500—1200	4,838—5,408	0,85—0,95
Чугун обточенный . . . . .	830—990	3,419—3,989	0,6—0,7
Чугун, окисленный при 600° С . . . . .	200—600	3,652—4,443	0,64—0,78
Асбестовая бумага . . . . .	40—370	5,303—5,385	0,93—0,95
Кирпич шамотный глазурованный . . . . .	1100	4,28	0,75
Кирпич динасовый глазурованный . . . . .	1100	4,838	0,85
Стекло гладкое . . . . .	22	5,349	0,94
Сажа ламповая . . . . .	40—370	5,385	0,95

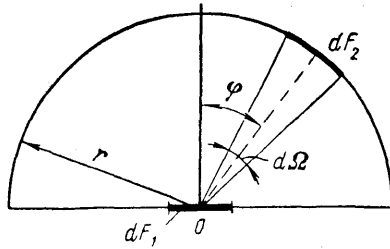


Рис. 67. Схема к выводу закона Ламберта (закона косинусов)

данном направлении, пропорционально количеству тепловой энергии, излучаемой в направлении нормали к этой площадке, умноженному на косинус угла  $\varphi$  между рассматриваемым направлением и нормалью, а также на величину пространственного угла (рис. 67):

$$dQ_\varphi = E_n d\Omega \cos \varphi, \quad (246)$$

где  $dQ_\varphi$  — количество тепловой энергии, или лучистый поток в данном направлении;

$d\Omega$  — величина пространственного угла;

$E_n$  — интенсивность излучения в направлении нормали к излучающей поверхности.

Величину  $E_n$  определяют интегрированием уравнения, выражающего закон Ламберта по поверхности полусферы, и сопоставлением результата с величиной  $E$ , полученной по закону Стефана — Больцмана.

Опуская математические выкладки, получим

$$E_n = \frac{\varepsilon}{\pi} C_{\text{ч.т}} \left( \frac{T}{100} \right)^4 [\text{Вт/м}^2]. \quad (247)$$

Подставляя это значение в уравнение (246), найдем

$$dQ_\varphi = \frac{\varepsilon}{\pi} C_{\text{ч.т}} \left( \frac{T}{100} \right)^4 d\Omega \cos \varphi. \quad (248)$$

Закон Ламберта строго справедлив для абсолютно черного тела, а для шероховатых, серых тел и особенно для полированных металлов он имеет отклонения.

**Закон квадратов расстояний.** Количество энергии, излучаемое точечным источником в пределах некоторого пространственного угла, будет одинаково независимо от расстояния. Количес-

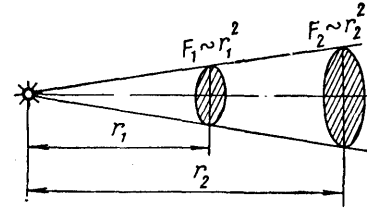


Рис. 68. Схема к выводу закона квадратов расстояний

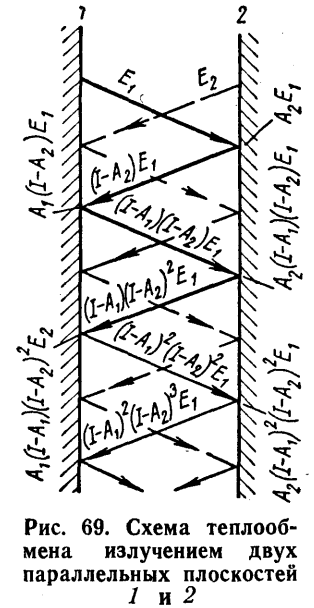


Рис. 69. Схема теплообмена излучением двух параллельных плоскостей 1 и 2

во же энергии, приходящееся на единицу поверхности, перпендикулярной направлению лучей, будет изменяться обратно пропорционально квадрату расстояния, так как площадь поверхности в пределах пространственного угла будет возрастать пропорционально квадрату расстояния (рис. 68), т. е.

$$\frac{E_1}{r_2^2} = \frac{E_2}{r_1^2}; \quad E_2 = E_1 \frac{r_1^2}{r_2^2}. \quad (249)$$

**Закон Кирхгофа.** Этот закон устанавливает соотношение между интенсивностью излучения и коэффициентом поглощения для непрозрачных тел ( $D=0$ ).

Рассмотрим теплообмен излучением между двумя параллельными плоскостями, расположенными так, чтобы все лучи, посылаемые первой плоскостью, попадали на вторую плоскость, а лучи, посылаемые второй плоскостью, попадали на первую плоскость (рис. 69).

Для первой поверхности имеем температуру  $T_1$ , суммарную интенсивность излучения  $E_1$ , коэффициент поглощения  $A_1$ ; для второй — соответственно  $T_2$ ,  $E_2$  и  $A_2$ .



Определим количество тепла, передаваемое с одной поверхности на другую.

$$\left. \begin{array}{l} \text{Первое тело излучает на второе } E_1 \\ \text{Второе тело поглощает из этого количества } A_2 E_1 \\ \text{Второе тело отражает на первое } (1 - A_2) E_1 \\ \text{Первое тело поглощает из этого количества } A_1 (1 - A_2) E_1 \\ \text{Первое тело отражает } (1 - A_1) (1 - A_2) E_1 \\ \text{Второе тело поглощает } A_2 (1 - A_1) (1 - A_2) E_1 \\ \text{Второе тело отражает } (1 - A_2) (1 - A_1) (1 - A_2) E_1 \end{array} \right\} \text{ вт/м}^2 \quad (250)$$

То же можно написать и для второго тела (см. рис. 69).

Таким образом, первое тело из своего излучения получает обратно от второго тела

$$\begin{aligned} E_1 (1 + K + K^2 + K^3 + \dots + K^n) (1 - A_2) A_1 = \\ = \frac{E_1 (1 - A_2) A_1}{1 - K}, \end{aligned} \quad (251)$$

где  $K = (1 - A_2)(1 - A_1)$ .

Так как из алгебры известно, что при  $K < 1$

$$1 + K + K^2 + K^3 + \dots + K^n = \frac{1}{1 - K},$$

первое тело поглощает из излучения второго тела

$$E_2 A_1 (1 + K + K^2 + K^3 + \dots + K^n) = \frac{E_2 A_1}{1 - K}. \quad (252)$$

Следовательно, общее количество тепла, отдаваемое первым телом второму, будет:

$$q_{1-2} = E_1 - \left[ \frac{E_1 (1 - A_2) A_1}{1 - K} + \frac{E_2 A_1}{1 - K} \right] \text{ [вт/м}^2\text{]}. \quad (253)$$

После подстановки значения  $K$  и ряда преобразований получим

$$q_{1-2} = \frac{E_1 A_2 - E_2 A_1}{A_1 + A_2 - A_1 A_2} \text{ [вт/м}^2\text{]}. \quad (254)$$

Предположим, что  $T_1 = T_2$ , тогда  $q_{1-2} = 0$  и

$$E_1 A_2 = E_2 A_1 \text{ или } \frac{E_1}{A_1} = \frac{E_2}{A_2} = \dots = E_{\text{ч.т.}} \quad (255)$$

Это и есть закон Кирхгофа, который формулируется так: *отношение суммарной интенсивности излучения к коэффициенту поглощения при одной и той же температуре для всех тел есть*

*величина постоянная, равная суммарной интенсивности излучения абсолютно черного тела при этой температуре.*

Если вместо  $E_1$ ,  $E_2$  и  $E_3$  подставить их значения из формулы закона Стефана — Больцмана (244), то

$$\frac{C_1 \left( \frac{T}{100} \right)^4}{A_1} = \frac{C_2 \left( \frac{T}{100} \right)^4}{A_2} = \dots = C_{\text{ч.т.}} \left( \frac{T}{100} \right)^4. \quad (256)$$

Сокращая на  $\left( \frac{T}{100} \right)^4$ , получим:

$$\frac{C_1}{A_1} = \frac{C_2}{A_2} = \dots = C_{\text{ч.т.}} = 5,67 \text{ вт/м}^2 \cdot \text{град}^4. \quad (256a)$$

Эта формула также выражает закон Кирхгофа: *отношение коэффициента лучеиспускания к коэффициенту поглощения для всех тел есть величина постоянная, равная коэффициенту лучеиспускания абсолютно черного тела.*

Из сравнения выражения (256a) с выражением (245) вытекает, что степень черноты  $\epsilon$  численно равна коэффициенту поглощения  $A$ .

В случае, когда  $T_1 \neq T_2$ , подставив в уравнение (254) значения  $E_1$  и  $E_2$  по закону Стефана — Больцмана и значение  $A_1$  и  $A_2$  по закону Кирхгофа (256), получим количество тепла, передаваемое первой поверхностью на вторую:

$$\begin{aligned} q_{1-2} &= \frac{1}{\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} - \frac{1}{C_{\text{ч.т.}}}} \left[ \left( \frac{T_1}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_2}{100} \right)^4 \right] = \\ &= \frac{5,67}{\frac{1}{A_1} + \frac{1}{A_2} - 1} \left[ \left( \frac{T_1}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_2}{100} \right)^4 \right] \text{ [вт/м}^2\text{]}. \end{aligned} \quad (257)$$

Величина

$$\frac{5,67}{\frac{1}{A_1} + \frac{1}{A_2} - 1} = \frac{1}{\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} - \frac{1}{C_{\text{ч.т.}}}} = C_{\text{прив}} \text{ [вт/м}^2\text{]} \quad (258)$$

называется приведенным коэффициентом лучеиспускания.

Рассмотрим теперь лучистый теплообмен между поверхностями двух тел, как угодно расположенных в пространстве относительно друг друга.

Общая формула для двух непрозрачных тел:

$$Q_{1-2} = \epsilon_{\text{пр}} 5,67 \left[ \left( \frac{T_1}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_2}{100} \right)^4 \right] \varphi_{1-2} F_{\text{расч.т.}} \text{ [кдж]}, \quad (259)$$

где  $Q_{1-2}$  — общее количество тепла, переданное излучением с первого тела на второе,  $\text{кДж}$ ;

$\epsilon_{\text{пр}}$  — приведенная степень черноты или приведенный коэффициент поглощения;

$\varphi_{1-2}$  — угловой коэффициент передачи тепла с первого тела на второе, учитывающий форму, размеры и взаимное расположение поверхностей;

$F_{\text{расч}}$  — условная расчетная поверхность теплообмена,  $\text{м}^2$ ;

$\tau$  — время теплообмена,  $\text{сек}$ .

Для практического использования формулы (259) надо знать значения  $\epsilon_{\text{пр}}$ ,  $\varphi_{1-2}$ ,  $F_{\text{расч}}$ .

Сопоставляя уравнение (259) с уравнением (257), мы видим, что для двух параллельных поверхностей

$$\epsilon_{\text{пр}} = \frac{1}{\frac{1}{A_1} + \frac{1}{A_2} - 1} = \frac{1}{\frac{1}{\epsilon_1} + \frac{1}{\epsilon_2} - 1}; \quad \varphi_{1-2} = 1; \quad F_{\text{расч}} = F. \quad (260)$$

Аналогично можно вывести формулу для случая, когда одно тело полностью окружает другое, причем меньшее тело имеет выпуклую форму,

$$\epsilon_{\text{пр}} = \frac{1}{\frac{1}{\epsilon_1} + \frac{F_1}{F_2} \left( \frac{1}{\epsilon_2} - 1 \right)}; \quad \varphi_{1-2} = 1; \quad F_{\text{расч}} = F_1, \quad (260a)$$

где  $F_1$  — поверхность меньшего тела,  $\text{м}^2$ .

Когда два тела произвольно расположены в пространстве,

$$\epsilon_{\text{пр}} = \epsilon_1 \epsilon_2. \quad (261)$$

Величины  $\varphi_{1-2}$  и  $F_{\text{расч}}$  определяют, применяя закон Ламберта:

$$\varphi_{1-2} F_{\text{расч}} = \int_{F_1} \int_{F_2} \frac{\cos \varphi_1 \cos \varphi_2}{\pi r^2} dF_1 \cdot dF_2. \quad (262)$$

Практически значения  $\varphi_{1-2}$  и  $F_{\text{расч}}$  находят по специальным таблицам и графикам.

Например, для случая нагрева заготовок (цилиндрических или прямоугольного сечения), лежащих на поду печи, угловой коэффициент между внутренней поверхностью стенки и поверхностью заготовки ( $\varphi_{\text{ст-мет}}$ ) (без учета влияния пода) можно определить по следующим формулам:

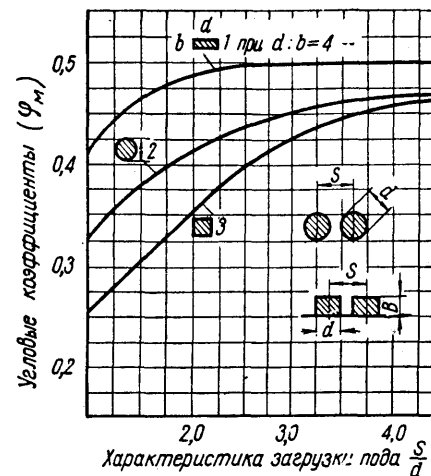


Рис. 70. График угловых коэффициентов ( $\varphi_m$ ), отнесенных к полной боковой поверхности нагреваемых изделий:

1 — заготовка прямоугольного сечения; 2 — цилиндрическая заготовка; 3 — заготовка квадратного сечения

для заготовки цилиндрической формы

$$\varphi_{\text{ст-мет}} = \frac{1}{\pi} \left[ \frac{s}{d} + \arctg \sqrt{\left(\frac{s}{d}\right)^2 - 1} - \sqrt{\left(\frac{s}{d}\right)^2 - 1} \right], \quad (263)$$

для заготовок прямоугольного сечения

$$\varphi_{\text{ст-мет}} = \frac{1}{2 \left( \frac{a+b}{s} \right)} \left[ 1 + \frac{b}{s} - \sqrt{\left(1 - \frac{a}{s}\right) + \left(\frac{b}{s}\right)^2} \right], \quad (263a)$$

где  $s$  — расстояние между центрами заготовок,  $\text{м}$ ;

$d$  — диаметр цилиндрической заготовки,  $\text{м}$ ;

$a$  — сторона прямоугольной заготовки, обращенная к потоку газов,  $\text{м}$ ;

$b$  — высота прямоугольной заготовки,  $\text{м}$ .

За  $F_{\text{расч}}$  в данном примере принята полная боковая поверхность заготовки, если длина заготовки  $l > 3d$  или  $l > 3b$ . Если заготовки короткие, то  $F_{\text{расч}}$  равна полной поверхности заготовки.

Графическое выражение этих формул приведено на рис. 70.

Если между двумя телами, которые обмениваются тепловым излучением, поместить одно или несколько плоских тел ( $n$  экра-



нов), то передача тепла сильно уменьшится. Ее можно определить по формуле

$$Q_3 = \frac{1}{n+1} \cdot \frac{C_3}{C_{1-2}} Q, \quad (264)$$

где  $Q_3$  — количество тепла, передаваемое излучением от первого тела ко второму при наличии экранов, *вт*;

$Q$  — то же без экранов, *вт*;

$n$  — количество экранов;

$C_{1-2}$  — приведенный коэффициент лучеиспускания без экрана;

$C_3$  — приведенный коэффициент лучеиспускания между поверхностью тела и экраном.

Например, если между двумя обменивающимися излучением стальными окисленными листами ввести никелированный лист, то количество передаваемого тепла снизится в 27 раз.

## 2. Потери тепла при излучении через отверстия

При расчетах потерь тепла печью бывает необходимо рассчитать количество тепла, теряемое через отверстие в кладке (загрузочные окна, гляделки и т. д.). Излучение небольшого отверстия в стенке печи можно рассматривать как абсолютно черное.

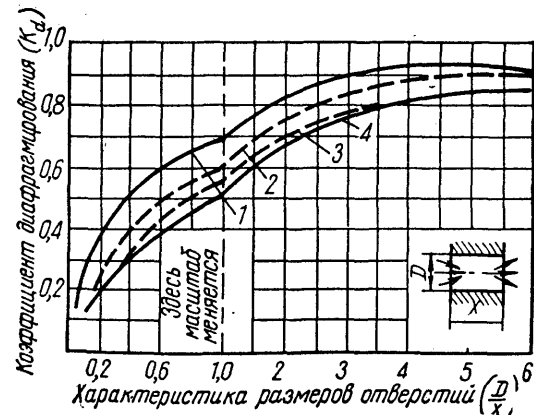


Рис. 71. График для определения значения коэффициента диафрагмирования  $K_d$  в зависимости от формы отверстия:

1 — прямоугольной вытянутой; 2 — прямоугольной с отношением сторон 1:2; 3 — квадратной; 4 — круглой

Однако часть этого излучения задерживается стенками отверстия (эффект диафрагмирования). Потерю тепла от излучения отверстия определяют по формуле

$$Q_{\text{луч. отв}} = C_{\text{ч.т}} \left[ \left( \frac{T_{\text{печи}}}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_{\text{возд}}}{100} \right)^4 \right] F_{\text{отв}} K_d \cdot \tau_{\text{откр}} [\text{вт}], \quad (265)$$

где  $T_{\text{печи}}$  и  $T_{\text{возд}}$  — температура в печи и температура окружающего воздуха, °К;

$F_{\text{отв}}$  — площадь отверстия,  $\text{м}^2$ ;

$K_d$  — коэффициент диафрагмирования, зависящий от формы отверстия и отношения  $\frac{D}{x}$ ,

где

$D$  — больший линейный размер отверстия (ширина или высота окна),  $\text{м}$  ( $\text{см}$ );

$x$  — толщина стенки печи,  $\text{м}$  ( $\text{см}$ );

$\tau_{\text{откр}}$  — относительное время открывания отверстия в секундах за *сек.*

Значения коэффициента  $K_d$  можно взять по графику на рис. 71.

## 3. Излучение газов и пламени

Излучение газообразных тел характеризуется тем, что они не имеют сплошного спектра, т. е. излучают и поглощают волны не всех длин, а только в определенных интервалах.

Твердые непрозрачные тела поглощают и излучают тепловые лучи с поверхности, а газы — по всей толщине слоя.

При работе пламенных печей основную роль в процессе теплопередачи в рабочем пространстве играют трехатомные газы, имеющиеся в продуктах горения, —  $\text{CO}_2$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ .

Углекислый газ имеет три основных полосы излучения, определяемые длинами волн: 2,36—3,02  $\mu\text{м}$ ; 4,01—4,80  $\mu\text{м}$ ; 12,5—16,5  $\mu\text{м}$ ; а водяной пар — 2,24—3,27  $\mu\text{м}$ ; 4,8—8,5  $\mu\text{м}$  и 12—25  $\mu\text{м}$ .

Излучение  $\text{SO}_2$  несколько отличается от излучения  $\text{CO}_2$  и  $\text{H}_2\text{O}$ . Но так как обычно в продуктах горения содержание  $\text{SO}_2$  очень невелико, то в дальнейшем будем его учитывать как излучение  $\text{CO}_2$ .

Двухатомные газы, содержащиеся в продуктах горения ( $\text{O}_2$ ,  $\text{N}_2$ ,  $\text{CO}$ ), имеют настолько узкие интервалы излучаемых и поглощаемых волн, что их при практических расчетах считают теплопрозрачными.

Кроме газов, в продуктах горения могут находиться частички сажистого углерода, золы, пыли и т. д., излучение которых

играет существенную роль в теплопередаче. Условно газы, не содержащие взвешенных твердых частиц, называются несветящимися, а газы, их содержащие, светящимися.

Исследования теплового излучения чистых (несветящихся) газов —  $\text{CO}_2$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  показали, что оно отклоняется от закона Стефана — Больцмана и количество переданного тепла зависит от абсолютной температуры не в четвертой степени, а в степени 3,5 для  $\text{CO}_2$  и 3,0 — для  $\text{H}_2\text{O}$ .

Однако для удобства технических расчетов излучение газов связывают с излучением абсолютно черного тела, вводя понятие степени черноты газа

$$\epsilon_{\Gamma} = \frac{q_{\Gamma}}{E_{\text{ч.т}}} = \frac{q_{\Gamma}}{5,67 \left( \frac{T_{\Gamma}}{100} \right)^4}, \quad (266)$$

где  $q_{\Gamma}$  — количество тепла, передаваемое излучением газа,  $\text{вт/м}^2$ ;

$\epsilon_{\Gamma}$  — степень черноты газа.

Зная  $\epsilon_{\Gamma}$  и  $T_{\Gamma}$ , можно по формуле (266) определить и  $q_{\Gamma}$ .

Эксперименты показали, что  $q_{\Gamma}$  зависит от концентрации газа (парциального давления  $p_{\Gamma}$ ), умноженной на толщину слоя (среднюю или эффективную длину луча  $S$ ), и от температуры газа.

Зависимости  $\epsilon_{\text{CO}_2} = f(p_{\text{CO}_2} S; T)$  и  $\epsilon_{\text{H}_2\text{O}} = f(p_{\text{H}_2\text{O}} \cdot S; T)$  приведены в виде графиков на рис. 72.

При суммарном излучении  $\text{CO}_2$  и  $\text{H}_2\text{O}$  вводят поправки, связанные с неодинаковым отклонением от закона Стефана — Больцмана и с частичным перекрытием интервалов излучения в спектре:

$$\epsilon_{\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}} = \epsilon_{\text{CO}_2} + \beta \epsilon_{\text{H}_2\text{O}} - \Delta \epsilon. \quad (267)$$

Значения поправок  $\beta$  и  $\Delta \epsilon$  приведены на рис. 73. Величина средней или эффективной длины луча  $S$  связана с размерами и формой рабочего пространства печи. При форме рабочего пространства в виде прямоугольного параллелепипеда:

$$S \approx (0,8 \div 0,9) \frac{4V}{F}, \quad (268)$$

где  $V$  — объем рабочего пространства печи,  $\text{м}^3$ ;

$F$  — внутренняя поверхность стен свода и пода рабочего пространства,  $\text{м}^2$ .

Количество тепла, которое передается несветящимся газом на стенку того пространства, в котором он находится, можно

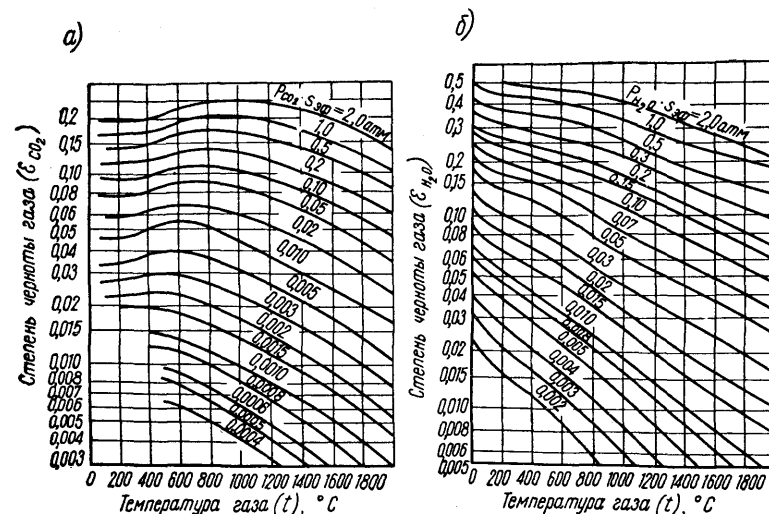


Рис. 72. Зависимость степени черноты излучения трехатомных газов от температуры, парциального давления и приведенной толщины газового слоя: а — для углекислоты ( $\text{CO}_2$ ) и б — для водяного пара ( $\text{H}_2\text{O}$ ) (без поправки на парциальное давление)

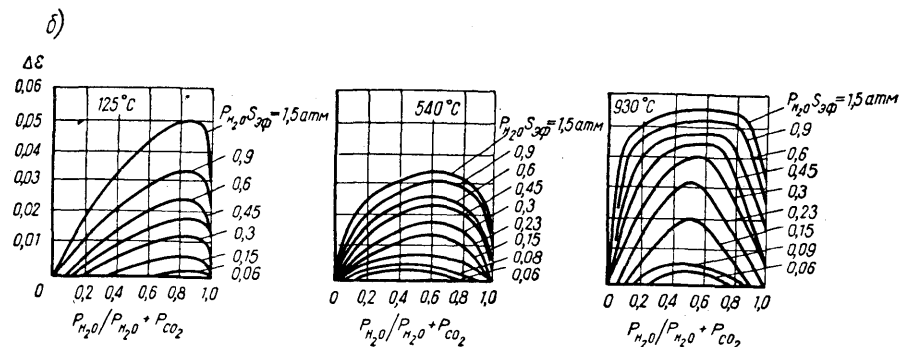
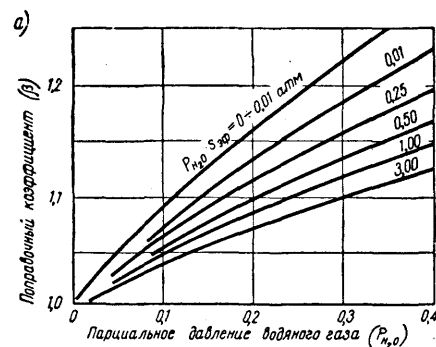


Рис. 73. Графики для определения поправок при расчете излучения  $\text{CO}_2$  и  $\text{H}_2\text{O}$ : а — поправочный множитель  $\beta$  при определении степени черноты водяного пара; б — поправки на одновременное излучение  $\text{CO}_2$  и  $\text{H}_2\text{O}$

определить по следующей формуле (считая температуру газа по всей его массе одинаковой):

$$q_{г-ст} = \frac{A_{ст} + 1}{2} C_{ч.г} \left[ \varepsilon_{г}^{T_{г}} \left( \frac{T_{г}}{100} \right)^4 - \varepsilon_{г}^{T_{ст}} \left( \frac{T_{ст}}{100} \right)^4 \right] [\text{вт/м}^2], \quad (269)$$

где  $T_{г}$  и  $T_{ст}$  — температура газа и стенки, °К;  
 $\varepsilon_{г}^{T_{г}}$  и  $\varepsilon_{г}^{T_{ст}}$  — степень черноты газа при температуре газа и при температуре стенки;

$A_{ст}$  — коэффициент поглощения поверхности стенки.

Излучение светящихся газов исследовано мало, хотя для улучшения теплопередачи в печной технике принимают меры к искусственному увеличению степени черноты газов. Степень черноты факела светящегося пламени складывается из излучения трехатомных газов и излучения твердых частиц, главным образом сажистого углерода:

$$\varepsilon_{фак} = \varepsilon_{CO_2+SO_2+H_2O} + \varepsilon_{саж. угл.} \quad (270)$$

При расчетах обычно пользуются значениями  $\varepsilon_{фак}$ , полученными экспериментально (табл. 33).

Таблица 33

Излучательная способность факела пламени

Вид топлива	Способ сжигания	Степень черноты факела
Генераторный газ	Двухступенчатая инжекторная горелка	0,32
Смешанный (коксодоменный) газ	Горелки частичного смешения, воздух холодный	0,16
То же	Те же горелки, воздух, подогретый до 390°С	0,213
Природный газ	Горелки внутреннего смешения	0,2
То же	Горелки внешнего смешения	0,6—0,7
Нефтяной газ	Инжекторная горелка	0,25—0,318
Мазут	Форсунка	0,7—0,85
Угольная пыль	Горелка	0,3—0,6
Твердое топливо (дрова, торф, бурый и каменный уголь)	Слоевое сжигание	0,35—0,04

## § 30. ТЕПЛООБМЕН В РАБОЧЕМ ПРОСТРАНСТВЕ ПЕЧИ

После ознакомления со всеми видами теплопередачи рассмотрим практически интересные случаи теплообмена, когда участвует не один, а два или все три вида теплопередачи.

Основным процессом, происходящим при нагреве металла в печах, является процесс передачи тепла на поверхность нагреваемого тела. Тепло от продуктов горения передается одновременно на внутреннюю поверхность стен рабочей камеры и на поверхность нагреваемого материала.

Передача тепла происходит лучеиспусканием газов и пламени и соприкосновением (конвекцией).

Внутренняя поверхность стен, получая тепло от продуктов горения, часть его отражает, часть передает (благодаря теплопроводности материала кладки) в окружающее пространство, а часть излучает обратно в рабочее пространство печи.

Тепло, которое отражает и излучает внутренняя поверхность стен, частично воспринимает поверхность нагреваемого материала, частично поглощают продукты горения, заполняющие рабочее пространство, а частично оно попадает опять на поверхность стен (рис. 74).

Материал, находящийся в печи, получает при этом тепло, которое излучают газообразные продукты горения и факел, тепло от лучеиспускания стен рабочего пространства сквозь слой газообразных продуктов горения и тепло, передающееся конвекцией от продуктов горения.

Детальное и математически строгое решение задачи о теплообмене в рабочем пространстве печи очень сложно.

Однако, введя ряд допущений, можно с известным приближением определить количество тепла, воспринимаемое поверхностью нагреваемого материала, и среднюю температуру внутренней поверхности стен, зная температуру газов в печи и температуру поверхности материала. Приближенное решение этой задачи выполнили В. Н. Тимофеев, И. М. Рафалович и другие авторы. Они вводили следующие допущения:

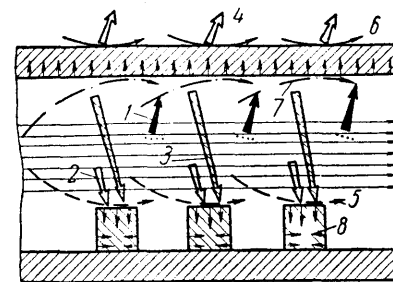


Рис. 74. Схема теплообмена в рабочей камере печи:

1 — излучение от газов к своду; 2 — излучение от газов к металлу; 3 — излучение от свода и стенок к металлу; 4 — излучение от наружной поверхности свода в окружающую среду; 5 — конвекция от газов к металлу; 6 — конвекция в окружающую среду; 7 — конвекция от газов к своду; 8 — теплопроводность.

1. Температура газов одинакова во всем объеме рабочего пространства печи и постоянна во времени.

2. Температура поверхности металла и внутренней поверхности стен везде одинакова и постоянна.

3. Плотность лучистых потоков, отраженных от стен, как и от материала, равномерна по всей поверхности.

4. Поглощательная способность газа по отношению к собственному и отраженному излучению одинакова по всем направлениям.

5. Степень черноты газа, характеризующая его излучающую и поглощающую способность, относится к температуре газов, а не к температуре стен или материала.

Количество тепла, получаемого поверхностью нагреваемого материала, в этом случае определяют по следующей формуле:

$$Q_{г. кл. м} = C_{г. кл. м} \left[ \left( \frac{T_{г}}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_{м}}{100} \right)^4 \right] F_{эфф} + \alpha_k (t_{г} - t_{м}) F_{эфф} [вт], \quad (271)$$

где  $Q_{г. кл. м}$  — полное количество тепла, воспринимаемое поверхностью материала в печи от продуктов горения и внутренней поверхности кладки, *вт*;

$C_{г. кл. м}$  — приведенный коэффициент лучеиспускания между продуктами горения, внутренней поверхностью кладки и поверхностью материала,  $вт/м^2 \cdot град^4$  [см. формулу (272)];

$T_{г}$  и  $t_{г}$  — температура продуктов горения, °К или °С;

$T_{м}$  и  $t_{м}$  — температура поверхности нагреваемого материала, °К или °С;

$\alpha_k$  — коэффициент теплоотдачи от продуктов горения к поверхности материала соприкосновением (конвекцией),  $вт/м^2 \cdot град$ ;

$F_{эфф}$  — эффективная лучевоспринимающая поверхность материала,  $м^2$ .

В формуле (271) принято, что поверхность материала, воспринимающая тепло конвекцией, равна эффективной лучевоспринимающей поверхности (в общем случае они могут быть не равны).

Первый член уравнения (271) выражает количество тепла, передаваемое на поверхность материала лучеиспусканием, а второй — тепло, передаваемое соприкосновением (конвекцией).

Значение  $C_{г. кл. м}$  можно определить по следующей несколько упрощенной формуле:

$$C_{г. кл. м} = C_{ч.т} \varepsilon_{г} \varepsilon_{м} \frac{\varphi (1 - \varepsilon_{г}) + 1}{\varphi (1 - \varepsilon_{г}) (\varepsilon_{г} + \varepsilon_{м} - \varepsilon_{г} \varepsilon_{м}) + \varepsilon_{г}} [вт/м^2 \cdot град^4], \quad (272)$$

где  $C_{ч.т.}$  — коэффициент лучеиспускания абсолютно черного тела, равный  $5,67 вт/м^2 \cdot град^4$ ;

$\varepsilon_{г}$  — степень черноты продуктов горения в полости печи;

$\varepsilon_{м}$  — степень черноты (коэффициент поглощения) поверхности материала;

$\varphi$  — угловой коэффициент поверхности стен на металл. Величина  $\varphi$  в случае, когда площадь пода сплошь занята материалом (например, вплотную уложенными прямоугольными или квадратными заготовками), равна отношению

$$\frac{F_{эфф}}{F_{ст}},$$

где  $F_{ст}$  — внутренняя поверхность стен и свода печи,  $м^2$ ,  $F_{эфф}$  равна площади пода, занятой материалом,  $м^2$ .

Если же квадратные, цилиндрические или прямоугольные заготовки лежат на поду печи с зазором, то  $\varphi$  может быть определен по формулам (263) и (263а) или по графику рис. 71, а  $F_{эфф} = \varphi F_{мет}$ , где  $F_{мет}$  — полная боковая поверхность всех заготовок, лежащих на поду.

Известен и другой способ определения  $F_{эфф}$ :

$$F_{эфф} = k F_{акт},$$

где  $F_{акт} = n(b+d)l$  — площадь пода, занятая заготовками с зазорами между ними;

$n$  — количество заготовок, лежащих на поду;

$d$  — диаметр или ширина заготовки,  $м$ ;

$l$  — длина заготовки,  $м$ ;

$b$  — ширина зазора между заготовками.

Коэффициент  $k$  имеет следующие значения в зависимости от отношения  $\frac{b}{d}$  (табл. 34).

Таблица 34

Значения коэффициента  $k$ 

$k$	Отношение $\frac{b}{d}$							
	0	0,25	0,5	0,75	1,0	1,5	2	4
Для квадратных и прямоугольных заготовок	1,0	0,99	0,98	0,95	0,91	0,82	0,74	0,52
Для цилиндрических заготовок	1,0	0,98	0,97	0,93	0,89	0,79	0,71	0,51

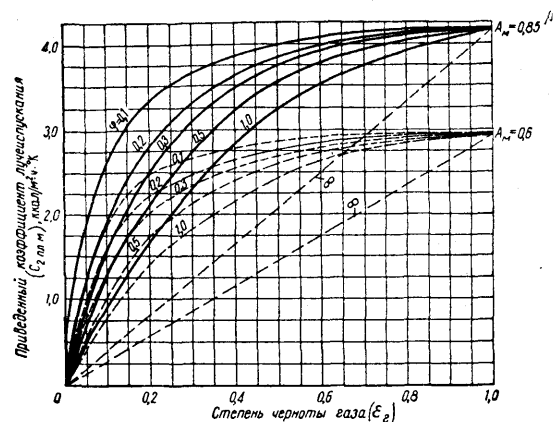


Рис. 75. График для определения приведенного коэффициента излучения  $C_{г.кл.м}$ . (для двух значений коэффициента поглощения поверхности металла:  $A_m = 0,85$  и  $A_m = 0,6$ )

Выражение для определения  $C_{г.кл.м}$  действительно при условии полного заполнения потоком продуктов горения рабочего пространства печи. В действительности же в печах, в которых форсунки или горелки установлены в рабочей камере (в кузнечных печах это бывает часто), поток продуктов горения (факел) не заполняет целиком сечения рабочей камеры, а занимает только центральную часть, вокруг которой образуется пространство, заполненное более холодным газом.

И. М. Рафалович предлагает учитывать это обстоятельство, вводя множителем в формулу (271) коэффициент  $\mu = 0,7—0,9$ . Меньшее значение может быть принято при более резко выраженном факеле и малом количестве горелок, а большее — при слабо выраженном факеле и большом количестве горелок.

Для определения значений  $C_{г.кл.м}$  в зависимости от  $\epsilon_p$  и  $\phi$  при  $\epsilon_m = 0,85$  (нагрев стальных заготовок) и  $\epsilon_m = 0,6$  (нагрев заготовок из медных сплавов) на рис. 75 приведен график.

Температуру внутренней поверхности кладки можно определить по формуле

$$T_{кл}^4 = \frac{\epsilon_r [1 + (1 - \epsilon_r) \phi (1 - \epsilon_m)]}{\phi (1 - \epsilon_r) [\epsilon_m + \epsilon_r (1 - \epsilon_m)] + \epsilon_r} (T_r^4 - T_m^4) + T_m^4. \quad (273)$$

Значения величин, входящих в эту формулу, приведены выше. Формула (271) для определения  $Q_{г.кл.м}$  получена на основе постоянства температур  $T_r$ ,  $T_{кл}$  и  $T_m$ .

В действительности же температура газов в печи изменяется от теоретической температуры горения  $T_{гор}$  до темпера-

туры отходящих газов  $T_{ух}$ , а температура поверхности материала — от  $T_{пов}^{нач}$  до  $T_{пов}^{кон}$ .

В этом случае для определения количества тепла, передаваемого на поверхность материала, в формулу (271) необходимо подставить усредненную разность четвертых степеней

$$\left[ \left( \frac{T_r}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_m}{100} \right)^4 \right]_{ср.дн}$$

и среднюю разность  $(t_r - t_m)_{ср.дн}$ .

Точное значение усредненной разности четвертых степеней абсолютных температур можно получить методом графического интегрирования.

При камерных печах, когда температура материала меняется только во времени, а не по длине рабочей камеры, температуру газов и поверхности материала можно усреднять по следующим формулам:

$$T_r^{ср.дн} = \sqrt[4]{0,88 T_{гор} T_{ух}} [^{\circ}K], \quad (274)$$

$$t_{пов}^{ср.дн} = \psi (t_{пов}^{кон} - t_{нач}) + t_{нач} [^{\circ}C], \quad (275)$$

где  $t_{нач}$  — начальная температура поверхности,  $^{\circ}C$ ;

$t_{пов}^{кон}$  — конечная температура поверхности,  $^{\circ}C$ ;

$\psi$  — коэффициент, значения которого зависят от отноше-

ния  $\frac{t_{пов}^{кон}}{t_r^{ср.дн}}$  (табл. 35).

Таблица 35

Коэффициент $\psi$					
$\frac{t_{пов}^{кон}}{t_r^{ср.дн}}$	0,8	0,85	0,9	0,95	0,98
$\psi$	0,62	0,64	0,67	0,71	0,75

Эта формула усреднения выведена из предположения, что температура поверхности материала изменяется во времени по закону:

$$t_{пов} = (t_r^{ср.дн} - t_{нач}) (1 - e^{-k\tau}) + t_{нач} [град]. \quad (276)$$

Для нагрева металла в методических или полуметодических печах усредненную разность температур можно определить по формуле, предложенной В. И. Тимофеевым:

$$\left[ \left( \frac{T_r}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_m}{100} \right)^4 \right]_{\text{средн}} = \sqrt{\left[ \left( \frac{T_{\text{гор}}}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_{\text{пов}}^{\text{кон}}}{100} \right)^4 \right] \left[ \left( \frac{T_{\text{ух}}}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_{\text{пов}}^{\text{нач}}}{100} \right)^4 \right]}. \quad (277)$$

Формулу (271) для определения количества тепла, получаемого поверхностью материала в печи, можно упростить, сведя ее к формулам, выражающим закон конвекции или закон излучения.

В первом случае будем иметь

$$Q_{\text{г. кл. м}} = \alpha_{\text{л+к}} (t_r - t_m)_{\text{средн}} F_{\text{эфф}} [\text{вт}]. \quad (278)$$

Значение  $\alpha_{\text{л+к}}$  при этом будет

$$\alpha_{\text{л+к}} = \frac{C_{\text{г. кл. м}} \left[ \left( \frac{T_r}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_m}{100} \right)^4 \right]_{\text{средн}}}{(t_r - t_m)_{\text{средн}}} + \alpha_{\text{конв}} [\text{вт}/\text{м}^2 \cdot \text{град}]. \quad (279)$$

Для быстрого приближенного определения  $\alpha_{\text{л+к}}$  существуют упрощенные и эмпирические формулы и графики (рис. 76).

При нагреве стальных заготовок в камерных печах:

$$\alpha_{\text{л+к}} = 0,09 \left( \frac{T_r}{100} \right)^3 + (10 \div 15) [\text{вт}/\text{м}^2 \cdot \text{град}]. \quad (280)$$

Для методических печей, работающих на газе,

$$\alpha_{\text{л+к}} = 50 + 0,3 (t_r - 700) [\text{вт}/\text{м}^2 \cdot \text{град}]. \quad (281)$$

Во втором случае при сведении конвекции к закону излучения:

$$Q_{\text{г. кл. м}} = C_{\text{ч. т}} (\varepsilon_{\text{г. кл. м}} + \varepsilon_{\text{к}}) \left[ \left( \frac{T_r}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_m}{100} \right)^4 \right]_{\text{средн}} F_{\text{эфф}} = C'_{\text{г. кл. м}} \left[ \left( \frac{T_r}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_m}{100} \right)^4 \right]_{\text{средн}} F_{\text{эфф}} [\text{вт}], \quad (282)$$

где

$$\varepsilon_{\text{к}} = \frac{\alpha_{\text{к}} (t_r - t_m)_{\text{средн}}}{C_{\text{ч. т}} \left[ \left( \frac{T_r}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_m}{100} \right)^4 \right]_{\text{средн}}}. \quad (283)$$

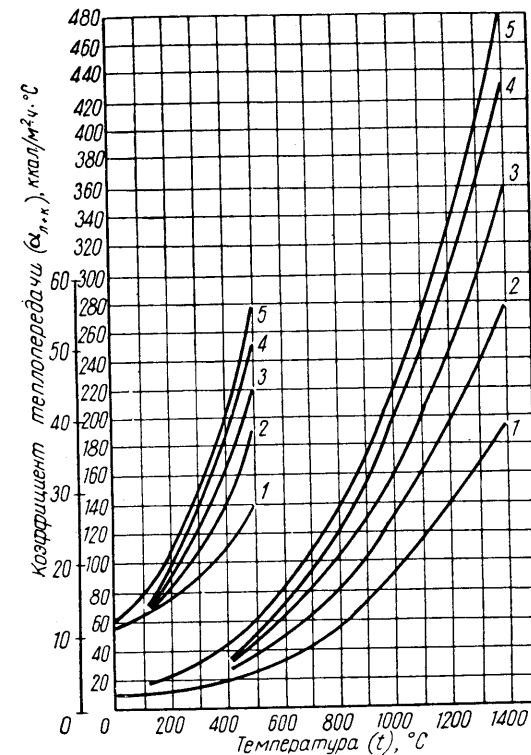


Рис. 76. Зависимость коэффициента теплопередачи  $\alpha_{\text{л+к}}$  от температуры печи при нагреве разных металлов:

1 — алюминия; 2 — стали в защитной атмосфере; 3 — латуни; 4 — меди; 5 — стали

Для быстрого определения  $\left( \frac{T}{100} \right)^4$  по  $t$  °C или, наоборот,  $t$  °C по  $\left( \frac{T}{100} \right)^4$  в приложении 4 приведены соответствующие данные.

Следует отметить, что обычно при высоких температурах печи выше 1200° C количество тепла, передаваемое конвекцией, составляет не более 10% от общего. В секционных печах оно может доходить до 30 и даже 40%.

При низких же температурах печи ниже 600—700° C количество тепла, передаваемого конвекцией, может быть равно и даже больше количества тепла, передаваемого излучением.

Для примера приводим результаты расчета теплопередачи

на поверхность металла в камере выдержки методической печи. Исходные данные:  $t_r=1300^\circ\text{C}$ ;  $t_m=1200^\circ\text{C}$ ; толщина слоя газа над поверхностью металла — 1,0 м;  $\frac{F_m}{F_{ст}}=0,2$ ; коэффициент лучеиспускания внутренней поверхности стен  $C_{ст}=4,29 \text{ вт/м}^2 \cdot \text{К}^4$ ; степень черноты (коэффициент поглощения) поверхности металла  $\epsilon_m=0,85$ .

Состав продуктов горения  $\text{CO}_2=12\%$ ;  $\text{H}_2\text{O}=12,0$ ;  $\text{N}_2+\text{O}_2+\text{CO}=76\%$ . Считая газы несветящимися, получим среднюю температуру внутренней поверхности стен  $t_{ст}=1253^\circ\text{C}$ , а количество тепла, полученное металлом:

за счет конвекции	1660	вт/м <sup>2</sup>	(4,9%)
» излучения $\text{CO}_2$ и $\text{H}_2\text{O}$	12 000	вт/м <sup>2</sup>	(35,8%)
» излучения стен	20 200	вт/м <sup>2</sup>	(59,3%)

Всего . . . 33 860 вт/м<sup>2</sup> (100%)

Если же предположить, что, кроме излучения газов, имеется излучение сажистого углерода, характеризующее степень черноты  $\epsilon_{\text{саж,угл}}=0,3$ , то средняя температура внутренней поверхности стен будет  $t_{ст}=1275^\circ\text{C}$ , а количество тепла, получаемое поверхностью металла в печи:

за счет конвекции	1660	вт/м <sup>2</sup>	(2,8%)
» излучения газов	12 000	вт/м <sup>2</sup>	(20,4%)
» излучения сажистого углерода	20 700	вт/м <sup>2</sup>	(35,4%)
» излучения стен	25 200	вт/м <sup>2</sup>	(41,4%)

Всего . . . 58 960 вт/м<sup>2</sup> (100%)

Этот пример показывает, как влияет излучательная способность газов и пламени на количество тепла, получаемое поверхностью нагреваемого материала.

### § 31. РАСЧЕТ ПОТЕРЬ ТЕПЛА ЧЕРЕЗ СТЕНКИ ПЕЧЕЙ ПРИ УСТАНОВИВШЕМСЯ ТЕПЛОВОМ СОСТОЯНИИ

Схема распределения температур в этом случае для однослойной стенки показана на рис. 77, а.

Тепло передается в три этапа: излучением и конвекцией от газов к внутренней поверхности стенки, с внутренней поверхности на наружную вследствие теплопроводности материала стенки и от наружной поверхности в окружающий воздух за счет лучеиспускания и конвекции.

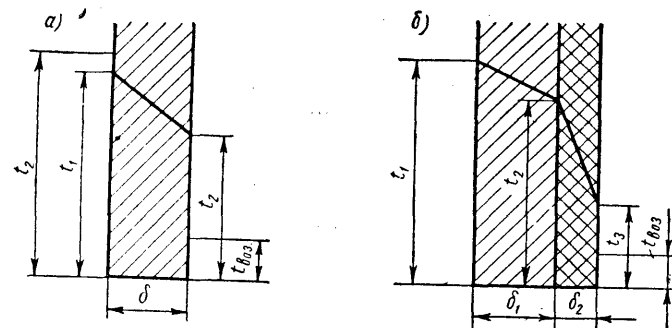


Рис. 77. Схема распределения температур к расчету тепловых потерь:

а — однослойная стенка; б — двухслойная стенка

Теплопередача от газов к металлу и к внутренней поверхности стенок в рабочем пространстве печи рассмотрена выше. Поэтому будем считать, что нам известна температура  $t_1$  (допуская некоторую неточность — увеличение потерь, можно принять  $t_1=t_{\text{печи}}$ ).

Уравнение теплопередачи теплопроводностью через стенку (175) имеет вид

$$q_{\text{тепл}} = \frac{a(t_1 - t_2) \pm \frac{b}{2}(t_1^2 - t_2^2)}{\delta} \quad [\text{вт/м}^2],$$

если предполагать, что теплопроводность материала стенки зависит от температуры по уравнению  $\lambda = a \pm bt$  [вт/м · град].

Уравнение теплоотдачи с наружной поверхности стенки лучеиспусканием и конвекцией (271):

$$q_{\text{л+к}} = C_{\text{ч,т}} \epsilon_{\text{ст}} \left[ \left( \frac{t_r + 273}{100} \right)^4 - \left( \frac{t_b + 273}{100} \right)^4 \right] + \alpha_k (t_r - t_b) \quad [\text{вт/м}^2],$$

где  $\epsilon_{\text{ст}}$  — степень черноты (коэффициент поглощения) наружной поверхности стенки;

$\alpha_k$  — коэффициент теплоотдачи конвекцией с наружной поверхности стенки к воздуху, вт/м<sup>2</sup> · град.

При установившемся тепловом состоянии имеем:

$$q_{\text{тепл}} = q_{\text{л+к}} = q_{\text{ст}}. \quad (284)$$

Таким образом, неизвестными в уравнениях (175) и (271) будут  $t_2$  — температура наружной поверхности стенки и  $q_{\text{ст}}$ . Легче всего эту систему уравнений решать графически. Схема такого решения приведена на рис. 78.

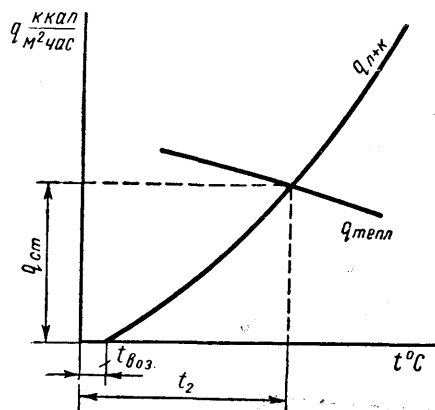


Рис. 78. Графическое определение температуры наружной поверхности стенки и потерь тепла через однослойную стенку

Уравнение теплоотдачи лучеиспусканием и конвекцией с наружной поверхности к окружающему воздуху имеет следующий вид:

$$q_{л+к} = \alpha_{л+к} (t_3 - t_{возд}) [вт/м^2].$$

Так как  $q'_{тепл} = q''_{тепл} = q_{л+к} = q_{ст}$  при установившемся тепловом состоянии, то перенося  $\frac{\delta_1}{\lambda_1}$ ,  $\frac{\delta_2}{\lambda_2}$  и  $\alpha_{л+к}$  в левую часть уравнений (172) (172а) и (224) и суммируя их, получим:

$$q_{ст} \left( \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{1}{\alpha_{л+к}} \right) = t_1 - t_{возд}. \quad (285)$$

Откуда

$$q_{ст} = \frac{1}{\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{1}{\alpha_{л+к}}} (t_1 - t_{возд}) [вт/м^2]. \quad (285а)$$

Величины  $\frac{\delta_1}{\lambda_1}$ ,  $\frac{\delta_2}{\lambda_2}$  и  $\frac{1}{\alpha_{л+к}}$  имеют физический смысл тепловых сопротивлений в первом слое, втором слое и при передаче тепла с поверхности стенки в окружающую среду.

При расчете по формуле (285а) приходится сначала, задаваясь значениями  $t_2$  и  $t_3$ , определять  $\lambda_1$ ,  $\lambda_2$  и  $\alpha_{л+к}$ . После

При двухслойной или многослойной стенке, устраиваемой с применением теплоизоляции в целях уменьшения потерь тепла, можно применить другое, упрощенное решение.

На рис. 77, б показано распределение температур в двухслойной стенке.

Уравнение теплопроводности для первого слоя

$$q'_{тепл} = \frac{\lambda_1}{\delta_1} (t_1 - t_2) [вт/м^2].$$

Уравнение теплопроводности для второго слоя

$$q''_{тепл} = \frac{\lambda_2}{\delta_2} (t_2 - t_3) [вт/м^2].$$

определения  $q_{ст}$  и нахождения по формулам (172) и (172а)  $t_2$  и  $t_3$ , если последние сильно отличаются от принятых, нужно делать пересчет и вновь определять  $\lambda_1$ ,  $\lambda_2$  и  $\alpha_{л+к}$ .

## § 32. РАСЧЕТ ТЕПЛООБМЕННЫХ АППАРАТОВ

В целях использования тепла отходящих газов нагревательных печей для подогрева воздуха, необходимого для горения топлива в топке, обычно применяют рекуператоры и регенераторы.

В рекуператорах тепло передается от продуктов горения к воздуху через разделяющую их стенку непрерывно.

В регенераторах теплопередача происходит в два периода. В первый период тепло отходящих газов передается насадке регенератора (огнеупорная кладка с достаточными проходами) и в ней аккумулируется, во второй период это аккумулированное тепло передается насадкой холодному воздуху. Для непрерывной работы печь снабжают обычно двумя камерами с насадкой, работающими попеременно, поэтому когда через одну насадку движутся отходящие продукты горения и она нагревается, через другую движется нагреваемый воздух и насадка охлаждается. Насадки переключают через определенные промежутки времени.

В рекуператорах, как и во всех других поверхностных теплообменниках, тепло передается от греющего газа (или жидкости) через однослойную плоскую стенку. Введем следующие обозначения:

$\alpha_1$  — коэффициент теплоотдачи от греющей среды к стенке,  $вт/м^2 \cdot град$ ;

$t_1$  — температура греющей среды,  $град$ ;

$\lambda$  — коэффициент теплопроводности стенки,  $вт/м \cdot град$ ;

$\delta_{ст}$  — толщина стенки,  $м$ ;

$t_1^{ст}$  и  $t_2^{ст}$  — температура поверхностей стенки,  $°C$ ; ( $t_1^{ст} > t_2^{ст}$ );

$\alpha_2$  — коэффициент теплоотдачи от стенки к нагреваемой среде,  $вт/м^2 \cdot град$ ;

$t_2$  — температура нагреваемой среды,  $°C$ .

Тепловой поток  $q$ , проходящий через стенку, можно выразить тремя уравнениями:

$$q = \alpha_1 (t_1 - t_1^{ст}),$$

$$q = \frac{\lambda}{\delta} (t_1^{ст} - t_2^{ст}),$$

$$q = \alpha_2 (t_2^{ст} - t_2). \quad (286)$$



После соответствующих преобразований получим:

$$q = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}} (t_1 - t_2) [\text{вт}/\text{м}^2]. \quad (287)$$

обозначим через

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}} [\text{вт}/\text{м}^2 \cdot \text{град}]. \quad (288)$$

В этом случае

$$q = k (t_1 - t_2) [\text{вт}/\text{м}^2]. \quad (289)$$

В отличие от коэффициентов теплоотдачи величина  $k$  называется общим коэффициентом теплопередачи и характеризует в целом процесс теплопередачи через стенку.

Величины  $R = \frac{1}{k}$ ,  $R_1 = \frac{1}{\alpha_1}$ ,  $R_2 = \frac{\delta}{\lambda}$ ,  $R_3 = \frac{1}{\alpha_2}$

носят название тепловых сопротивлений. При этих обозначениях выражения (288) и (286) будут иметь следующий вид:

$$R = R_1 + R_2 + R_3, \quad (290)$$

$$q = \frac{t_1 - t_1^{\text{сг}}}{R_1} = \frac{t_1^{\text{сг}} - t_2^{\text{сг}}}{R_2} = \frac{t_2^{\text{сг}} - t_2}{R_3}. \quad (291)$$

Последняя формула, выражающая тепловой закон Ома, дает возможность определить наружную и внутреннюю температуры стенки:

$$t_1^{\text{сг}} = t_1 - R_1 q; \quad t_2^{\text{сг}} = t_2 + R_3 q. \quad (292)$$

Термическое сопротивление многослойной стенки определяют как сумму сопротивлений промежуточных слоев:

$$R_2 = R_{\text{I}} + R_{\text{II}} + R_{\text{III}} + \dots = \frac{\delta_{\text{I}}}{\lambda_{\text{I}}} + \frac{\delta_{\text{II}}}{\lambda_{\text{II}}} + \frac{\delta_{\text{III}}}{\lambda_{\text{III}}} + \dots \quad (293)$$

Перепады температур в слоях пропорциональны их термическим сопротивлениям:

$$\frac{\Delta t_{\text{I}}}{R_{\text{I}}} = \frac{\Delta t_{\text{II}}}{R_{\text{II}}} = \frac{\Delta t_{\text{III}}}{R_{\text{III}}}. \quad (294)$$

Рекуператоры рассчитывают по следующим двум уравнениям:

уравнению теплопередачи

$$Q = k F \Delta t_m [\text{вт}] \quad (295)$$

и уравнению баланса тепла (пренебрегая потерями тепла в окружающее пространство)

$$Q = V_{\text{пр.гор}} c_{\text{пр.гор}} (t'_{\text{пр.гор}} - t''_{\text{пр.гор}}) = V_{\text{возд}} c_{\text{возд}} (t''_{\text{возд}} - t'_{\text{возд}}) \quad (296)$$

или

$$Q = W_1 (t'_{\text{пр.гор}} - t''_{\text{пр.гор}}) = W_2 (t''_{\text{возд}} - t'_{\text{возд}}),$$

где

$Q$  — количество тепла, передаваемое в рекуператоре от продуктов горения воздуху,  $\text{вт}$ ;

$F$  — поверхность теплообмена,  $\text{м}^2$ ;

$\Delta t_m$  — среднеинтегральная разность температур продуктов горения и воздуха,  $\text{град}$ ;

$V_{\text{пр.гор}}$  — часовой объем продуктов горения, проходящих через рекуператор,  $\text{м}^3/\text{сек}$  при н. ф. у.

$V_{\text{возд}}$  — часовой объем нагреваемого воздуха,  $\text{м}^3/\text{сек}$  при н. ф. у.;

$c_{\text{пр.гор}}$  и  $c_{\text{возд}}$  — средняя теплоемкость продуктов горения и воздуха,  $\text{дж}/\text{м}^3 \cdot \text{град}$  при н. ф. у.;

$t'_{\text{пр.гор}}$  и  $t''_{\text{пр.гор}}$  — начальная и конечная температуры продуктов горения,  $\text{град}$ ;

$t'_{\text{возд}}$  и  $t''_{\text{возд}}$  — начальная и конечная температуры воздуха,  $\text{град}$ ;

$W_1 = V_{\text{пр.гор}} \cdot c_{\text{пр.гор}}$ , — так называемые водяные эквиваленты продуктов горения и воздуха.

Зная остальные величины, расчет обычно сводят к определению конечной температуры продуктов горения  $t''_{\text{пр.гор}}$  по уравнению (296). Затем по этой температуре определяют среднеинтегральную разность температур  $\Delta t_m$ , коэффициент теплопередачи  $k$  и, наконец, поверхность рекуператора по уравнению (295).

Среднеинтегральная разность температур продуктов горения и воздуха  $\Delta t_m$  зависит от схемы движения их вдоль поверхности нагрева и соотношения водяных эквивалентов  $W_1$  и  $W_2$ .

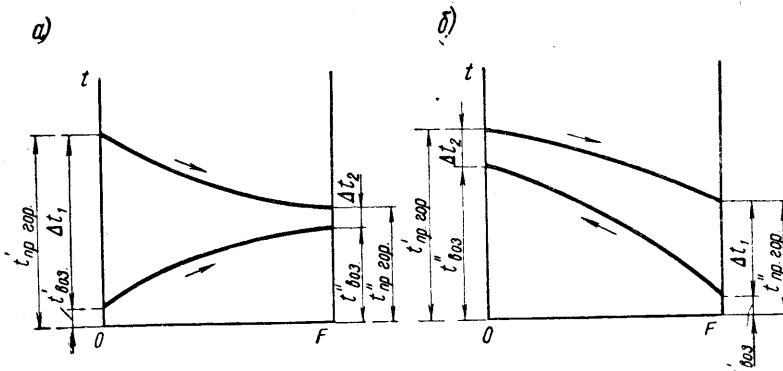


Рис. 79. Схема изменения температуры продуктов горения и воздуха по поверхности теплопередачи:  
а — при прямотоке; б — при противотоке

Можно применять следующие основные схемы движения: продукты горения и воздух движутся в одном направлении вдоль поверхности нагрева (прямоток), продукты горения и воздух — навстречу друг другу (противоток), продукты горения и воздух протекают в перекрестном направлении (перекрестный ток), наконец, могут быть различные комбинированные схемы. Схемы изменения температур при прямом токе и противотоке приведены на рис. 79.

Величину среднеинтегральной разности температур в случае прямотока или противотока можно определить по формуле:

$$\Delta t_m = \frac{\Delta t_2 - \Delta t_1}{\ln \frac{\Delta t_2}{\Delta t_1}} \quad [град] \quad (297)$$

или

$$\frac{\Delta t_m}{\Delta t_1} = \frac{\frac{\Delta t_2}{\Delta t_1} - 1}{\ln \frac{\Delta t_2}{\Delta t_1}} \quad [град], \quad (298)$$

где  $\Delta t_1$  — большая и  $\Delta t_2$  — меньшая температурные разности (см. рис. 79).

При перекрестном и комбинированном токе  $\Delta t_m$  определить сложнее, но в соответствующих литературных источниках даны методы ее расчета.

Коэффициент теплопередачи  $k$  в случае плоской поверхности (пластинчатый рекуператор) определяют по формуле (288).

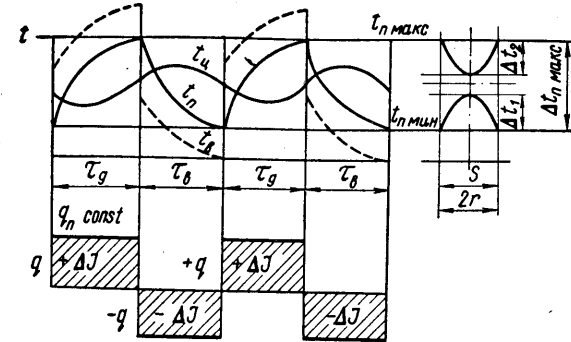


Рис. 80. График изменения температур:  
 $t_{\Pi}$  и  $t_{\Pi}$  — поверхности и центра элемента насадки;  $t_{\text{в}}$  — воздуха в определенном месте регенератора

Для трубчатых же поверхностей нагрева, которые часто применяют при конструировании рекуператоров, коэффициент  $k$ , отнесенный к 1 м трубы

$$k = \frac{2\pi}{\frac{1}{\alpha_{\text{л+к}} r_2} + \frac{1}{\lambda} \ln \frac{r_2}{r_1} + \frac{1}{\alpha_{\text{возд}} r_1}} \quad [вт/м \cdot град], \quad (299)$$

где  $r_2$  и  $r_1$  — наружный и внутренний радиусы трубы, причем продукты горения движутся снаружи, а воздух — внутри трубы.

Поверхность нагрева рекуператора определяют в этом случае, как произведение длины одной трубы на количество труб:

$$Ln = \frac{Q}{k \Delta t_m}. \quad (300)$$

Учитывая загрязнение поверхностей нагрева в процессе работы, значение коэффициента  $k$ , полученное по формуле (288) и (299), обычно уменьшают на 15—25%.

Процессы, происходящие в регенераторах, сложнее, так как в них наблюдается неустойчивое тепловое состояние.

Если обозначить продолжительность работы насадки на отходящих газах через  $\tau_{\text{дым}}$ , на воздухе  $\tau_{\text{возд}}$ , а общую продолжительность одного периода  $\tau_0$  в час, то обычно при двух насадках  $\tau_0 = \tau_{\text{дым}} + \tau_{\text{возд}}$  и  $\tau_{\text{дым}} = \tau_{\text{возд}}$ .

Характер изменения температуры дыма (продуктов горения), воздуха, поверхности и центра элемента насадки в каком-то определенном ее месте показан на рис. 80.

Характер распределения температур остается одинаковым по всей насадке, но абсолютные значения  $t_{\text{дым}}$ ,  $t_{\text{возд}}$ ,  $t_{\text{пов}}$  и  $t_{\text{цел}}$  меняются от начала к концу насадки. Поэтому для точного определения тепла, переданного воздуху в регенераторе, должно служить уравнение:

$$Q = \int_0^F \int_0^{\tau_B} (k \Delta t) d\tau \cdot dF = (k \cdot \Delta t)_{\text{ср}} F \tau_{\text{возд}} = q_{\text{ср}} F \tau_{\text{возд}} [\text{кдж}]. \quad (301)$$

При этом разность температур  $\Delta t = t_{\text{пов}} - t_{\text{возд}}$  и коэффициент теплообмена  $k$  являются функциями  $F$  и  $\tau$  поверхности насадки регенератора и времени

$$k = f(F; \tau); \Delta t = \varphi(F; \tau). \quad (302)$$

Практически при исследованиях и расчетах регенераторов необходимо определить среднее по времени значение  $k$  и  $\Delta t$  для начала, середины и конца насадки:

$$q_{\text{ср}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{i=n} (k, \Delta t_i) [\text{вт}/\text{м}^2]. \quad (303)$$

Кроме того, неравномерность распределения газовых потоков по сечению насадки может также уменьшить общее количество передаваемого тепла.

В. А. Куроедов предлагает учитывать это обстоятельство коэффициентом  $\delta = 0,75-1,0$ .

Тогда окончательно уравнение теплообмена будет иметь следующий вид:

$$Q = \delta q_{\text{ср}} F \tau_{\text{возд}}. \quad (304)$$

Количество тепла, передаваемое воздуху в насадке с учетом покрытия потерь регенератором в окружающее пространство  $Q_5^{\text{рег}}$ , будет:

$$Q = [V_{\text{возд}} c_{\text{возд}} (t_{\text{возд. средн}}'' - t_{\text{возд}}') + Q_5^{\text{рег}}] \tau_{\text{возд}} [\text{кдж}], \quad (305)$$

где  $V_{\text{возд}}$  — объем воздуха, нагреваемого в регенераторе,  $\text{м}^3/\text{сек}$  при н. ф. у.

$c_{\text{возд}}$  — средняя теплоемкость воздуха в пределах температур  $t_{\text{возд. средн}}'' - t_{\text{возд}}'$ ,  $\text{кдж}/\text{м}^3 \cdot \text{град}$  при н. ф. у.;

$t_{\text{возд. средн}}''$  — средняя за время  $\tau_{\text{возд}}$  температура нагрева воздуха;

$t_{\text{возд}}$  — начальная температура воздуха,  $^{\circ}\text{C}$ .

Второе уравнение для расчета регенератора будет такое же, как и для рекуператора, — уравнение баланса тепла:

$$[V_{\text{пр. гор}} c_{\text{пр. гор}} (t_{\text{дым. средн}}' - t_{\text{дым. средн}}'') - Q_5^{\text{рег}}] \tau_{\text{дым}} = [V_{\text{возд}} c_{\text{возд}} (t_{\text{возд. средн}}'' - t_{\text{возд. средн}}') + Q_5^{\text{рег}}] \tau_{\text{возд}} [\text{кдж}], \quad (306)$$

где  $V_{\text{пр. гор}}$  — объем продуктов горения, проходящих через регенератор,  $\text{м}^3 \cdot \text{сек}$  при н. ф. у.;

$c_{\text{пр. гор}}$  — средняя теплоемкость продуктов горения в пределах температур  $t_{\text{дым. средн}}' - t_{\text{дым. средн}}''$ ,  $\text{дж}/\text{м}^3 \cdot \text{град}$  при н. ф. у.;

$t_{\text{дым. средн}}'$  и  $t_{\text{дым. средн}}''$  — средние температуры дыма при входе и выходе из насадки за время работы насадки на продуктах горения,  $\text{град}$ .

Определив из уравнения (304) необходимую поверхность насадки  $F$ , определяем объем одной насадки:

$$V_{\text{нас}} = \frac{F}{f} [\text{м}^3], \quad (307)$$

где  $f$  — поверхность, приходящаяся на  $1 \text{ м}^3$  объема насадки,  $\text{м}^2$ . Ее подсчитывают, исходя из размеров и формы элементов насадки.

Площадь сечения насадки  $S_{\text{нас}}$  определяют, исходя из скорости газов в решетке  $w_0 = 0,5-1,5 \text{ м/сек}$  с учетом того, что площадь для прохода газов составляет часть общей площади сечения.

### § 33. ГИДРО- И ЭЛЕКТРОИНТЕГРАТОРЫ

Задачи о нагревании и охлаждении тел можно решать также методом аналогии (см. стр. 131).

В случае применения гидротепловой аналогии процесс распространения тепла в твердом теле заменяют движением жидкости в системе сообщающихся сосудов.

Представим себе сечение пластины, равномерно нагреваемой (или охлаждаемой) с обеих сторон (рис. 81). Это сечение разделим на  $m$  слоев (причем  $m$  должно быть нечетным числом). Будем считать, что количество тепла, заключенной в каждом слое, является как бы жидкостью, заключенной в отдельном сосуде, и эти сосуды, моделирующие слои плоского тела, соединены друг с другом трубками с определенными гидравличе-

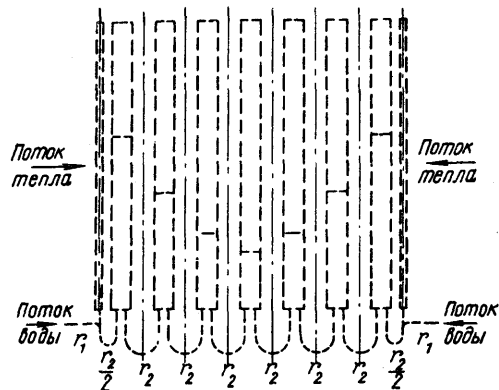


Рис. 81. Схема, иллюстрирующая аналогию между движением воды в гидроинтеграторе и распространением тепла в твердом теле

скими сопротивлениями  $r_2$ , моделирующими тепловые сопротивления между центрами слоев.

Так как процессы, происходящие в обеих половинах пластины, одинаковы, то на модели (на гидравлическом интеграторе) берем количество сосудов, равное  $\frac{m}{2}$ ; при этом сосуд, моделирующий центральный слой, имеет сечение, в два раза меньшее, чем остальные. Капиллярный сосуд, связанный с первым основным сосудом с помощью сопротивления  $\frac{r_2}{2}$ , моделирует поверхность пластины.

Схема гидроинтегратора для решения задач по нагреванию и охлаждению плоского тела приведена на рис. 82, а аналогия тепловых величин в натуре и гидравлических на приборе приведена на стр. 203.

При решении вопросов с помощью гидроинтегратора сначала определяют необходимую величину критерия Био, затем тарируют прибор, подбирая такое сопротивление  $r_1$ , которое обеспечит необходимую величину критерия Био на приборе.

Прибор тарируют при установившемся движении воды из сосуда большого объема в окружающую среду (см. рис. 82). При этом уровни воды во всех трубках устанавливаются постоянными.

При тарировке определяют высоты уровней  $H_1$  и  $H_2$ , а также количество воды, протекающее через прибор в единицу времени  $V_{сек}$  м<sup>3</sup>/сек.

### Гидротепловая аналогия

Тепловые величины в натуре

Величины на гидроинтеграторе

#### Основное дифференциальное уравнение

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 t}{\partial x^2}$$

$$\frac{\partial h}{\partial \tau} = \frac{1}{r_2 \omega} \cdot \frac{\partial^2 h}{\partial n^2}$$

Температура

$$t [^{\circ}\text{C}]$$

Высота уровня воды

$$h [\text{см}]$$

Относительная температура

$$\frac{t - t_{нач}}{t_0 - t_{нач}}$$

Относительная высота уровня

$$\frac{h}{h_0}$$

Половина толщины пластины

$$x_1 [\text{м}]$$

Полное количество сосудов

$$N$$

Относительные координаты

$$\frac{x}{x_1}$$

Отношение количества сосудов

$$\frac{n}{N}$$

Тепловое сопротивление слоя

$$\frac{\Delta x}{\lambda} \frac{\text{м}^2 \cdot \text{град} / \text{вт}}{\text{ккал}} \quad (\Delta x = \frac{x_1}{N})$$

Гидравлическое сопротивление между сосудами

$$r_2 [\text{сек} / \text{см}^2]$$

Объемная теплоемкость

$$c \gamma [\text{кдж} / \text{м}^3 \cdot \text{град}]$$

Площадь сечения сосуда

$$\omega [\text{см}^2]$$

Коэффициент теплоотдачи на поверхности пластины

$$\alpha_{л+к} [\text{вт} / \text{м}^2 \cdot \text{град}]$$

Величина, обратная гидравлическому сопротивлению между сосудом большего объема и прибором

$$\frac{1}{r_1} [\text{см}^2 / \text{сек}]$$

Тепловой поток

$$q = \frac{\lambda}{x_1} \Delta t [\text{вт} / \text{м}^2]$$

Количество воды, протекающее через систему сосудов

$$V_{сек} = \frac{\Delta h}{r_2 N} [\text{см}^3 / \text{сек}]$$

Критерий Био

$$Bi = \frac{\alpha_{л+к} x_1}{\lambda}$$

$$Bi_{приб} = \frac{r_2}{r_1} N$$

Критерий Фурье

$$Fo = \frac{a \tau}{x_1^2}$$

$$Fo_{приб} = \frac{1}{r_2 \omega N^2} \tau_{сек}$$

$$\text{Масштаб времени: } \frac{\tau_{нат}}{\tau_{приб}} = \frac{x_1^2}{a} \cdot \frac{1}{r_2 \omega N^2} 3600. \quad (308)$$

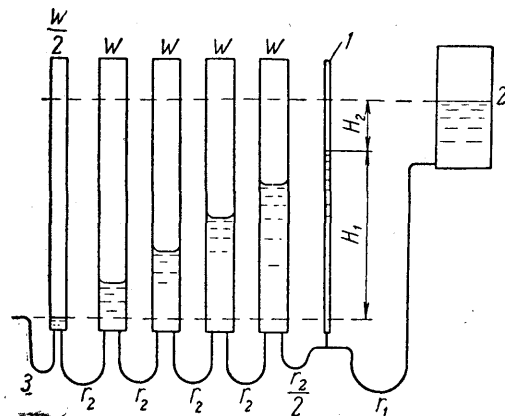


Рис. 82. Схема прибора для гидравлического моделирования теплопередачи теплопроводностью (гидроинтегратора). Показан момент тарировки прибора:

1 — капиллярная трубка; 2 — сосуд большого объема с постоянным уровнем воды (среда I); 3 — слив воды (среда II)

Критерии Био и Фурье связаны с этими величинами и другими величинами, характеризующими прибор, следующими соотношениями:

$$Bi = \frac{r_2}{r_1} N = \frac{H_2}{H_1}; \quad (309)$$

$$Fo = \frac{\tau_{сек}}{r_2 \omega N^2} = \frac{V_{сек}}{H_1 \omega N} \tau_{сек}. \quad (310)$$

После определения критериев нагрев пластины в среде с температурой  $t_0$  исследуют так: уровень воды в сосудах прибора  $h_{нач}$  устанавливают в соответствии с начальной температурой  $t_{нач}$  (из соотношения  $\frac{h_{нач}}{h_0} = \frac{t_{нач}}{t_{среды}}$ ). После этого открывают зажим между прибором и сосудом большого объема, уровень воды в котором  $h_0$  моделирует температуру среды  $t_{среды}$ , и включают секундомер. Фиксируя высоту уровня воды в сосудах через определенные промежутки времени, получим картину нагрева тела.

При исследовании охлаждения после тарировки трубку, соединяющую сосуд большого объема с системой, моделирующей пластину, устанавливают на уровень, соответствующий температуре охлаждающей среды.

Систему трубок заливают водой до уровня  $h_0$ , который соот-

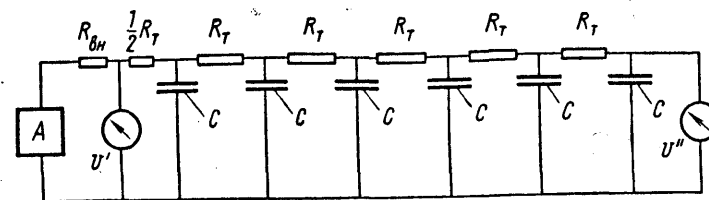


Рис. 83. Схема электроинтегратора:

$\mu'$  и  $\mu''$  — вольтметры, измеряющие напряжения, соответствующие температурам поверхности и центра пластины

ветствует начальной температуре охлаждающейся пластины. Затем открывают кран и включают секундомер. Вода начинает выливаться из прибора.

Наблюдая за высотой уровней воды в сосудах через определенные промежутки времени, получаем картину распределения температур при охлаждении пластины.

Гидроинтеграторы можно выполнить и для тел более сложной формы (цилиндр, шар, призма квадратного сечения и др.).

При электротепловой аналогии половину толщины пластины заменяют электрической цепью, состоящей из источника тока, омических сопротивлений и емкостей (рис. 83).

Аналогия электрических и тепловых величин приведена ниже.

#### Электротепловая аналогия

Тепловые величины в натуре:

Температура  $t[^\circ\text{C}]$

Тепловые сопротивления

$$\frac{\Delta x}{\lambda} [\text{м}^2 \text{ град/вт}]$$

Объемная теплоемкость

$$c \gamma [\text{кдж/м}^3 \cdot \text{град}]$$

Электрические величины на приборе:

Напряжение  $V[\text{в}]$

Омические сопротивления  $R_T[\text{ом}]$

Электрическая емкость  $c[\text{ф}]$

$$\text{Масштаб времени: } \frac{\tau_{нат}}{\tau_{приб}} = \frac{\frac{\Delta x}{\lambda} c \gamma}{R_T c}. \quad (311)$$

Существуют и другие, более сложные схемы электроинтеграторов, которые являются по существу счетно-решающими машинами.

## НАГРЕВ МЕТАЛЛА В ПЕЧАХ

## § 34. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Определение продолжительности нагрева слитков и заготовок в печах связано с их производительностью или правильным выбором размеров пода проектируемой печи.

Эту связь определяют следующими соотношениями.

Штучная производительность печи:

$$N = \frac{G}{g} \text{ [шт./ч]}, \quad (312)$$

где  $G$  — часовая производительность печи, кг/ч;

$g$  — вес нагреваемой заготовки или слитка, кг/шт.

Количество слитков или заготовок, которое должно находиться одновременно в печи, чтобы обеспечить указанную штучную производительность:

$$n = N\tau_{\text{нагр}} \text{ [шт.]}, \quad (313)$$

где  $\tau_{\text{нагр}}$  — продолжительность нагрева 1 шт., ч.

Площадь пода, занятая металлом:

$$F_{\text{акт}} = nf_{\text{м}} \text{ [м}^2\text{]}, \quad (314)$$

где  $f_{\text{м}}$  — проекция нагреваемой заготовки или слитка на под, м<sup>2</sup>.

Коэффициент загрузки пода

$$k_{\text{пода}} = \frac{F_{\text{акт}}}{F_{\text{пода}}}, \quad (315)$$

где  $F_{\text{пода}}$  — площадь пода печи, м<sup>2</sup>.

Необходимые размеры площади пода для обеспечения часовой производительности  $G$  кг/ч или штучной  $N$  шт/ч:

$$F_{\text{пода}} = \frac{F_{\text{акт}}}{k_{\text{пода}}} = \frac{nf_{\text{м}}}{k_{\text{пода}}} = \frac{N\tau_{\text{нагр}} f_{\text{м}}}{k_{\text{пода}}} = \frac{Gf_{\text{м}}}{gk_{\text{пода}}} \tau_{\text{нагр}} \text{ [м}^2\text{]}. \quad (316)$$

Весовая производительность печи (при заданной площади пода)

$$G = \frac{k_{\text{пода}} F_{\text{пода}} g}{f_{\text{м}} \tau_{\text{нагр}}} \text{ [кг/ч]}. \quad (317)$$

Напряженность пода печи

$$P = \frac{G}{F_{\text{пода}}} = \frac{g}{f_{\text{м}}} \cdot \frac{k_{\text{пода}}}{\tau_{\text{нагр}}} \text{ [кг/м}^2 \cdot \text{ч]}. \quad (318)$$

Из этих соотношений видно, что уменьшение продолжительности нагрева  $\tau_{\text{нагр}}$  ведет к увеличению производительности (напряженности пода) существующей печи или к сокращению размеров пода проектируемой печи, т. е. к уменьшению размеров и стоимости сооружения.

Следовательно, нагрев следует вести так, чтобы продолжительность его была минимальной.

Однако при этом необходимо еще учитывать влияние коэффициента загрузки пода —  $k_{\text{пода}}$ . При малом значении  $k_{\text{пода}}$  заготовки лежат на поду на большом расстоянии друг от друга, продолжительность нагрева сокращается, но вследствие уменьшения  $k_{\text{пода}}$  производительность печи может не увеличиваться, а уменьшаться [см. уравнение (317)]. Если же заготовки положить вплотную друг к другу, то  $k_{\text{пода}}$  возрастет и увеличится  $\tau_{\text{нагр}}$ .

Практически в целях получения максимальной производительности для камерных печей  $k_{\text{пода}}$  должно находиться в пределах 0,4—0,5. Для методических и проходных печей, когда заготовки лежат вплотную друг к другу, увеличение  $k_{\text{пода}}$  ведет к повышению производительности печи. Однако, чтобы концы слитков или заготовок при движении не разрушали стенок печи,  $k_{\text{пода}}$  берут в пределах 0,7—0,9. Эффективным мероприятием по сокращению  $\tau_{\text{нагр}}$  в методических печах является введение интенсивного нижнего подогрева.

### § 35. ПОНЯТИЕ О «ТОНКОМ» И «МАССИВНОМ» ТЕЛАХ

При определении продолжительности нагрева слитков и заготовок в печах различают случаи нагрева «тонких» и «массивных» тел.

При нагреве холодного слитка или заготовки, посаженных в печь, происходят два процесса: передача тепла на поверхность тела и распространение тепла с поверхности внутрь тела.

Соотношение между количеством тепла, полученным поверхностью, и количеством тепла, отведенным внутрь, характеризуется критерием Био:

$$Bi = \frac{\alpha_{л+к}}{\lambda} = \frac{\alpha_{л+к} S(R)}{\lambda S(R)}. \quad (319)$$

Значения условных обозначений приведены на стр. 149—150.

Если значение критерия Био велико (процесс теплопередачи на поверхность происходит интенсивнее отвода тепла внутрь тела), то нагрев происходит с большой разностью температур между поверхностью и центром. Если значение критерия Био мало (при более интенсивном процессе отвода тепла с поверхности внутрь), то разность температур по сечению нагреваемого тела будет небольшой. В первом случае будем иметь «массивное», с точки зрения нагрева, тело; во втором случае — «тонкое» тело. Расчет нагрева «тонких» тел значительно проще, чем «массивных», так как разностью температур по сечению тела можно пренебречь и считать, что в каждый момент температура по всей массе одинакова и равна температуре поверхности.

Теоретические и экспериментальные данные показывают, что «тонкими» телами являются те, для которых значения критерия Био не превышают 0,25, а «массивными» телами — такие, для которых значения критерия Био больше 0,5. Интервал значений  $Bi = 0,25 \div 0,5$  представляет переходную область, которую при точном расчете следует отнести к «массивным» телам, а при приближенном — к «тонким».

Следует отметить, что критерий Био определяется не только размерами ( $s$  или  $R$ ) и физическими свойствами тела ( $\lambda$ ), но и условиями теплопередачи на поверхность ( $\alpha_{л+к}$ ). Поэтому одно и то же тело (слиток, заготовка) при нагреве в среде с низкой температурой (при малых значениях  $\alpha_{л+к}$ ) может быть отнесено к «тонким», а при нагреве в среде с высокой температурой (при больших значениях  $\alpha_{л+к}$ ) может оказаться «массивным», с точки зрения нагрева, телом.

При охлаждении тел понятия о «тонком» и «массивном» телах остаются теми же.

### 1. Нагрев «тонких» тел

Решение задачи о нагреве тонких тел выполнил проф. Б. В. Старк.

Дифференциальное уравнение, отражающее процесс нагрева тонкого тела, имеет следующий вид:

$$q_{г. кл. м} F_{эфф} d\tau = g c d t, \quad (320)$$

где  $q_{г. кл. м}$  — тепловой поток на поверхности нагреваемого тела  $вт/м^2$ ;

$F_{эфф}$  — эффективная тепловоспринимающая поверхность,  $м^2$ ;

$g$  — масса нагреваемого тела,  $кг$ ;

$c$  — теплоемкость,  $кдж/кг \cdot град$ ;

$\tau$  — время,  $сек$ ;

$t$  — температура,  $град$ .

Величину теплового потока на поверхности тела при нагреве его в печи ( $q_{г. кл. м}$ ) можно выразить уравнением (278) — привести к закону конвекции и можно выразить уравнением (282), т. е. привести к закону излучения.

Подставляя значение  $q_{г. кл. м}$  по закону конвекции в уравнение (320), интегрируя его и решая относительно  $t_m^{кон}$ , получим:

$$t_m^{кон} = (t_{печи} - t_{нач}) \cdot (1 - e^{-\frac{\alpha_{л+к} F_{эфф}}{g c}}) + t_{нач} \text{ } ^\circ\text{C}. \quad (321)$$

Решая это уравнение относительно времени, будем иметь

$$\tau = \frac{g c}{F_{эфф} \alpha_{л+к}} \cdot \ln \frac{t_{печи} - t_{нач}}{t_{печи} - t_m^{кон}} \text{ [сек]}. \quad (322)$$

Если обозначить массу нагреваемого тела  $g = V \rho$   $кг$  (где  $V$  — объем тела, а  $\rho$  — плотность), то

$$\tau = \frac{V}{F_{эфф}} \cdot \frac{\rho c}{\alpha_{л+к}} \cdot \ln \frac{t_{печи} - t_{нач}}{t_{печи} - t_m^{кон}} \text{ [сек]}. \quad (322a)$$

Это уравнение показывает, что продолжительность нагрева «тонких» тел прямо пропорциональна линейному размеру тела (так как отношение  $\frac{V}{F_{эфф}}$  пропорционально толщине или диаметру нагреваемого слитка или заготовки), объемной теплоемкости —  $\rho c$ , логарифму отношения начальной и конечной разностей температур и обратно пропорциональна коэффициенту теплопередачи лучеиспусканием и конвекцией на поверхности тела.

Уравнение (321) можно выразить также в критериальной форме:

$$\frac{t_{\text{печи}} - t_{\text{м}}^{\text{кон}}}{t_{\text{печи}} - t_{\text{нач}}} = e^{-m \cdot Bi \cdot Fo}, \quad (321a)$$

где  $Bi$  и  $Fo$  — критерии Био и Фурье;

$m$  — коэффициент, зависящий от отношения объема тела к его поверхности (для пластины  $m=1$ , для цилиндра  $m=2$ , для шара  $m=3$ ).

Время нагрева (или охлаждения) будет соответственно равно:

$$\tau = \frac{s^2 \cdot \ln \left( \frac{t_{\text{печи}} - t_{\text{нач}}}{t_{\text{печи}} - t_{\text{м}}^{\text{кон}}} \right)}{a \cdot Bi} \cdot \frac{1}{m}. \quad (321б)$$

Из последнего выражения следует, что при прочих равных условиях для «тонких» тел действительно соотношение:

$$\tau_{\text{пласт}} : \tau_{\text{цил}} : \tau_{\text{шара}} = 1 : \frac{1}{2} : \frac{1}{3}.$$

Если в уравнение (320) подставить значение  $q_{\text{г. кл. м}}$  по закону излучения (282), то, интегрируя его и решая относительно времени  $\tau$ , получим:

$$\tau = \frac{V}{F_{\text{эфф}}} \cdot \frac{\rho c}{c_{\text{г. кл. м}}} \cdot \frac{100}{2 \left( \frac{T}{100} \right)^3} \left[ \arctg \frac{T_{\text{м}}^{\text{кон}}}{T_{\text{печи}}} - \arctg \frac{T_{\text{нач}}}{T_{\text{печи}}} + \right. \\ \left. + \frac{1}{2} \left( \ln \frac{T_{\text{печи}} + T_{\text{м}}^{\text{кон}}}{T_{\text{печи}} - T_{\text{м}}^{\text{кон}}} - \ln \frac{T_{\text{печи}} + T_{\text{нач}}}{T_{\text{печи}} - T_{\text{нач}}} \right) \right] [4]. \quad (323)$$

Уравнения (322) и (321б) значительно проще уравнения (323), однако для высокотемпературных печей, в которых преобладает теплопередача излучением, уравнение (323) является более точным.

Чтобы и в этом случае пользоваться более простыми выражениями (322) и (322а), можно вводить в качестве множителя поправку, которая зависит от величины  $T_{\text{печи}} - T_{\text{м}}^{\text{кон}}$  или  $t_{\text{печи}} - t_{\text{м}}^{\text{кон}}$  (табл. 36).

Г. П. Иванцов дает решение уравнения (320) также для случая, когда температура печи не постоянна, а изменяется по закону прямой линии:

$$t_{\text{печи}} = A\tau + t_0 \text{ } ^\circ\text{C}. \quad (324)$$

Таблица 36

Зависимость поправки от разности температур

$t_{\text{печи}} - t_{\text{м}}^{\text{кон}} \text{ [град]}$	5	20	100	200
$\frac{\tau (323)}{\tau (322)}$	0,88	0,92	1,0	1,04

Это решение относительно  $t_{\text{м}}^{\text{кон}}$  при  $q_{\text{г. кл. м}}$ , приведенному к закону конвекции (278), имеет следующий вид:

$$t_{\text{м}}^{\text{кон}} = A\tau + t_0 - \frac{A}{m} - \left( t_0 - t_{\text{нач}} - \frac{A}{m} \right) e^{-m\tau} [^\circ\text{C}], \quad (325)$$

где  $m = \frac{\alpha_{\text{л+к}} F_{\text{эфф}}}{gc}$ , так как при  $m\tau > 4$   $e^{-m\tau} \approx 0$ , то при  $\tau > \frac{4}{m}$  температура металла будет отличаться от температуры печи на постоянную величину  $\frac{A}{m} = A \cdot \frac{gc}{F_{\text{эфф}} \alpha_{\text{л+к}}}$ . Когда температура печи изменяется не по закону прямой, а по кривой, то, заменяя кривую отрезками прямых, можно вести расчет нагрева «тонкого» тела по формуле (325).

## 2. Нагрев «массивных» тел

Нагрев «массивных» тел рассчитывают по формулам теплопередачи теплопроводностью при неустановившемся тепловом состоянии, приведенным в предыдущей главе.

Чтобы правильно рассчитывать нагрев «тонких» и «массивных» тел, нужно достаточно точно знать физические параметры нагреваемых тел — слитков и заготовок.

## § 36. ФИЗИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ НАГРЕВАЕМЫХ ТЕЛ

К физическим параметрам, которые связаны с процессом нагрева, относятся: теплопроводность —  $\lambda [\text{вт/м} \cdot \text{град}]$ ; теплосодержание —  $i [\text{кдж/кг}]$ ; теплоемкость —  $c [\text{кдж/кг} \cdot \text{град}]$ , плотность —  $\rho [\text{кг/м}^3]$ , температуропроводность —  $a = \frac{\lambda}{c\rho} [\text{м}^2/\text{сек}]$  и так называемый коэффициент термодиффузии

$$b = \sqrt{\lambda c \rho} [\text{кдж/м}^2 \cdot \text{сек}^{0,5} \cdot \text{град}].$$



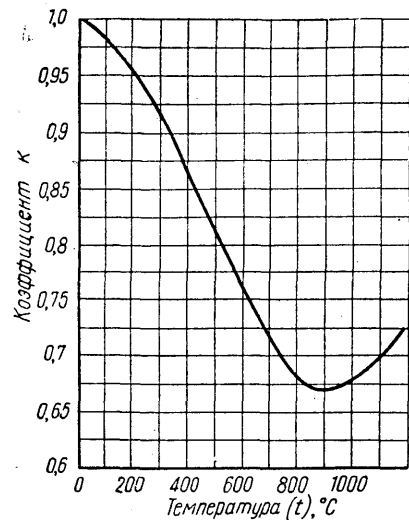


Рис. 84. График для определения поправки  $k$ , учитывающей изменение теплопроводности углеродистых сталей при изменении температуры

ящиеся в них примеси в меньшей степени отрицательно влияют на их структуру (см. рис. 44).

Зависимость коэффициента теплопроводности от температуры в действительности очень сложна.

Данные о теплопроводности сталей разных марок, а также некоторых цветных сплавов приведены в табл. 1 приложения 5.

Для углеродистых сталей коэффициент  $k$ , характеризующий зависимость теплопроводности от температуры, приведен на рис. 84

$$\lambda_t = k\lambda_0 [\text{вт/м} \cdot \text{град}]. \quad (326)$$

Величину коэффициента теплопроводности при  $0^\circ\text{C}$   $\lambda_0$  можно определить для углеродистых сталей по следующим формулам в зависимости от их химического состава:

$$\lambda_0 = \frac{416}{5,74 + 2,43 \cdot C + 5,09 \cdot Si + 2,46 Mn} [\text{вт/м} \cdot \text{град}] \quad (327)$$

при  $c < 0,4\%$  (малоуглеродистые стали) и

$$\lambda_0 = \frac{416}{4,4 + 8,7 \cdot C + 3,67 \cdot Si + 1,9 Mn} [\text{вт/м} \cdot \text{град}] \quad (327a)$$

при  $c > 0,4\%$  (средние и высокоуглеродистые стали).

Коэффициент теплопроводности характеризует способность металла проводить тепло, которая связана с колебательным движением молекул, расположением атомов в кристаллической решетке и длиной свободного пути электронов.

Повышение температуры приводит к уменьшению длины свободного пути электронов и понижению теплопроводности чистых металлов, а также углеродистых сталей (см. рис. 44). Коэффициент теплопроводности высоколегированных сталей, а также сплавов цветных металлов с повышением температуры несколько увеличивается, так как под действием тепла положение атомов в кристаллической решетке этих материалов улучшается и содержа-

## 1. Теплосодержание и теплоемкость

Теплосодержанием называется количество тепла, которое необходимо передать 1 кг вещества, чтобы повысить его температуру от  $0^\circ\text{C}$  до данной температуры (или от абсолютного нуля до данной температуры):

$$i_t = c_0^t t [\text{кдж/кг}], \quad (328)$$

где  $i_t$  — теплосодержание тела, кдж/кг;

$t$  — температура, град;

$c_0$  — коэффициент пропорциональности, называемый средней удельной теплоемкостью в пределах температур  $0-t$ , кдж/кг · град.

При нагреве тела от температуры  $t_1$  до температуры  $t_2$  среднюю теплоемкость можно выразить формулой

$$c_{t_1}^{t_2} = \frac{i_2 - i_1}{t_2 - t_1} = \frac{c_0^{t_2} t_2 - c_0^{t_1} t_1}{t_2 - t_1} [\text{кдж/кг} \cdot \text{град}]. \quad (329)$$

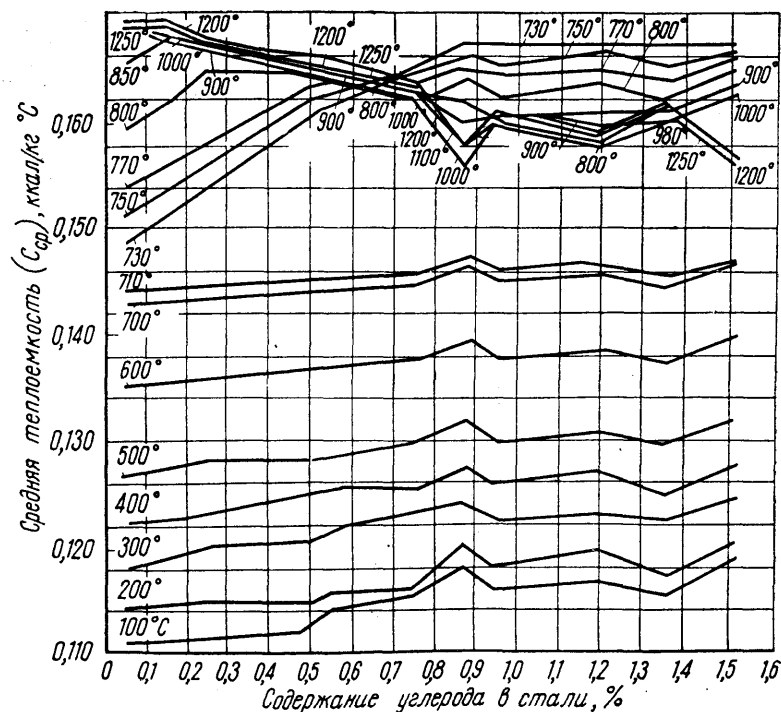


Рис. 85. Зависимость средней теплоемкости углеродистых сталей от температуры и содержания углерода

При бесконечно малой разности температур  $dt$ , бесконечно малом изменении теплосодержания  $di$  и массе тела 1 кг величина теплоемкости выразится так:

$$c_t = \frac{di}{dt} [\text{кдж/кг} \cdot \text{град}]. \quad (330)$$

Эту величину принято называть истинной теплоемкостью при данной температуре  $t$ .

Теплоемкость металлов и их сплавов зависит от химического состава и температуры.

Зависимость средней теплоемкости углеродистых сталей от температуры и содержания углерода выражена на рис. 85. Зависимость теплосодержания от температуры для некоторых марок высоколегированной стали приведена в табл. 3 приложения 5. В табл. 2 приложения 5 указаны теплосодержание, средняя теплоемкость при температуре плавления, температура и внутренняя теплота плавления, а также теплоемкость жидкого металла для различных металлов.

## 2. Плотность

На процесс нагрева металла влияет его плотность. С увеличением плотности возрастает количество тепла, поглощаемое одним и тем же объемом нагреваемого тела, в результате увеличивается продолжительность нагрева и выравнивания температуры по сечению этого тела. Плотность углеродистых и легированных сталей, а также сплавов цветных металлов при комнатной температуре (15—20° С) приведены в табл. 4 приложения 5.

Зависимость плотности от температуры выражают формулой

$$\rho_t = \frac{\rho_0}{1 + \beta t} [\text{кг/м}^3], \quad (331)$$

где  $\rho_0$  — плотность при 0° С (или при 20° С),  $\text{кг/м}^3$ ;

$\beta$  — коэффициент линейного расширения ( $3\beta = \alpha$  — коэффициент объемного расширения);

$t$  — температура, при которой определяют объемный вес, °С.

Значения средних коэффициентов линейного расширения  $\beta$  для некоторых марок сталей и сплавов цветных металлов приведены в табл. 5 приложения 5.

## 3. Коэффициент температуропроводности

При решении вопросов теплопередачи теплопроводностью при неустановившемся тепловом состоянии (вопросов нагрева и охлаждения тел) основную роль играет коэффициент температуропроводности, который является функцией теплопроводности, теплоемкости и объемного веса:

$$a = \frac{\lambda}{c\rho} [\text{м}^2/\text{сек}].$$

Для углеродистых сталей при комнатной температуре  $a = 1,12 \cdot 10^{-5} - 1,7 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{сек}$ , для легированных сталей — ниже  $1,7 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{сек}$ .

С повышением температуры коэффициент температуропроводности изменяется в зависимости от изменения величины физических параметров, входящих в него.

Вследствие резкого изменения истинной теплоемкости металлов в области критических точек значения коэффициента температуропроводности в этих температурных интервалах могут резко меняться.

В некоторых случаях при исследовании процесса нагрева приходится пользоваться так называемым коэффициентом термoinерции:

$$b = \sqrt{\lambda c\rho} [\text{дж/м}^2 \cdot \text{сек}^{0,5} \cdot \text{град}].$$

С повышением температуры коэффициент термoinерции углеродистых и малолегированных сталей изменяется в небольших пределах (4—10% среднего значения). Это объясняется тем, что при нагревании металла уменьшение теплопроводности ( $\lambda$ ) и плотности ( $\rho$ ) компенсируется увеличением теплоемкости ( $c$ ).

Благодаря этому для углеродистых и малолегированных сталей можно принимать  $b = 411,6 + 440 \text{ кдж/м}^2 \cdot \text{сек}^{0,5} \cdot \text{град}$ .

При расчетах с высоколегированными сталями коэффициент  $b$  следует в каждом случае вычислять, пользуясь соответствующими значениями  $\lambda$ ,  $c$  и  $\rho$  и их зависимостями от температуры.

Для серого чугуна  $b \approx 396 \text{ кдж/м}^2 \cdot \text{сек}^{0,5} \cdot \text{град}$ , для меди  $b \approx 1143 \text{ кдж/м}^2 \cdot \text{сек}^{0,5} \cdot \text{град}$ , для алюминия  $b \approx 770 \text{ кдж/м}^2 \cdot \text{сек}^{0,5} \cdot \text{град}$ .

## § 37. ТЕМПЕРАТУРА НАГРЕВА

Металл нагревают как для обработки давлением, так и для различных видов термической обработки. Для получения изделий высокого качества необходимо правильно назначать темпе-

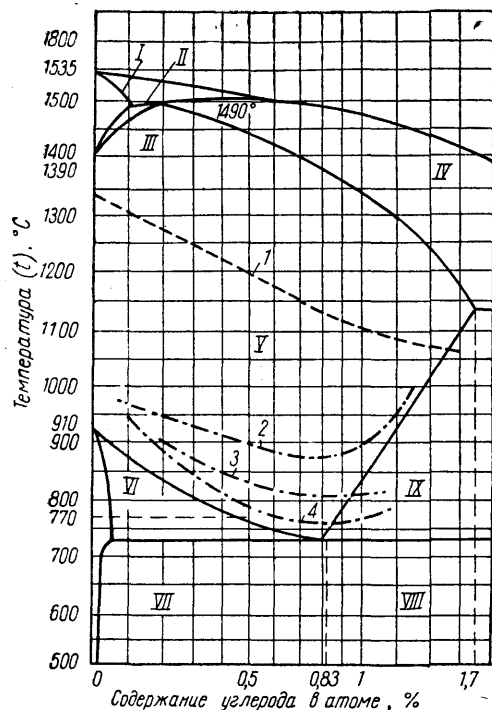


Рис. 86. Диаграмма состояния железоуглеродистых сплавов с указанием предела нагрева перед ковкой и термообработкой:

I — твердый раствор; II — твердый раствор и жидкий сплав; III — аустенит и твердый раствор; IV — жидкий сплав и кристаллический аустенит; V — аустенит; VI — феррит и аустенит; VII — перлит и феррит; VIII — перлит и цементит; IX — аустенит и цементит. Предельная температура при нагреве: 1 — под ковку; 2 — под нормализацию; 3 — под закалку; 4 — под отжиг

диффундировать вглубь его по границам зерен с образованием окислов железа. В этом случае металл становится очень хрупким, при ковке в нем образуется большое количество трещин. Такое явление называется пережогом и не может быть устранено термообработкой.

Для легированных сталей и различных сплавов температуры нагрева под ковку-штамповку и термообработку назначают на основании изучения диаграмм состояния и проведения комплекса испытаний.

ратуры, до которых металл нагревается в тех или иных случаях.

При нагреве углеродистых сталей в целях правильного выбора температур можно пользоваться рис. 86, на котором изображена диаграмма состояния железоуглеродистых сплавов с нанесенными на ней кривыми предельных температур нагрева под ковку, прокатку, нормализацию, отжиг и закалку.

В случае непродолжительного нагрева стали перед прокаткой или ковкой до температуры выше рекомендуемой, может образоваться крупнозернистая, так называемая видманштетовая структура с низкими механическими свойствами металла. Эта структура может быть исправлена путем термообработки (отжига и нормализации).

При длительном перегреве металла кислород, имеющийся в продуктах горения, которые соприкасаются с металлом, может

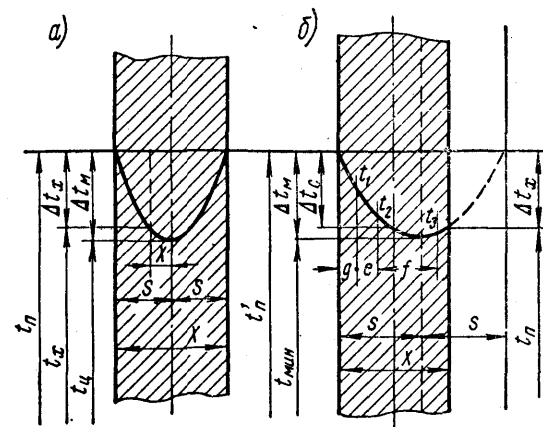


Рис. 87. Распределение температур по сечению тела при симметричном (а) и несимметричном (б) нагреве

## § 38. НАГРЕВ СЛИТКОВ И ЗАГОТОВОК В КАМЕРНЫХ ПЕЧАХ ПРИ ПОСТОЯННОЙ ТЕМПЕРАТУРЕ ПЕЧИ

Нагрев мелких и средних заготовок, а также небольших слитков на поду камерных печей с постоянной температурой широко применяют при обработке металлов давлением.

При расчетах нагрева в практических условиях — на поду камерных печей часто приходится иметь дело с так называемым несимметричным нагревом.

Симметричным называется нагрев, когда теплопередача с обеих сторон нагреваемой пластины или во всех точках боковой поверхности цилиндра происходит одинаково. Распределение температур в этом случае приведено на рис. 87, а. Точка самой низкой температуры будет находиться в геометрическом центре тела, а расстояние от нее до поверхности (расчетная толщина) будет равно половине толщины пластины или радиусу цилиндра.

Практически же при нагреве заготовок и слитков, лежащих на поду камерных печей, теплопередача происходит неодинаково со всех сторон. Такой нагрев называется несимметричным.

Схема распределения температур по сечению нагреваемого тела в этом случае приведена на рис. 87, б.

Расчетную толщину (радиус) заготовки или слитка при несимметричном нагреве определяют по формуле

$$S = \mu \cdot x \text{ или } R = \mu D \text{ [м]}, \quad (332)$$

где  $x$  — толщина пластины,  $a$ ;

$D$  — диаметр цилиндра,  $m$ ;

$\mu$  — коэффициент несимметричности нагрева  $\mu=1$  при одностороннем нагреве;  $\mu=0,5$  при двустороннем (симметричном) нагреве;  $0,5 < \mu < 1,0$  при несимметричном нагреве. Может быть  $\mu > 1$ , когда тепло отводится с нижней необогреваемой поверхности тела.

Коэффициент  $\mu$  можно определить по следующим формулам, зная величину тепловых потоков или измерив температуру в нескольких точках по сечению нагреваемого тела.

Если известны тепловые потоки на обеих поверхностях нагреваемой пластины, то

$$\mu = \frac{q'_{\text{пов}}}{q'_{\text{пов}} + q''_{\text{пов}}}, \text{ причем } q'_{\text{пов}} > q''_{\text{пов}}. \quad (333)$$

Если измерить температуру в двух точках — на наружной поверхности и в геометрическом центре тела (см. рис. 87, б), то для пластины

$$\mu = \frac{a \Delta t_c}{A x^2} + 0,25, \quad (334)$$

$$\text{для цилиндра } \mu = \frac{a \Delta t_c}{2AR^2} + 0,25. \quad (334a)$$

$$\text{Скорость нагрева } A = \frac{t_{\text{пов}}^{\text{кон}} - t_{\text{нач}}}{\tau} \text{ [}^\circ\text{C/ч]}.$$

Если измерить температуру в трех, произвольно взятых по толщине точках, то

$$\mu = \frac{1}{2x} \cdot \frac{(f^2 + 2ef + fg) t_1 + (e^2 + f^2 + 2ef + 2eg + 2fg) t_2 + (e^2 + 2eg) t_3}{ft_1 + (e + f) t_2 + et_3}. \quad (335)$$

Величины  $t_1, t_2, t_3, f, e$  и  $g$  приведены на рис. 87, б.

В целях обеспечения наиболее быстрого и высококачественного нагрева всегда следует стремиться к созданию таких условий расположения материала в печи, при которых нагрев приближается к симметричному.

Расчет нагрева слитков и заготовок в печах с постоянной температурой можно вести по формулам для «тонких» тел, ког-

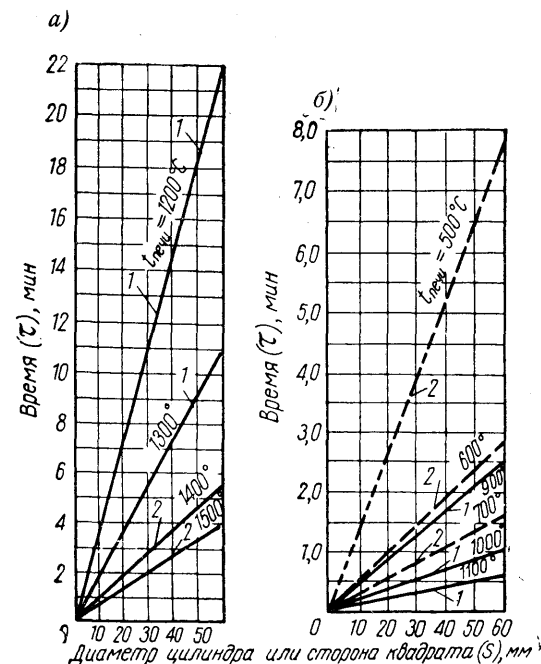


Рис. 88. Продолжительность нагрева цилиндрических и квадратных заготовок:

а — время нагрева стальных заготовок до  $1200^\circ\text{C}$ : 1 — в обычных кузнечных печах; 2 — в печах скоростного нагрева; б — время нагрева до  $900^\circ\text{C}$  латунных (1) и до  $500^\circ\text{C}$  алюминиевых (2) заготовок при различной температуре печи

да критерий Био не превышает 0,4, по графикам Д. В. Будрина или В. Н. Соколова, — когда критерий Био больше 0,4.

На рис. 88, а приведена продолжительность нагрева стальных заготовок до температуры  $1200^\circ\text{C}$  в печах с различной температурой, подсчитанная по формулам для тонких тел при симметричном нагреве. На рис. 88, б приведен подобный график для латунных и алюминиевых заготовок.

Для определения продолжительности нагрева заготовок мало- и среднеуглеродистых сталей в пламенных камерных печах с температурой  $1300\text{—}1350^\circ\text{C}$ , кроме изложенных выше точных способов, широко применяют формулу, предложенную Н. Н. Доброхотовым:

$$\tau = k_{\text{расп}} \cdot 10 \cdot D^{1,5} \text{ ч}, \quad (336)$$

где  $D$  — диаметр, или толщина заготовки,  $m$ ;

$k_{\text{расп}}$  — коэффициент, учитывающий влияние взаимного расположения заготовок на поду печи (несимметричность нагрева).

Таблица 37

Значения коэффициента  $k_{расп}$  для цилиндрических и квадратных заготовок

Расположение заготовок	$k_{расп}$	Расположение заготовок	$k_{расп}$
	1,0		1,0
	1,0		1,25
	2,0		4,0
	1,4		2,2
	1,2		1,4
	1,1		1,3

Эта формула при  $k_{расп}=1$  относится к случаю равномерного всестороннего (симметричного) нагрева (табл. 37). Практически же на поду печи лежит не одна заготовка, а несколько, что уменьшает эффективную лучевоспринимающую поверхность и нагрев становится «несимметричным».

Заготовки инструментальных и высоколегированных сталей часто нагревают в двухкамерных печах, состоящих из камеры предварительного и камеры окончательного нагрева.

Продолжительность нагрева заготовок в камере с температурой 750—800° С до температуры 700—750° С можно определить по формуле

$$\tau_{нагр} = k_{расп} \cdot 2,2 \cdot D^{1,2} \text{ мин.} \quad (337)$$

а продолжительность нагрева до 1200—1250° С подогретых заготовок в камере окончательного нагрева с температурой 1300—1350° С — по формуле

$$\tau_{нагр} = k_{расп} \cdot 0,75 \cdot D^{1,4} \text{ мин.} \quad (338)$$

где  $D$  — диаметр или толщина квадратной заготовки, см.

Рассматривая вопрос о нагреве стальных заготовок, следует остановиться на принципе скоростного нагрева, на основе кото-

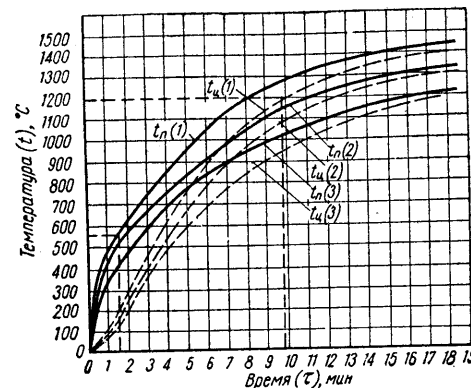


Рис. 89. Расчетные кривые нагрева стальной заготовки ( $d$  100 мм) при температуре рабочего пространства печи:

1 —  $t_{печи} = 1500^\circ \text{C}$ ; 2 —  $t_{печи} = 1400^\circ \text{C}$  и 3 —  $t_{печи} = 1250^\circ \text{C}$

рого в настоящее время проектируют и строят компактные высокопроизводительные и механизированные нагревательные устройства. Принцип скоростного нагрева состоит в значительном повышении температуры печи и конечной разности температур печи и нагреваемого металла, вследствие чего намного сокращается продолжительность нагрева.

На рис. 89 приведены расчетные кривые нагрева стальной заготовки диаметром 100 мм в печах с температурой 1300, 1400 и 1500° С. Из этих кривых видно, что с увеличением температуры печи увеличивается разность температур между поверхностью и центром как в процессе нагрева, так и при выдаче заготовки (при достижении  $t_{центр.} = 1200^\circ \text{C}$ ). Поэтому скоростной нагрев применяют для небольших заготовок правильной формы (диаметром или толщиной до 100—120 мм), обеспечивая всесторонний равномерный нагрев. Кроме того, даже при небольшой задержке с выдачей нагретого металла появляется опасность его перегрева. Поэтому скоростной нагрев применяют главным образом при массовом производстве, причем печи должны быть механизированы или автоматизированы, чтобы время пребывания заготовок в печи было строго регламентировано.

**Пример.** Определить продолжительность нагрева под ковку заготовок углеродистой стали. Известно:  $d=50$  мм;  $l=550$  мм;  $g=8,5$  кг и производительность камерной печи с активной площадью пода  $1200 \times 600$  мм при различном расположении заготовок на поду.

Принимая температуру печи 1300—1350°С, находим по формуле (336) время нагрева при одиночном расположении заготовки:

$$\tau = 10 \cdot D^{1.5} = 10 \cdot 0,05^{1.5} = 0,112 \text{ ч} \approx 7,0 \text{ мин.}$$

При расположении заготовок вплотную  $k_{\text{расп.}} = 2,0$

$$\tau = 2 \cdot 7,0 = 14 \text{ мин.}$$

Количество заготовок, лежащих в печи

$$n = \frac{1200}{50} = 24 \text{ шт.}$$

Производительность печи

$$N = \frac{24 \cdot 60}{14} = 102 \text{ шт/ч}; G = 8,5 \cdot 102 = 870 \text{ кг/ч.}$$

При расположении заготовок на расстоянии  $1/2 D$  одна от другой

$$\tau = 1,35 \cdot 7 = 9,5 \text{ мин}; n = \frac{1200}{50 + 25} = 16 \text{ шт.}$$

$$N = \frac{16 \cdot 60}{9,5} = 100 \text{ шт/ч}; G = 8,5 \cdot 100 = 850 \text{ кг/ч.}$$

При расположении заготовок на расстоянии  $1 \cdot D$  одна от другой

$$\tau = 1,2 \cdot 7 = 8,4 \text{ мин}; n = \frac{1200}{50 + 50} = 12 \text{ шт.}$$

$$N = \frac{12 \cdot 60}{8,4} = 86 \text{ шт/ч}; G = 8,5 \cdot 86 = 730 \text{ кг/ч.}$$

Таким образом, расчет показывает, что с точки зрения производительности заготовки выгоднее укладывать вплотную друг к другу, а с точки зрения качества нагрева (равномерность нагрева по длине и периметру заготовки) их лучше располагать с промежутками  $1/2 D$ . Последнее расположение применяют чаще.

### § 39. НАГРЕВ СЛИТКОВ И ЗАГОТОВОК ПРИ ПЕРЕМЕННОЙ ТЕМПЕРАТУРЕ ПЕЧИ

На практике случаи нагрева слитков и заготовок под ковку-штамповку, прокатку и термообработку при переменной температуре печи бывают значительно чаще, чем при постоянной температуре. Поэтому совершенно необходимо уметь рассчитывать процесс нагрева и в этом случае. Методы расчета, применяемые при переменной температуре печи, можно разделить на две группы: 1) когда известен закон изменения температуры во времени и 2) когда на основании заданного режима изменения

температуры поверхности и центра нагреваемого тела выводят закон изменения во времени температуры печи.

Рассмотрим первый метод. Допустим, что задано или получено экспериментально изменение температуры печи во времени или по длине методической печи. Требуется найти изменение во времени температуры поверхности нагреваемого слитка или заготовки и температуры центра или нижней поверхности (при одностороннем нагреве). Существует несколько способов решения этой задачи. Большая часть их сводится к тому, что все время нагрева делят на ряд периодов и температуру среды (печи) в течение каждого периода принимают постоянной (средней для данного периода), при этом плавную кривую зависимости температуры среды от времени заменяют ступенчатой. Далее по графо-аналитическому методу, предложенному проф. Н. Ю. Тайцем, строят кривые изменения температуры поверхности и центра тела (или нижней поверхности) для каждого из периодов по методу и графикам нагрева при постоянной температуре среды. Эти кривые строят из начала координат, а затем для того, чтобы получить кривые нагрева тела при переменной температуре среды (печи), их графически перестраивают. К кривой, изображающей изменение температуры поверхности тела в первом периоде, пристраивают участок кривой, изображающей нагрев поверхности тела во втором периоде. При этом начало отрезка кривой второго периода соответствует температуре поверхности тела в конце первого периода. К концу отрезка кривой второго периода пристраивают участок кривой, изображающей нагрев поверхности в третьем периоде и т. д. Аналогично строят кривую изменения температуры центра тела. В результате получаются две ступенчатые кривые, изображающие нагрев поверхности и центра слитка или заготовки при ступенчатом изменении температуры среды (печи), которым заменяют действительную плавную кривую изменения температуры среды во времени.

На рис. 90 показана техника перестройки кривых и полученные описанным методом кривые нагрева заготовки углеродистой стали в методической печи.

Другой метод, предложенный И. Д. Семикиным, заключается в том, что для каждого периода нагрева определяют среднее значение теплового потока на поверхности и расчет ведут по формулам нагрева тел при  $q_{\text{пов}} = \text{const}$ .

Второй метод, когда режим изменения температуры печи находят по принятому режиму изменения температуры поверхности и центра, применяют при расчете режима нагрева слитков и крупных заготовок.

С увеличением размеров нагреваемого тела увеличивается разность температур по его сечению, а вместе с ней появляется

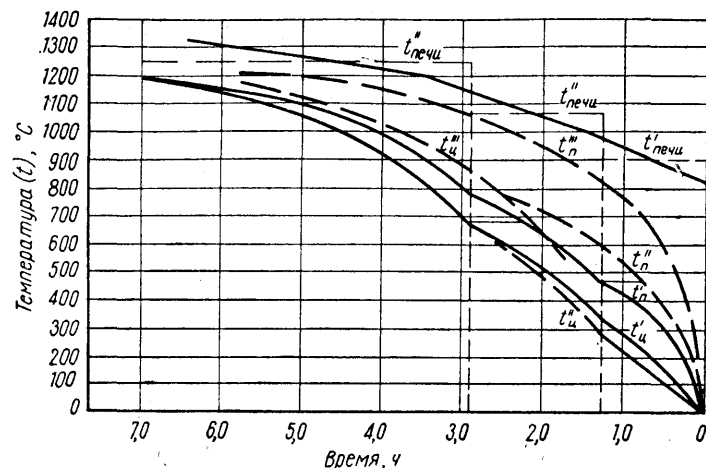


Рис. 90. Расчет нагрева стальной заготовки размером 220×220 мм в методической печи графо-аналитическим методом проф. Н. Ю. Тайца (при  $\alpha_{л+к} = \text{const}$ )

опасность возникновения трещин и разрывов в металле. Эта опасность особенно велика при нагреве крупных слитков, так как металл слитка не так однороден, как металл заготовок. В крупных слитках имеются усадочные пустоты и рыхлости, ликвационные скопления, а также возможны остаточные напряжения в металле, возникшие при охлаждении слитка в изложнице. Чем быстрее нагрев, т. е. быстрее подъем температуры печи, тем большая разница температур получается по сечению слитка.

В зависимости от режима подъема температуры печи один и тот же слиток или заготовку можно нагревать с разной скоростью. В табл. 38 приведены результаты расчета нагрева слитка углеродистой стали диаметром 1 м при различной разности температур по сечению слитка и подъеме температуры поверхности по закону прямой линии.

Возникает вопрос, какой режим является наиболее рациональным в зависимости от марки стали, конструкции печи и других условий нагрева. Решение этого вопроса связано с возникновением при нагреве температурных напряжений, а также с механическими свойствами нагреваемого металла при нормальной и высокой температурах.

При разности температур по сечению в теле развиваются напряжения, связанные с неравномерным расширением наружных и внутренних слоев. При нагреве поверхностные слои расширяются сильнее, чем центральные, и в результате получаются

Таблица 38

## Нагрев стального слитка при разных температурных режимах

Разность температур по сечению $\Delta t_M = t_{\text{пов}} - t_{\text{цен}}, ^\circ\text{C}$	Температура печи при посадке слитка ( $t_{\text{нач}}^{\text{печи}}$ ), $^\circ\text{C}$	Время нагрева $t_{\text{пов}}^{\text{до } 1200^\circ\text{C}}$ , ч	Температура в печи в конце I периода ( $t_{\text{печи}}^{\text{I}}$ ), $^\circ\text{C}$	Время выдержки до достижения $t_{\text{цен}}^{1150^\circ\text{C}}$ , ч	Температура в конце II периода ( $t_{\text{печи}}^{\text{II}}$ ), $^\circ\text{C}$	Общее время нагрева, ч
100	466	28,0	1225	1,0	1217	29,0
200	600	12,5	1245	1,6	1227	14,1
300	695	8,5	1265	1,8	1238	10,3
500	835	4,5	1305	2,0	1260	6,5
700	920	2,9	1338	2,2	1278	5,1
1000	1032	1,5	1388	2,7	1307	4,2

сжатыми, а центральные — растянутыми. При охлаждении, наоборот, центральные слои сжаты, а поверхностные — растянуты. Если эти напряжения не превышают предела упругости, то с исчезновением разности температур они тоже пропадают. Если же эти напряжения будут больше временного сопротивления, то появится опасность возникновения в металле трещин и разрывов.

Температурные напряжения могут привести к трещинам и разрывам только в упругих телах, в пластичных телах они вызывают пластические деформации.

Для углеродистых сталей таким периодом является начальный период нагрева до достижения температуры в центре 500—550°С, выше которой углеродистая сталь теряет свои упругие свойства.

Для легированных сталей этот период может быть другим. Поэтому при расчете нагрева надо знать зависимость механических свойств металла от температуры. На рис. 91 приведена такая зависимость для трех марок стали.

Кроме температурных напряжений, при нагреве слитков и заготовок в них могут возникать структурные напряжения. При нагреве углеродистых сталей происходит превращение  $\alpha$ -железа в  $\gamma$ -железо с некоторым уменьшением объема, что вызывает в металле напряжения растяжения. Но так как при нагреве максимальными являются напряжения сжатия, то структурные напряжения несколько уменьшают их. Кроме того, структурные напряжения возникают при температурах, когда углеродистые стали уже потеряли упругие свойства. Что же касается легированных сталей, то могут быть случаи, когда структурные превращения необходимо учитывать при установлении рационального режима нагрева.

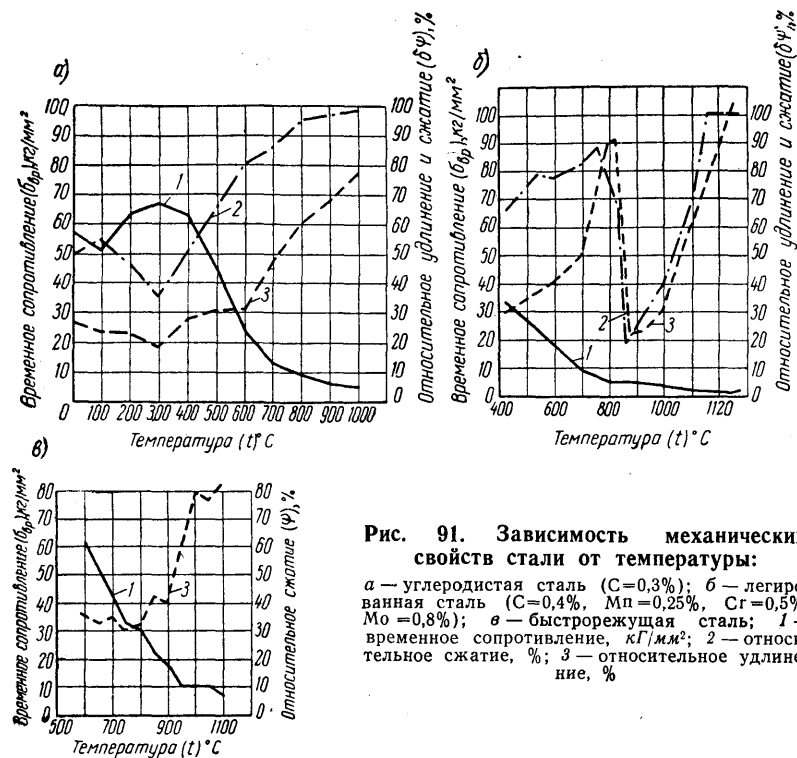


Рис. 91. Зависимость механических свойств стали от температуры:

а — углеродистая сталь ( $C=0,3\%$ ); б — легированная сталь ( $C=0,4\%$ ,  $Mn=0,25\%$ ,  $Si=0,5\%$ ,  $Mo=0,8\%$ ); в — быстрорежущая сталь; 1 — временное сопротивление,  $кг/мм^2$ ; 2 — относительное сжатие, %; 3 — относительное удлинение, %

Кроме структурных и температурных напряжений, в нагреваемых слитках и заготовках могут быть остаточные напряжения, связанные с быстрым их охлаждением после предыдущих операций. Для снижения этих напряжений крупные холодные слитки помещают в печь с пониженной температурой и делают некоторую выдержку после посадки.

Наиболее эффективным способом борьбы с температурными, структурными и остаточными напряжениями является посадка для нагрева слитков, не остывших полностью после отливки, с температурой  $t_{пов} = 700-750^\circ C$ .

Метод расчета нагрева слитков и заготовок с учетом возникающих напряжений предложил проф. Н. Ю. Тайц. При нагреве средне- и высокоуглеродистых сталей время нагрева разделяют на три периода: первый период — период опасных температурных напряжений рассчитывают, исходя из допустимой разности температур между поверхностью и центром; второй период — период форсированного нагрева, когда металл пластичен и тем-

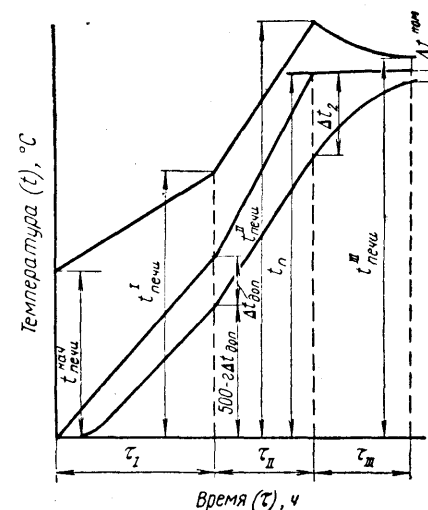


Рис. 92. Схема трехступенчатого режима нагрева слитка в камерной печи

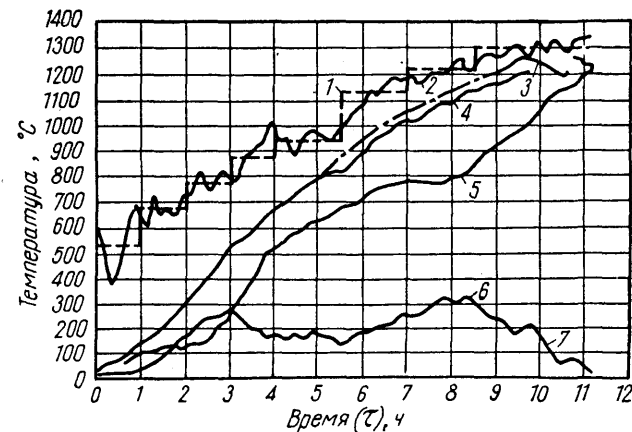


Рис. 93. График исследования нагрева слитка весом 12 т по трехступенчатому режиму:

1 — температура печи по расчету; 2 — температура печи — термопара; 3 — температура поверхности слитка по оптическому пирометру; 4 — температура поверхности слитка — термопара; 5 — температура центра слитка — термопара; 6 и 7 — разность температур между поверхностью и центром по термопаре и оптическому пирометру



пературные напряжения не опасны, и третий период — период выдержки. Схема такого режима приведена на рис. 92 и 93.

Принимая подъем температуры поверхности слитка или заготовки по закону прямой линии, найдем уравнение, связывающее максимальные температурные напряжения с разностью температур по сечению:

$$\text{для пластины } \sigma_{\max} = 0,95\beta E\Delta t_m \text{ Мн/м}^2, \quad (339)$$

$$\text{для цилиндра } \sigma_{\max} = 0,72\beta E\Delta t_m \text{ Мн/м}^2, \quad (339a)$$

где  $\beta$  — коэффициент линейного расширения,  $1^\circ\text{С}$ ;  
 $E$  — модуль упругости,  $\text{Мн/м}^2$ .

Если вместо  $\sigma_{\max}$  в эти формулы подставить  $\sigma_{\text{доп}}$ , то допустимая разность температур для первого периода составит:

$$\text{для пластины } \Delta t_{\text{доп}} = \frac{1,05\sigma_{\text{доп}}}{\beta E} [^\circ\text{С}]; \quad (340)$$

$$\text{для цилиндра } \Delta t_{\text{доп}} = \frac{1,4\sigma_{\text{доп}}}{\beta E} [^\circ\text{С}]. \quad (340a)$$

Для углеродистых сталей температурные напряжения могут возникать до  $500\text{—}550^\circ\text{С}$ . Поэтому продолжительность первого периода определяют по следующей формуле:

$$\tau_1 = \frac{k_\phi s^2}{a_1 \Delta t_{\text{доп}}} [500 + (1 - r) \Delta t_{\text{доп}} - t_{\text{нач}}] [\text{ч}], \quad (341)$$

где  $k_\phi$  — коэффициент формы (см. стр. 147);

$r$  — поправочный коэффициент:  $r=0,5$  для цилиндра и  $r=0,33$  для пластины;

$s$  — расчетная толщина слитка или заготовки;

$a$  — коэффициент температуропроводности,  $\text{м}^2/\text{сек}$ .

Во втором периоде скорость нагрева можно увеличить, так как температурных напряжений не следует опасаться. Эта скорость и разность температур по сечению будут зависеть от тепловой мощности печи, т. е. от того, как быстро печь может поднимать температуру.

Практически

$$\Delta t_{II} = (1,25 \div 1,5) \Delta t_{\text{доп}} [\text{град}]. \quad (342)$$

Продолжительность второго периода

$$\tau_{II} = \frac{k_\phi s^2}{a_{II} \Delta t_{II}} [t_{\text{пов}}^{II} - r\Delta t_{II} - 500 - (1 - r) \Delta t_{\text{доп}}] [\text{ч}]. \quad (343)$$

Продолжительность третьего периода — периода выдержки зависит от того, какую принимают конечную разность температур —  $\Delta t_{\text{мет}}^{\text{кон}}$  и определяют по формулам:

$$\text{для пластины } \tau_{III} = \frac{s^2}{2,47a_{III}} \cdot \ln 1,03 \frac{\Delta t_{II}}{\Delta t_{\text{мет}}^{\text{кон}}} [\text{ч}], \quad (344)$$

$$\text{для цилиндра } \tau_{III} = \frac{R^2}{5,78a_{III}} \cdot \ln 1,11 \frac{\Delta t_{II}}{\Delta t_{\text{мет}}^{\text{кон}}} [\text{ч}]. \quad (344a)$$

$\Delta t_{\text{мет}}^{\text{кон}}$  зависит от того, для какой цели осуществляют нагрев: при нагреве под ковку, штамповку, прокатку  $\Delta t_{\text{мет}}^{\text{кон}} = 20 \div 50^\circ\text{С}$  и даже может быть несколько выше, при нагреве под термообработку  $\Delta t_{\text{мет}}^{\text{кон}} = 5 \div 10^\circ\text{С}$  и ниже.

Температуру печи в начале, середине и в конце каждого периода определяют из следующего уравнения (пренебрегая конвекцией):

$$\left( \frac{t_{\text{печи}} + 273}{100} \right)^4 = \frac{q_{\text{пов}}}{c_{\text{г. кл. м}}} + \left( \frac{t_{\text{пов}} + 273}{100} \right)^4. \quad (345)$$

Значение  $q_{\text{пов}}$  в первом и втором периодах находят из уравнения (199) и графиков на рис. 52, а в третьем периоде — из уравнений (197), (197a) и графика на рис. 50.

**Пример.** Рассчитать рациональный режим нагрева для слитка углеродистой конструкционной стали (сталь 40÷45) диаметром 1000 мм, если известно: развес 12 т; нагрев всесторонний.

Первый период. Значение физических и механических параметров для первого периода принимаем при средней температуре  $500^\circ\text{С}$ :  $\lambda_I = 34,8 \text{ Вт/м} \cdot \text{град}$ ;  $a_I = 0,83 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{сек}$ ;  $\beta = 14,5 \cdot 10^{-6}$ ;  $E = 176\,000 \text{ Мн/м}^2$  (приложение 6);  $\sigma_{\text{вр}} = 510 \text{ Мн/м}^2$ .

Допустимое напряжение, принимая запас прочности 1,5:

$$\sigma_{\text{доп}} = \frac{510}{1,5} = 340 \text{ Мн/м}^2.$$

По формуле (340 а) определяем

$$\Delta t_{\text{доп}} = \frac{1,4\sigma_{\text{доп}}}{\beta E} = \frac{1,4 \cdot 340}{14,5 \cdot 10^{-6} \cdot 176\,000} \approx 200^\circ\text{С}.$$

Продолжительность первого периода

$$\tau_I = \frac{0,25 \cdot 0,5^2}{0,83 \cdot 10^{-5}} [500 + (1 - 0,5) 200 - 20] = 21,96 \cdot 10^3 \text{ сек} \quad (6,14).$$

Величина теплового потока в первом периоде нагрева

$$q_{\text{пов}} = \frac{2\lambda \Delta t_{\text{доп}}}{R} = \frac{2 \cdot 30 \cdot 200}{0,5} = 27\,900 \text{ Вт/м}^2.$$

Принимая приведенный коэффициент лучеиспускания  $\epsilon_{г. кл. м} = 3,49 \text{ вт/м}^2 \cdot \text{град}$ , по формуле (345) находим температуру печи в начале и конце первого периода

$$\left( \frac{t_{\text{печи}} + 273}{100} \right)^4 = \frac{27\,900}{3,49} + \left( \frac{20 + 273}{100} \right)^4 = 8073; \quad t_{\text{печи}} \approx 675^\circ \text{C};$$

$$\left( \frac{t'_{\text{печи}} + 273}{100} \right)^4 = \frac{24\,000}{3} + \left( \frac{700 + 273}{100} \right)^4 = 16\,963; \quad t'_{\text{печи}} \approx 870^\circ \text{C}.$$

Второй период. Разность температур в конце второго периода принимаем равной  $\Delta t_{II} = 1,5 \Delta t_{\text{доп}} = 300^\circ \text{C}$ .

Физические параметры стали:  $\lambda_{II} = 29 \text{ вт/м} \cdot \text{град}$ ;  $a_{II} = 0,58 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{сек}$ .

Продолжительность второго периода, если принять конечную температуру поверхности слитка  $t_{\text{пов}}^{\text{кон}} = 1200^\circ \text{C}$

$$\tau_{II} = \frac{0,25 \cdot 0,5^2}{0,58 \cdot 10^{-5} \cdot 300} \cdot [1200 - 0,5 \cdot 300 - 500 - (1 - 0,5) \cdot 200] = 16,2 \cdot 10^3 \text{ сек} = 4,5 \text{ ч}.$$

Температура печи в конце второго периода при

$$q_{\text{пов}} = \frac{2 \cdot 25 \cdot 300}{0,5} = 34\,960 \text{ вт/м}^2;$$

$$\left( \frac{t_{\text{печи}}^{II} + 273}{100} \right)^4 = \frac{34\,960}{3,496} + \left( \frac{1200 + 273}{100} \right)^4 = 57080;$$

$$t_{\text{печи}}^{II} \approx 1270^\circ \text{C}.$$

Третий период. Разность температур в конце третьего периода принимаем  $\Delta t_{\text{мет}}^{\text{кон}} = 40^\circ \text{C}$ . Физические параметры металла те же, что во втором периоде.

Продолжительность выдержки

$$\tau_{III} = \frac{1}{5,78} \cdot \frac{0,5^2}{0,58 \cdot 10^{-5}} \cdot \ln \left( 1,11 \frac{300}{40} \right) = 14,4 \cdot 10^3 \text{ сек} (4,0 \text{ ч}).$$

Величину теплового потока в конце выдержки определяем по формуле (197а) и графику на рис. 50:

$$q_{\text{пов}} = \frac{2\lambda}{R} \Delta t_{II} F \left( \frac{0,021 \cdot 4,0}{0,5^2} \right) = 30\,000 F(0,38) = 30\,000 \cdot 0,15 = 5240 \text{ вт/м}^2.$$

При  $\frac{a\tau}{R^2} = 0,38$  по графику на рис. 50  $F(0,38) = 0,15$ .

Температура печи в конце выдержки:

$$\frac{t_{\text{печи}}^{\text{кон}} + 273}{100} = \frac{5240}{3,49} + \left( \frac{1200 + 273}{100} \right)^4 = 48\,580; \quad t_{\text{печи}}^{\text{кон}} = 1210^\circ \text{C}.$$

Общая продолжительность нагрева

$$\tau_{\text{общ}} = 6,1 + 4,5 + 4,0 = 14,6 \text{ ч}.$$

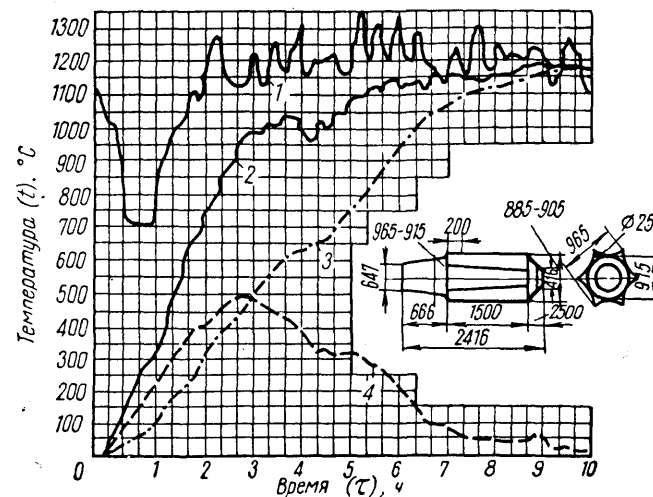


Рис. 94. График исследования нагрева слитка весом 1000 кг:

1 — температура печи по радиационному пирометру; 2 — температура поверхности слитка (термопара); 3 — температура центра слитка (термопара); 4 — разность температур между поверхностью и центром

На рис. 93 приведены результаты исследования нагрева слитка  $D \approx 1,0$  и  $G = 12 \text{ т}$  по трехступенчатому режиму. Из графика рис. 93 видно, что при тщательном контроле и максимальной разности температур между поверхностью и центром в первом периоде  $\Delta t_{\text{доп}} \approx 250^\circ \text{C}$ . Общая продолжительность нагрева слитка составляет  $\sim 11 \text{ ч}$  ( $\tau_I = 5,5 \text{ ч}$ ;  $\tau_{II} = 3,0 \text{ ч}$ ;  $\tau_{III} = 2,5 \text{ ч}$ ).

На рис. 94 приведены результаты исследования нагрева слитка углеродистой стали развесом 10 т при посадке его в печь с температурой  $\sim 1100^\circ \text{C}$ . Из графика рис. 94 видно, что максимальная разность температур между поверхностью и центром достигала  $500^\circ \text{C}$ , но эта разность была при средней температуре металла  $\sim 700^\circ \text{C}$ , когда металл уже пластичен и температурные напряжения не могут вызвать трещин и разрывов.

В табл. 39 и 40 приведены нормы времени нагрева слитков углеродистой стали, применяемые на одном из машиностроительных заводов и проверенные многолетней практикой. При этом слитки развесом до 10 т помещают в печь с температурой  $1000\text{—}1200^\circ \text{C}$ , а слитки большего развеса — в печь с пониженной температурой и нагревают по трехступенчатому графику.

Легированные и высоколегированные стали следует нагревать с учетом изменения механических свойств с температурой. Разработанный режим и нормы продолжительности должны быть тщательно проверены практически, так как выход в брак

Таблица 39

Продолжительность нагрева слитков и заготовок углеродистой стали от 10—20 до 1200° при посадке в печь с температурой 1000—1200°С

Средний диаметр слитка или заготовки, мм	Ориентировочный развес слитка, т	Минимальное время нагрева, ч-мин	Примечание
300	—	2—40	Слитки расположены на поду на расстоянии не менее диаметра друг от друга
400	—	3—30	
500	—	4—30	
600	—	5—40	
700	—	6—00	
750	5—7	6—30	
800	8	8—00	
900	10	10—00	

Таблица 40

Продолжительность нагрева слитков углеродистой стали от 10—20 до 1200°С при посадке их в охлажденную печь

Диаметр слитка, мм		Развес слитка, т	Подъем температуры печи от 800 до 950°С, ч	Выдержка при температуре печи 900—950°С, ч	Подъем температуры печи от 900 до 1250°С, ч	Нагрев и выдержка при температуре печи 1250—1300°С, ч	Общее время нагрева слитка, ч
максимальный	минимальный						
1000	900	10—12	5,0	0	3,0	3,5—5,0	11,5—13,0
1100	1000	14—17	7,0	1	3,0	4,0—7,0	15,0—18,0
1200	1100	18—20	8,0	1,5	3,0	5,5—8,5	18,0—21,0
1300	1200	22—25	9,5	2,0	3,0	7,0—11,0	22,0—26,0
1400	1300	28—32	12,5	2,5	4,0	8,5—13,5	27,0—32,0

Примечание. На поду печи располагают один слиток на подкладках. Если температура печи не успеет достигнуть 1250°С за предусмотренное нормой время, то общее время нагрева следует продлить так, чтобы нагрев слитка при температуре печи 1250—1300°С продолжался не менее, чем указано в графе 7-й.

слитка легированной и высоколегированной стали приносит очень большие убытки.

Для примера в табл. 41 приведены нормы продолжительности нагрева небольших слитков высоколегированных сталей.

Нормы продолжительности подогрева заготовок от 650—700 до 1200°С и нагрева неохлажденных после отливки слитков приведены в табл. 42, а кривые изменения температур печи и

Таблица 41

Продолжительность и режим нагрева под ковку инструментальных и высоколегированных сталей Р-9, Р-18, Эи-262

Средний диаметр слитка или заготовки, мм	Вес слитка, т	Температура печи при посадке, °С	Продолжительность, ч					Общая
			выдержка при температуре посадки	нагрев до 850—950°С	выдержка при 850—900°С	нагрев до конечной температуры	выдержка при ковочной температуре	
50	—	450	0,5	1,0	0,5	0,2	—	2,2
70	—	450	0,5	1,2	0,8	0,3	0,1	3,0
100	—	450	0,8	1,6	1,4	0,5	0,2	4,5
150	—	450	1,2	2,0	2,0	0,8	0,5	6,5
200	0,2	450	1,5	2,8	2,6	1,0	0,6	8,5
300	0,6	400	2,5	4,0	4,0	1,2	0,8	12,5
400	1,0	350	3,0	5,5	5,0	5,0	1,6	16,5

Примечание. Эти нормы относятся к нагреву слитков и заготовок, лежащих на поду вплотную друг к другу или на небольшом расстоянии. При одиночном расположении слитков и всестороннем нагреве эти нормы могут быть снижены.

Таблица 42

Нагрев заготовок и слитков углеродистой стали под ковку от 650—700 до 1200°С

Средний диаметр заготовки или слитка, мм	Время нагрева, ч	Примечания
150	0,75—0,8	1. Посадка в печь с температурой 1100—1200°С. Расположение на поду при расстоянии между слитками или заготовками не менее диаметра или толщины заготовки. 2. Если заготовка неравномерна по толщине, то вместо среднего диаметра принимают максимальную толщину заготовки в мм.
200	1,0—1,5	
300	1,5—2,0	
400	2,0—2,5	
500	2,5—3,0	
600	3,0—3,5	
700	3,5—4,0	
800	4,5—5,0	
900	5,5—6,0	
1000	6,5—7,0	

в разных местах по сечению слитка развесом 45 т, в горячем состоянии указаны на рис. 95.

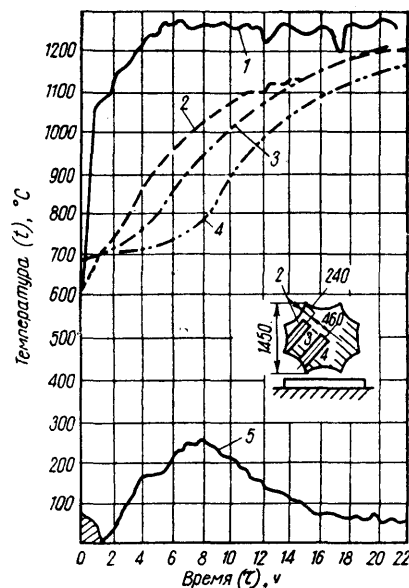


Рис. 95. График исследования нагрева горячего слитка весом 45 т:

1 — температура печи; 2 — температура слитка вблизи поверхности; 3 — температура на расстоянии  $\frac{1}{3}$  радиуса от поверхности; 4 — температура в центре слитка; 5 — разность температур слитка вблизи поверхности и в центре слитка

#### § 40. РЕЖИМ НАГРЕВА СЛИТКОВ И ЗАГОТОВОК В МЕТОДИЧЕСКИХ И ПОЛУМЕТОДИЧЕСКИХ ПЕЧАХ

Методические и полуметодические печи широко применяют при нагреве под прокатку, ковку и штамповку квадратных и прямоугольных заготовок.

По температурному режиму методические печи делят на двухзонные и трехзонные.

В двухзонных печах рис. 96, а имеются две температурные зоны: подогревательная камера (методическая часть), в которой температура печи поднимается по ходу металла от температуры уходящих газов до температуры следующей так называемой сварочной камеры (зона высоких температур), в которой температура остается почти постоянной: на 100—150°С выше температуры нагрева металла.

Двухзонные печи используют обычно для нагрева мелких и средних заготовок и небольших слитков толщиной до 100—150 мм при одностороннем нагреве и до 200—250 мм — при двустороннем.

В целях повышения производительности форсунки или горелки устанавливают не только в торцевой стене сварочной ка-

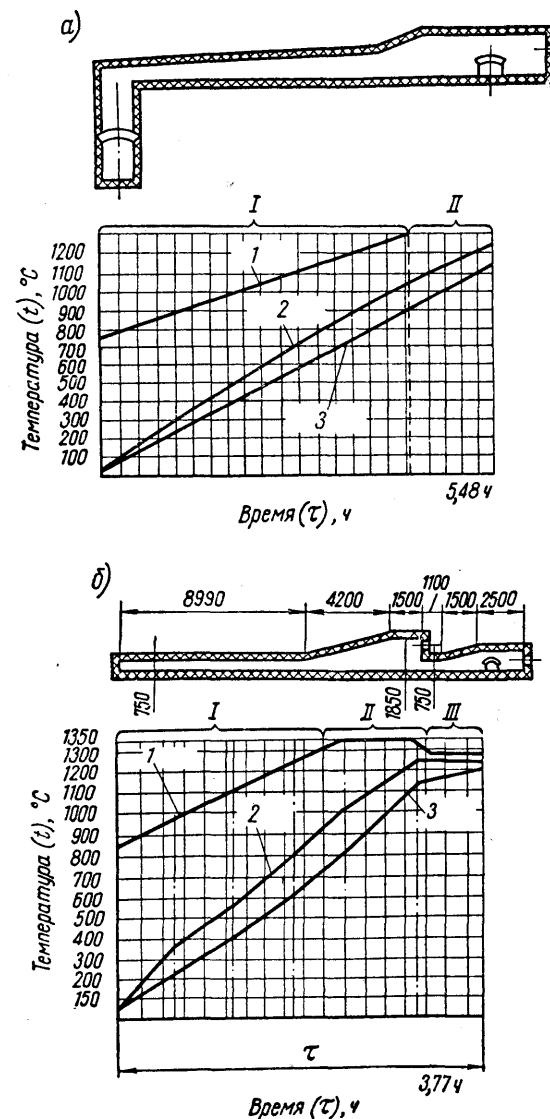


Рис. 96, а и б. Кривые нагрева плоской стальной заготовки толщиной 180 мм в методических печах:

а — двухзонная печь: I — методическая часть; II — зона высоких температур; б — трехзонная печь без нижнего обогрева: I — методическая часть; II — зона высоких температур; III — зона выдержки

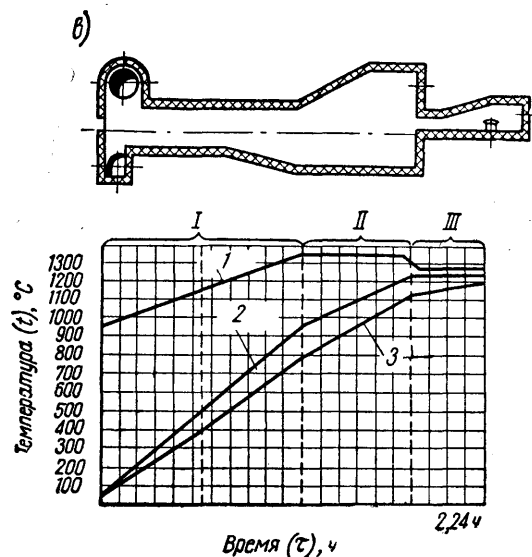


Рис. 96, в. Кривые нагрева плоской стальной заготовки толщиной 180 мм в методических печах:

в — трехзонная печь с нижним обогревом: I — методическая часть; II — зона высоких температур; III — зона выдержки; 1 — температура печи; 2 — температура поверхности; 3 — температура центра

меры, но и в боковых стенках сварочной и подогревательной камеры. Под зону высоких температур отводят до 50% (и даже больше) от всей длины печи.

При нагреве кузнечных заготовок применяют печи, в которых длина подогревательной камеры составляет 25—40% от всей длины печи. Такие печи называют полуметодическими (или камерно-методическими).

В настоящее время крупные (толщиной более 200—250 мм) слитки и заготовки нагревают в трехзонных печах: первая зона — подогревательная камера (методическая часть), вторая зона — зона высоких температур (сварочная камера), в ней температура печи поднимается на 200—250°С выше температуры нагрева металла, третья зона — зона выдержки (томильная камера), где происходит выравнивание температуры по сечению заготовки при температуре печи, немного превышающей температуру нагрева металла.

В целях получения высокой производительности, уменьшения неравномерности нагрева и снижения угара методические печи, как двухзонные, так и трехзонные, следует оборудовать мощным нижним обогревом слитков или заготовок.

Изменения температуры печи, а также температуры металла при нагреве слитка углеродистой стали толщиной 180 мм в двухзонной и трехзонных печах с одним верхним и с нижним обогревом показаны на рис. 96. Из этих графиков видно, что продолжительность нагрева в двухзонной печи составляет 5,48 ч при ко-

нечной разности температур по сечению слитка ~ 70°С, в трехзонной печи — 3,77 ч при конечной разности температур ~ 30°С и в трехзонной печи с нижним обогревом ~ 2,24 ч при конечной разности температур по сечению также ~ 30°С. При этом температура отходящих газов в первом случае составляет ~ 750°С, во втором ~ 850°С и в третьем ~ 950°С.

**Пример.** В методической трехзонной печи нагреваются квадратные слитки высоколегированной стали марки 1Х18Н9Т, размером 280×280×1200 мм. Развес равен ~ 750 кг.

Начальная температура металла 20°С, конечная температура поверхности 1180°С, конечная разность температур по сечению 40°С. Производительность печи — 15 слитков в час, что составляет ~ 11000 кг/ч.

Нагрев слитков в первых двух зонах двусторонний. Выдержка их в третьей зоне происходит на сплошном поду.

Первый период. Нагрев до температуры центра 500°С.

Физические параметры и механические свойства стали в первом периоде принимаем следующие:

$$\lambda_{37} = 16,4 \text{ Вт/м} \cdot \text{град}; \quad \lambda_{500} = 21,2 \text{ Вт/м} \cdot \text{град};$$

$$\lambda_1 = \frac{16,4 + 21,2}{2} = 18,8 \text{ Вт/м} \cdot \text{град}; \quad C_0^{500} = 0,545 \text{ кДж/кг} \cdot \text{град};$$

$$\rho = 7900 \text{ кг/м}^3; \quad a_1 = 0,45 \cdot 10^{-5} \text{ м/сек};$$

$$\beta = 18,5 \cdot 10^{-6};$$

$$E = 196\,000 \text{ Мн/м}^2; \quad \sigma_{вр} = 460 \text{ Мн/м}^2.$$

Допустимую разность температур определяем, принимая напряжения

$$\sigma_{доп} = \frac{47}{1,5} = 30,6 \text{ Мн/м}^2,$$

$$\Delta t_{доп} = \frac{1,05 \cdot 30,6}{18,5 \cdot 10^{-6} \cdot 196\,000} = 90^\circ \text{С}.$$

Температура поверхности в конце первого периода

$$t_{пов}^I = 500 + 90 = 590^\circ \text{С}.$$

Продолжительность первого периода

$$\tau_1 = \frac{0,5 \cdot 0,14^2}{0,45 \cdot 10^{-5}} \left( 500 + \frac{2}{3} \cdot 90 - 20 \right) = 13,14 \cdot 10^3 \text{ сек}.$$

Тепловой поток в конце первого периода

$$q_1 = \frac{2 \Delta t_{доп} \lambda}{s} = \frac{2 \cdot 90 \cdot 18,8}{0,14} = 28\,000 \text{ Вт/м}^2.$$

Температура печи в конце первого периода

$$t_{печи}^I = 1000 \sqrt[4]{\frac{28\,000}{3,49} + \left( \frac{590 + 273}{100} \right)^4} - 273 = 810^\circ \text{С}.$$

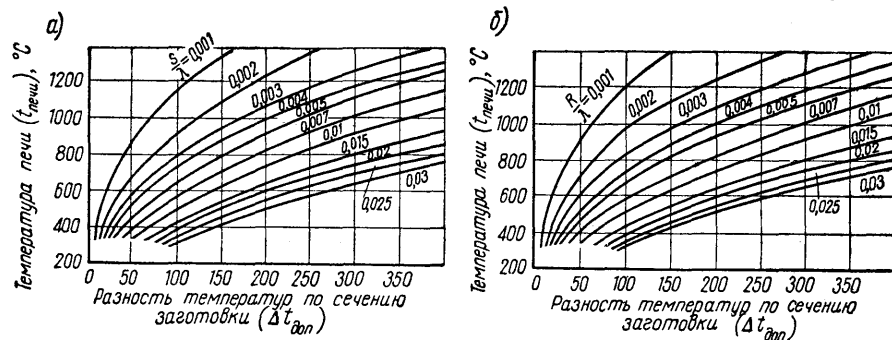


Рис. 97. Допускаемая температура печи при посадке заготовки в зависимости от максимально допустимой разности температур по сечению:

а — для пластины толщиной  $s$ , обогреваемой равномерно с обеих сторон; б — для цилиндра радиусом  $R$ , обогреваемого равномерно со всех сторон

Допустимую температуру в месте посадки слитка находим по графику, предложенному проф. Н. Ю. Тайцем (рис. 97) при

$$\Delta t_{\text{доп}} = 90^{\circ}\text{C} \quad \text{и} \quad \frac{s}{\lambda} = \frac{0,14}{16,2} = 0,0087;$$

$$t_{\text{печи}} = 500^{\circ}\text{C}.$$

Второй период. Нагрев до температуры центра слитка  $900^{\circ}\text{C}$ . При этой температуре снижаются пластические свойства стали.

Физические параметры и механические свойства стали для второго периода следующие:

$$\lambda_{900} = 27,0 \text{ вт/м}\cdot\text{град}; \quad \lambda_{\text{II}} = \frac{21,2 + 27,0}{2} = 24,1 \text{ вт/м}\cdot\text{град};$$

$$c_{20}^{300} = 0,586 \text{ кдж/кг}\cdot\text{град};$$

$$\rho = 7700 \text{ кг/м}^3;$$

$$a_{\text{II}} = 0,53 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{сек}; \quad \beta = 19 \cdot 10^{-6}; \quad E = 167\,000 \text{ Мн/м}^2; \quad \sigma_{\text{вр}} = 147 \text{ Мн/м}^2.$$

Допустимая разность температур по сечению в конце второго периода при  $\sigma_{\text{доп}} = \frac{1}{2,0} \sigma_{\text{вр}} = 73 \text{ Мн/м}^2$  будет

$$\Delta t_{\text{II}} = \frac{1,05 \cdot 73}{19 \cdot 10^{-6} \cdot 167\,000} = 25^{\circ}\text{C}.$$

Средняя разность температур во втором периоде

$$\Delta t_{\text{ср}} = \frac{90 + 25}{2} = 57,5^{\circ}\text{C}.$$

Температура поверхности слитка в конце второго периода

$$t_{\text{пов}}^{\text{II}} = 900 + 25 = 925^{\circ}\text{C}.$$

Продолжительность второго периода

$$\tau_{\text{II}} = \frac{0,5 \cdot 14^2}{0,53 \cdot 10^{-5} \cdot 57,5} \left( 925 - \frac{1}{3} \cdot 0,25 - 500 - \frac{2}{3} \cdot 90 \right) = 11,52 \cdot 10^3 \text{ сек.}$$

Тепловой поток на поверхности в конце второго периода

$$q_{\text{II}} = \frac{2 \cdot 23 \cdot 25}{0,14} = 9500 \text{ вт/м}^2.$$

Температура печи в конце второго периода

$$t_{\text{печи}}^{\text{II}} = 100 \sqrt[4]{\frac{8500}{3,49} + \left( \frac{925 + 273}{100} \right)^4} - 273 = 960,0^{\circ}\text{C}.$$

Третий период. Нагрев до температуры поверхности слитка  $1180^{\circ}\text{C}$ .

Физические параметры для третьего периода следующие:

$$\lambda_{1100} = 28,2 \text{ вт/м}\cdot\text{град}; \quad \lambda_{\text{III}} = \frac{27,0 + 28,2}{2} = 27,6 \text{ вт/м}\cdot\text{град};$$

$$c_{20}^{1100} = 0,61 \text{ кдж/кг}\cdot\text{град}; \quad \rho = 7600 \text{ кг/м}^3; \quad a_{\text{III}} = 0,58 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{сек}.$$

Металл при температурах выше  $900^{\circ}\text{C}$  быстро становится пластичным, поэтому разность температур по сечению в конце третьего периода принимаем  $\Delta t_{\text{III}} = 120,0^{\circ}\text{C}$ .

Средняя разность температур в третьем периоде

$$\Delta t_{\text{III}}^{\text{ср}} = \frac{120 + 25}{2} = 72,5^{\circ}\text{C}.$$

Продолжительность третьего периода

$$\tau_{\text{III}} = \frac{0,5 \cdot 0,14^2}{0,58 \cdot 10^{-5}} \cdot [1180 - 1/3 \cdot 120 - 900 - 2/3 \cdot 25] = 5,4 \cdot 10^3 \text{ сек.}$$

Тепловой поток на поверхности в конце третьего периода

$$q_{\text{III}} = \frac{2 \cdot 120 \cdot 27,6}{0,14} = 48600 \text{ вт/м}^2.$$

Температура печи в конце третьего периода

$$t_{\text{печи}}^{\text{III}} = 100 \sqrt[4]{\frac{48\,600}{3,49} + \left( \frac{1180 + 273}{100} \right)^4} - 272 \approx 1280^{\circ}\text{C}.$$

Четвертый период. Выдержка слитка на сплошном поду. Расчет выполняем по графику на рис. 51.

Температура в центре в начале третьего периода

$$t_{\text{цен}}^{\text{III}} = 1180 - 120 = 1060^{\circ}\text{C}.$$

Температура нижней поверхности после выдержки

$$t_{\text{пов}}^{\text{IV}} = 1180 - 40 = 1140^{\circ}\text{C}.$$

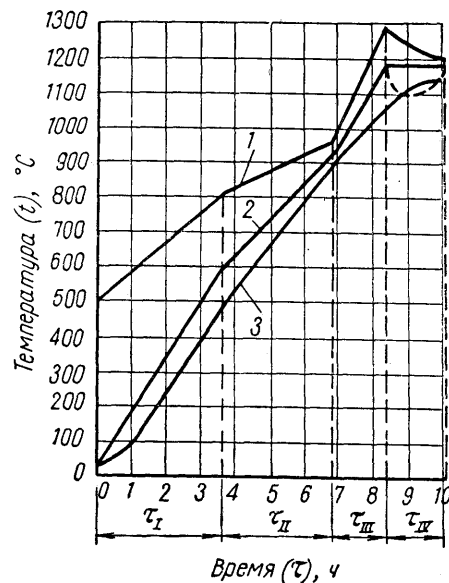


Рис. 98. Режим нагрева слитка стали 1X18H9T сечением  $280 \times 280$  мм в методической трехзонной печи:

1 — температура печи; 2 — температура поверхности; 3 — температура центра

Относительный подъем температуры нижней поверхности за период выдержки составляет

$$\frac{1140 - 1060}{1180 - 1060} = 0,67.$$

По графику на рис. 51 находим значение критерия Фурье  $Fo=1,8$ .

Продолжительность четвертого периода

$$\tau_{IV} = \frac{1,8 \cdot 0,14^2}{0,58 \cdot 10^{-5}} = 1,7 \text{ ч.}$$

Общая продолжительность нагрева

$$\tau_{\text{общ}} = \tau_I + \tau_{II} + \tau_{III} + \tau_{IV} = 13,14 \cdot 10^3 + 11,52 \cdot 10^3 + 5,4 \cdot 10^3 + 6,12 \cdot 10^3 = 36,18 \cdot 10^3 \text{ сек (10,05 ч)}.$$

Количество слитков, которые должны находиться в печи

$$n = 15 \cdot 10,05 = 151 \text{ шт.}$$

Если печь двурядная, будем иметь длину активного пода печи

$$L_{\text{акт}} = \frac{151}{2} \cdot 0,28 \approx 21,2 \text{ м.}$$

Ширина пода при коэффициенте загрузки  $k_{\text{пода}} = 0,8$

$$b = \frac{2 \cdot 1,20}{0,8} \approx 3,0 \text{ м.}$$

Площадь пода  $F_{\text{пода}} = 21,2 \cdot 3,0 = 63,6 \text{ м}^2$ .

$$\text{Напряженность пода } P = \frac{15 \cdot 750}{63,6} = 180 \text{ кг/м}^2 \cdot \text{ч.}$$

Полученный режим нагрева графически выражен на рис. 98. Расчет сделан со значительным запасом.

## § 41. ОХЛАЖДЕНИЕ МЕТАЛЛА

Охлаждение металла начинается обычно в процессе прокатки,ковки или штамповки, причем до температуры конца прокатки иликовки охлаждение происходит медленнее, а после окончания обработки давлением — более интенсивно (если не создаются препятствия для этого) до температуры окружающего пространства. Во время охлаждения в результате возникновения перепада температур между центром и поверхностью в металле, так же как и при нагреве, возникают температурные напряжения, которые при известных условиях могут вызвать поверхностные и внутренние разрывы и трещины.

Кроме микро- и макротрещин в некоторых марках легированных сталей в результате быстрого охлаждения, сопровождающегося выделением растворенных газов, могут образоваться флокены.

Напряжения при охлаждении возникают также вследствие структурных превращений.

Прокат, поковки и штамповки можно охлаждать на воздухе: на стеллажах и в штабелях, в ящиках с песком или другим малотеплопроводным материалом, в необогреваемых колодцах, обогреваемых колодцах и в специальных печах.

В табл. 43 приведены рекомендуемые способы охлаждения проката, поковок и заготовок.

Продолжительность охлаждения нагретых слитков и заготовок на воздухе рассчитывают по тем же методам, что и нагрев:

для «тонких» тел — по формуле

$$\tau_{\text{охл}} = \frac{V}{F_{\text{эфф}}} \cdot \frac{c\rho}{\alpha_{\text{л+к}}} \cdot \ln \frac{t_{\text{нач}} - t_{\text{воз}}}{t_{\text{кон}} - t_{\text{воз}}} [\text{сек}]; \quad (322a)$$

Таблица 43

## Рекомендуемые способы охлаждения проката, поковок и заготовок

Наименование и марки сталей	Способы охлаждения проката и поковок с размерами сечения, мм				
	до 50	51—100	101—150	151—200	201—300 и выше
Малоуглеродистые и среднеуглеродистые	На воздухе				
Среднеуглеродистые, хромистые и никелевые: У-7; У-8; 15Х; 20Х; 30Х; 25Н; 30Н	На воздухе			В штабелях	
Высокоуглеродистые и легированные: У9; У10; 40Х; 45Х; 50Х; 35Х10А; 15Х5; 40ХГ; 35ХГ2; 20ХГС; 25ХГС; 30ХС; 35ХГС	На воздухе	В штабелях		В колодцах	
Легированные: 40ХГМ; 33ХН3МА; 18Х2Н4МА; ОХН1М; ОХН4М; 18ХНВА; 12Х2Н4; 20Х2Н4А; 9Х; 35ХМ10Ф	В штабелях	В колодце	В колодце с песком	С печью	
Легированные : 35ХМА; ОХМ; 12ХН2; 12ХН3; 40ХН	В штабелях	В колодце			В колодце с песком
Инструментальные легированные: 5ХНМ; 6ХНМ; 5ХГМ; 30ХВ8; 4ХВС; 5ХВС; 6ХВС	В колодце	В колодце с песком	С печью		
Быстрорежущие: РК5; РФ1; РФ2; Р; РО и др.	Изотермический отжиг или охлаждение в колодце с песком			По особым инструкциям	

для «массивных» тел — по формулам

$$t_{\text{пов}} = t_{\text{воз}} + (t_{\text{нач}} - t_{\text{воз}}) \cdot f(Bi; Fo), \quad (206a)$$

$$t_{\text{цен}} = t_{\text{воз}} + (t_{\text{нач}} + t_{\text{воз}}) \cdot f'(Bi; Fo). \quad (206б)$$

Коэффициент теплоотдачи с поверхности ( $\alpha_{\text{л+к}}$ ) можно взять на основании экспериментальных данных в следующих пределах:

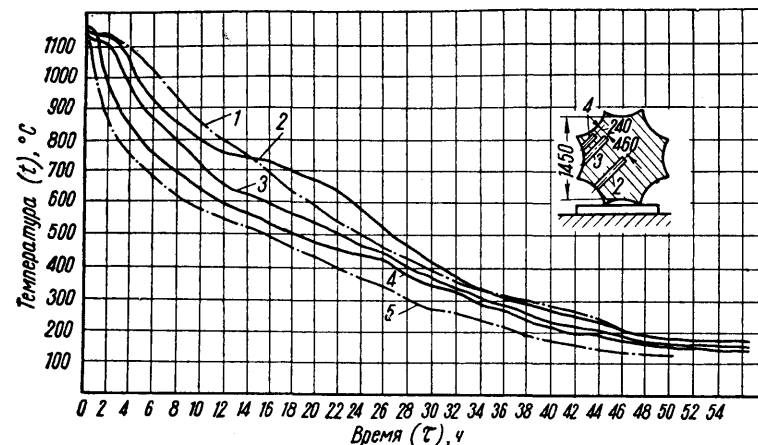


Рис. 99. Охлаждение на воздухе крупного слитка:  
2—3—4 — экспериментальные кривые; 1—5 — расчетные кривые

при охлаждении от температуры начала до температуры конца прокатки иликовки

$$\alpha_{\text{л+к}} = 35 \div 116 \text{ вт/м}^2 \cdot \text{град}$$

при охлаждении от температуры конца прокатки иликовки до 150—200°С

$$\alpha_{\text{л+к}} = 23 \div 46 \text{ вт/м}^2 \cdot \text{град}$$

(меньшие значения берут для крупных слитков и заготовок диаметром  $D \geq 1,0 \text{ м}$ , большие — для мелких).

На рис. 99 приведены кривые охлаждения на воздухе крупного слитка в сопоставлении с кривыми, полученными расчетом по формулам (206а) и (206б).



## ОКИСЛЕНИЕ И ОБЕЗУГЛЕРОЖИВАНИЕ МЕТАЛЛА ПРИ НАГРЕВЕ И БОРЬБА С ЭТИМИ ПРОЦЕССАМИ

### § 42. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Нагрев металла в пламенных печах с обычной газовой окислительной атмосферой и в электрических печах с воздушной средой всегда сопровождается окислением железа с поверхности, которое приводит к потерям металла (угару) и превращению его в окалину. При изготовлении стальных штамповок из проката потери металла (угар) достигают 2—3,5%, а при выпуске крупных поковок из стальных слитков — 4—6%.

При изготовлении деталей из стали, включающем несколько нагревов в процессе обработки, потеря металла на окисление составляет в среднем 4—5% всего нагреваемого металла. Убытки от потерь металла в процессе окисления весьма значительны и исчисляются миллионами рублей в год. Вредное действие угара, однако, не ограничивается одними убытками от потерь металла при окислении. Изделия, имеющие на поверхности окалину, подвергают в производственных условиях чистке механическим или гидравлическим способом, или травлением, а это требует дополнительных затрат и повышает трудоемкость производственного процесса и себестоимость продукции.

Окалина на поверхности заготовок и поковок может также снижать стойкость инструмента как во время штамповки и вытяжки, так и при механической обработке.

Окисление металла при нагреве может явиться причиной ухудшения качества изделий и появления во многих случаях таких пороков, как вскрытие подкорковых пузырей, закат или заштамповка окалины, неровность поверхности и др.

Угар металла при нагреве приводит к большому ущербу промышленного производства, поэтому необходимо различными способами и мероприятиями сокращать или полностью устранять вредное действие процессов окисления металла.

### § 43. ПРОЦЕСС ОКИСЛЕНИЯ ЖЕЛЕЗА

Окисление металла происходит в результате химического взаимодействия окисляющих газов ( $O_2$ ,  $CO_2$ ,  $SO_2$ ,  $H_2O$ ) с железом и его примесями.

Железо обладает большим сродством с кислородом и вследствие этого легко соединяется с ним, образуя закись железа  $FeO$ , магнитную окись  $Fe_3O_4$  и окись железа  $Fe_2O_3$ .

Окисление металла представляет собой процесс диффузии атомов кислорода через слой окисла к металлу и диффузии атомов металла через слой окисла на его наружную поверхность.

При окислении стали основную роль играет процесс диффузии атомов железа через пленку окалины на ее наружную поверхность. Снаружи образуется высший окисел железа  $Fe_2O_3$ , затем по убывающим степеням окисления следуют  $Fe_3O_4$  и  $FeO$  (рис. 100).

Процесс окисления начинается с поверхности металла и постепенно распространяется вглубь, причем по мере удаления от поверхности содержание кислорода в окислах уменьшается. Рост пленки в результате окисления металла зависит от температуры и происходит по параболическому закону. При комнатной температуре окисление железа может проявляться в виде ржавления. Нагрев стали до низких температур (до  $570^\circ C$ ) сопровождается образованием на поверхности пленки, состоящей в основном из окиси железа  $Fe_2O_3$ , которая не имеет практического значения. С повышением температуры угар металла резко возрастает и особенно большой величины достигает при температурах более  $1000^\circ C$ . При температурах выше  $570^\circ C$  окалина со-

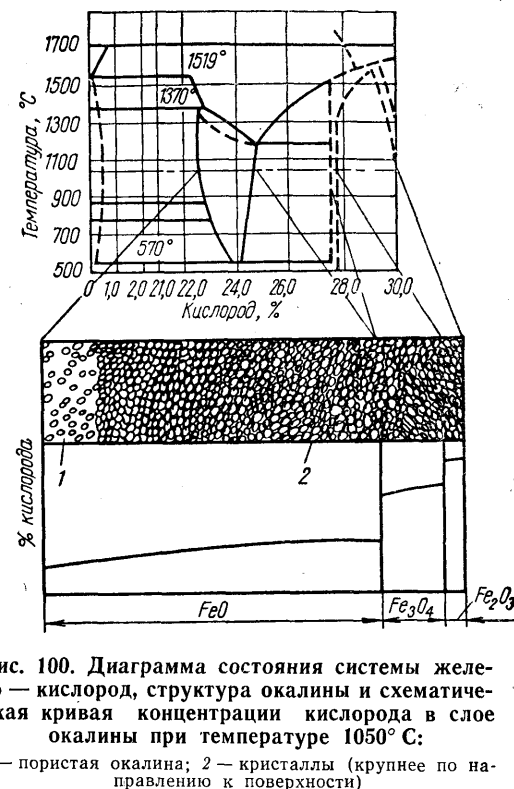


Рис. 100. Диаграмма состояния системы железо — кислород, структура окалины и схематическая кривая концентрации кислорода в слое окалины при температуре  $1050^\circ C$ :

1 — пористая окалина; 2 — кристаллы (крупнее по направлению к поверхности)

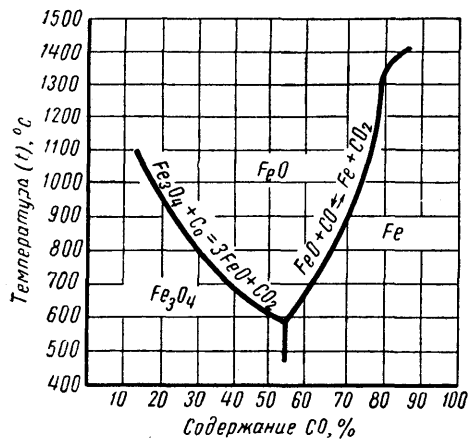


Рис. 101. Диаграмма равновесия CO<sub>2</sub>—CO—FeO—Fe(Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>—FeO)

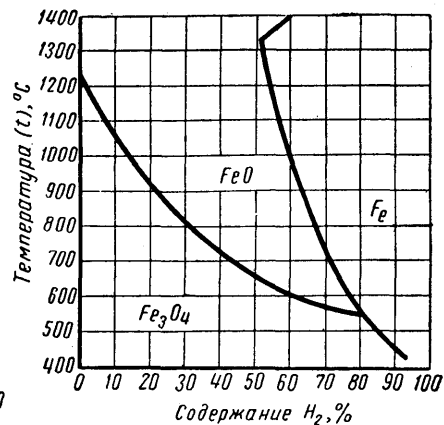
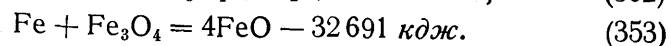
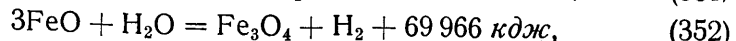
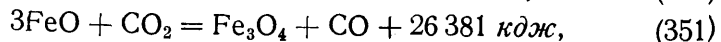
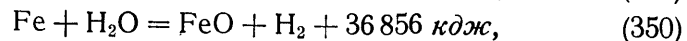
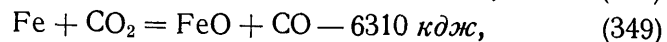
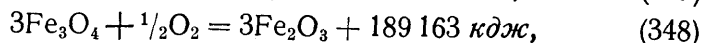
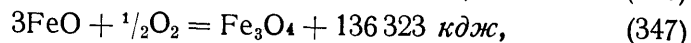
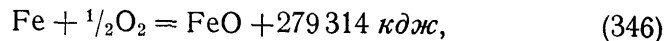


Рис. 102. Диаграмма равновесия H<sub>2</sub>O—H<sub>2</sub>—FeO—Fe(Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>—FeO)

стоит из наружного слоя (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), среднего (Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>) и внутреннего (FeO) (см. рис. 100).

Распространению окисления железа с поверхности вглубь способствует непрерывное отделение окалины и обнажение поверхности нагреваемого металла, которое вызвано различием коэффициентов расширения окалины и железа. При высоких температурах происходит оплавление окалины с поверхности (температура плавления FeO—1377°С, Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>—1527°С, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>—1565°С), что также способствует дальнейшему окислению железа.

Железо может окисляться по следующим реакциям:



При окислении железа выделяется следующее количество тепла (на 1 кг железа):

при образовании FeO — 4815 — 5003 кдж/кг;

при образовании Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> — 5799 — 6636 кдж/кг;

при образовании Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> — 6365 — 7490 кдж/кг.

Реакции окисления железа являются обратимыми. В зависимости от состава газов и температуры они могут протекать слева направо или справа налево.

На рис. 101 и 102 приведены диаграммы равновесия реакции Fe с CO<sub>2</sub> и H<sub>2</sub>O в зависимости от температуры.

#### § 44. КОЛИЧЕСТВЕННОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЕЛИЧИНЫ УГАРА

На практике различают угар по весу, поверхностный угар, скорость окисления и толщину слоя окалины.

Под весовым угаром понимают отношение количества металла, окисленного в процессе нагрева, выраженное в процентах, к его первоначальному весу. Поверхностный угар означает количество окисленного металла, отнесенное к единице поверхности нагреваемого изделия и выраженное в кг/м<sup>2</sup>.

Скорость окисления рассматривают как отношение поверхностного уgarа ко времени нагрева, выраженное в кг/м<sup>2</sup> · ч. Толщину слоя окалины измеряют в см или мм и с поверхностным угаром связывают следующим уравнением:

$$s = \frac{a}{\rho g_{\text{Fe}}} [м], \quad (35)$$

где  $s$  — толщина слоя окалины, м;

$a$  — поверхностный угар, кг/м<sup>2</sup>;

$\rho$  — плотность окалины, кг/м<sup>3</sup>; для расчетов можно принимать  $\rho = 3900$ — $4000$  кг/м<sup>3</sup>;

$g_{\text{Fe}}$  — среднее содержание железа в окалине, которое колеблется в пределах 0,715—0,765 г/г.

#### § 45. ВЛИЯНИЕ ОТДЕЛЬНЫХ ФАКТОРОВ НА УГАР МЕТАЛЛА

Угар металла зависит от температуры и продолжительности нагрева, состава печной атмосферы, вида топлива, состава (марки) металла, состояния поверхности, формы изделия и т. п.

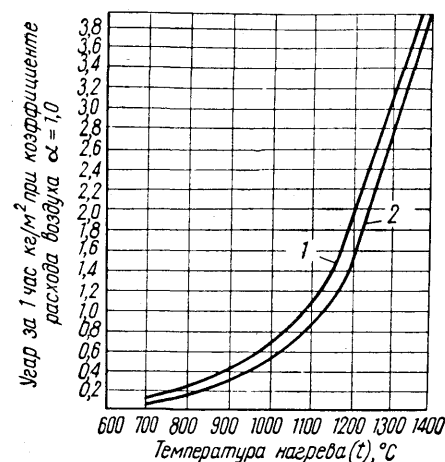


Рис. 103. Зависимость угара углеродистой стали от температуры:

1 — нагрев в продуктах горения мазута, природного и коксового газов; 2 — нагрев в продуктах горения доменного газа

На рис. 103 приведена зависимость угара углеродистой стали от температуры при нагреве в продуктах горения природного и коксового газов.

Угар металла также находится в прямой зависимости от продолжительности нагрева. Чем продолжительнее нагрев, тем больше угар. Зависимость величины поверхностного угара от температуры и времени нагрева (в пределах 600—1200°С) для углеродистых сталей выражают уравнением:

$$a = 6,3 \sqrt{\tau} e^{-\frac{900}{T}} [г/см^2], \quad (355)$$

где  $\tau$  — время нагрева, мин;

$T$  — температура нагрева, °К.

Величину угара углеродистой стали в зависимости от времени находят из уравнения

$$a_{\tau} = a \sqrt{\tau_1}, \quad (356)$$

где  $a_{\tau}$  — угар металла за время  $\tau_1$ , кг/м²;

$\tau_1$  — время, ч;

$a$  — угар за час, кг/м².

## 1. Влияние температуры и продолжительности нагрева

При температурах ниже 600—650°С окисление железа происходит медленно и практического значения не имеет, хотя поверхность изделий несколько темнеет. Скорость окисления железа начинает резко повышаться с температуры 850—900°С и наибольшего значения достигает при температуре 1300°С. Данные исследований и практики показывают, что скорость окисления при температуре 1300°С в 6—7 раз превышает скорость окисления при температуре 900°С.

## 2. Влияние печной атмосферы

Печная атмосфера, определяемая в пламенных печах химическим составом топлива, коэффициентом расхода воздуха ( $\alpha$ ) и совершенством конструкции топливосжигающих устройств, является важным фактором, влияющим на угар металла.

В зависимости от действия на металл различные газы действуют на окислительные, нейтральные и восстановительные. Печные газы обычного процесса горения (при  $\alpha \geq 1,0$ ) содержат  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{N}_2$  и незначительное количество  $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2$  и  $\text{SO}_2$ . К окислительным газам относятся кислород ( $\text{O}_2$ ), углекислый газ ( $\text{CO}_2$ ), водяной пар ( $\text{H}_2\text{O}$ ) и сернистый ангидрид  $\text{SO}_2$ . Окислительная и восстановительная способность указанных газов по отношению к металлу зависит от температуры и их соотношения в смеси, характеризующего газовую печную среду. Окислительные газы интенсивно взаимодействуют с железом при температурах выше 700—1000°С, причем наибольшей окислительной способностью обладает  $\text{SO}_2$ , а затем по степени окисления следуют  $\text{O}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  и  $\text{CO}_2$  (табл. 44).

Таблица 44

Угар стали в атмосфере различных газов за 1440 сек

Температура, °С	Потеря веса металла от взаимодействия с газом, %		
	$\text{CO}_2$	$\text{H}_2\text{O}$	$\text{O}_2$
1090	1,62	4,78	4,85
1200	3,73	9,72	9,14
1260	4,9	12,39	11,17

Свободный кислород, входящий в состав продуктов горения, приводит к увеличению угара металла, поэтому большой избыток воздуха при сжигании топлива является недопустимым.

К восстановительным газам относятся водород ( $\text{H}_2$ ) и окись углерода ( $\text{CO}$ ), а к нейтральным — азот ( $\text{N}_2$ ). Печная газовая среда может обладать нейтральными или восстановительными свойствами только при относительно большом содержании  $\text{CO}$  и  $\text{H}_2$  и определенных соотношениях окислительных и восстановительных газов.

Теоретически и практически доказано, что восстановительная газовая печная среда, полностью исключая угар стали

при нагреве, должна являться продуктом неполного горения газообразного топлива, содержащим 11—12% CO и 15—17% H<sub>2</sub>.

Продукты неполного горения с таким содержанием CO и H<sub>2</sub> могут быть практически получены при сжигании природного или коксовального газа с коэффициентом расхода воздуха  $\alpha = 0,45—0,5$  (см. рис. 12).

### 3. Влияние химического состава металла и других факторов

Угар зависит также от химического состава металла, формы и размеров заготовок и изделий, свойств окалины, способа нагрева и других факторов. С повышением содержания углерода в стали (начиная с 0,3%) угар уменьшается. Такое явление объясняется тем, что на поверхности происходит окисление углерода с образованием CO, которая в какой-то степени предохраняет металл от вредного действия на него окисляющих газов.

Легированные стали (хромистые, хромоникелевые, хромокремнистые, хромокремнеалюминиевые) вследствие способности легирующих элементов образовывать на поверхности окислы, не пропускающие атомы железа, хорошо сопротивляются окислению при высоких температурах. Однако при установлении степени влияния химического состава металла на окисление в каждом случае необходимо учитывать характер образующихся окислов, их прилипаемость к металлу, температуру и скорость нагрева. Плотная, хорошо прилипающая к металлу окалина снижает угар, но затрудняет очистку изделий.

Прочность сцепления окалины с металлом зависит от скорости диффузии железа и кислорода, концентрации кислорода на поверхности, от состава окалины, вида топлива и других причин. При большой концентрации кислорода на поверхности соприкосновения металла с окалиной происходит равномерное образование окалины, которая в меньшей степени сцепляется с металлом. Малая концентрация кислорода на поверхности замедляет процессы окисления, они начинают протекать по границам зерен и образующаяся окалина плотнее прилипает к металлу. Окалина, образующаяся при нагреве стали в мазутных нагревательных печах, менее плотно прилипает к поверхности заготовок или деталей, чем окалина, образующаяся в газовых печах.

В печах с восстановительной атмосферой образуется окалина значительно прочнее, чем в окислительных средах. При нагреве основной стали окалина получается более пузырчатая, чем при нагреве кислой, так как основная сталь содержит больше

газов. Влияние наружной поверхности металла на окисление подтверждается на практике следующим фактом: если нагревать заготовки с плотным слоем окалины, образовавшейся на их поверхности в результате предшествующих операций (например, заготовки из прокатных профилей), то угар получается меньше, чем при нагреве заготовок с чистой поверхностью. Плотный тонкий окисленный слой на поверхности способствует уменьшению угара.

На величину угара металла при его нагреве может влиять форма, размеры заготовок и отношение поверхности металла к его объему или весу.

Чем больше отношение поверхности заготовки к объему, тем больше казалось бы должен быть угар. Однако такие заготовки за счет увеличенной скорости нагрева, несмотря на большую поверхность, соприкасающуюся с окислительными печными газами, возможно нагревать с меньшим угаром, чем заготовки толстые. Короткие заготовки вследствие большой величины поверхности их торцов по отношению к длинам могут при одних и тех же условиях нагрева давать больший угар, чем заготовки длинные. По этой причине короткие заготовки иногда целесообразно нагревать в вертикальном положении.

При нагреве металла в методических, полуметодических и других печах, в которых заготовки перемещаются от места загрузки к месту выгрузки, большое влияние на величину угара может оказывать метод перемещения (транспортировки) заготовок внутри печи.

Нарушение поверхностных слоев окалины во время транспортировки заготовок при их нагреве всегда способствует повышению угара. Немаловажное значение в окислении металла может иметь также состояние подины печи и вид огнеупорного материала. Наличие жидкого шлака на подине печи во время нагрева приводит к повышению угара, так как окалина обладает свойством при высоких температурах образовывать с материалом пода легкоплавкие соединения, открывая поверхность для дальнейшего окисления. Учитывая это, необходимо для футеровки подин нагревательных печей применять высокоогнеупорные основные или нейтральные материалы (хромомagneзитовые, магнезитовые и тальковые).

## § 46. ОБЕЗУГЛЕРОЖИВАНИЕ

Нагрев стали до высокой температуры наряду с процессом окисления сопровождается обезуглероживанием поверхностных слоев (частичное выгорание углерода).

Обезуглероживание металла может приводить к понижению механических свойств, короблению изделий, появлению трещин во время закалки и к снижению упругих свойств рессорных и пружинных сталей.

С карбидом железа  $\text{Fe}_3\text{C}$  могут взаимодействовать газы  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{O}_2$  и  $\text{H}_2$  по следующим реакциям:



Наиболее обезуглероживающими газами являются водяной пар, а затем по степени активности следуют  $\text{CO}_2$ ,  $\text{O}_2$  и  $\text{H}_2$ . При высоких температурах (выше  $1000^\circ\text{C}$ ) и при сжигании топлива с большим избытком воздуха, что бывает при нагреве стали под ковку и штамповку, процесс обезуглероживания протекает значительно медленнее процесса окисления, поэтому после удаления окалины на поверхности в таком случае может не быть обезуглероженного слоя. В начале нагрева скорость обезуглероживания бывает выше, а затем она замедляется. Процесс обезуглероживания зависит от химического состава стали.

Стали высокоуглеродистые (и с повышенным содержанием углерода) при высоких температурах подвергаются большему обезуглероживанию, чем малоуглеродистые. Вольфрам и алюминий в стали повышают обезуглероживание, а другие примеси (никель, ванадий, кремний) не влияют на этот процесс.

## § 47. МЕТОДЫ БОРЬБЫ С ОКИСЛЕНИЕМ МЕТАЛЛА

Применяемые методы борьбы с угаром и обезуглероживанием можно разделить на две группы. Первую группу составляют различные совершенные приемы обслуживания и эксплуатации нагревательных печей, например, улучшение условий сжигания топлива, автоматизация тепловых процессов, улучшение ухода за печами, скоростные и ускоренные по времени режимы нагрева металла.

В результате проведения мероприятий первой группы вредное действие процесса окисления может быть уменьшено на 20—

50%, т. е. потери металла в лучшем случае могут быть сокращены вдвое.

Ко второй группе методов борьбы с окислением относят нагрев металла в восстановительной печной атмосфере, нагрев металла в муфельных пламенных и камерных электрических печах с использованием защитных газовых сред, применение защитных покрытий, нагрев в солях и нагрев в расплавленной стекломассе.

Методы борьбы второй группы отличаются большой эффективностью и позволяют угар металла устранять полностью или сводить до минимума.

### 1. Улучшение условий сжигания топлива

Любое топливо, применяемое для отопления нагревательных печей, необходимо сжигать с минимальным избытком воздуха, а следовательно, и с минимальным содержанием свободного кислорода в продуктах горения (для газообразного топлива  $\alpha = 1,05 \div 1,1$ ; для жидкого  $\alpha = 1,1 \div 1,2$ ). Мерами улучшения условий сжигания жидкого топлива являются: хороший подогрев мазута, выбор наилучшего типа форсунок, применение для горения нагретого воздуха в рекуператорах или регенераторах, предварительная его газификация.

При сжигании высококалорийных газов рекомендуется применять так называемые беспламенные горелки, с предварительным смешением газа и воздуха, обеспечивающие сжигание газа с малым коэффициентом расхода воздуха  $\alpha = 1,03—1,05$  и получение высоких температур при мягком факеле пламени.

Для лучшего взаимодействия горючих частиц с кислородом воздуха и обеспечения тем самым хороших условий горения, с минимальным избытком воздуха, при сжигании газообразного топлива, так же как и жидкого, необходимо применять воздух, нагретый до  $300—400^\circ\text{C}$ .

### 2. Улучшение состояния кладки печей и автоматизация

Наличие в рабочей камере печи разрежения сопровождается увеличением содержания свободного кислорода за счет воздуха, засасываемого в камеру через различные отверстия, которые устраивают, исходя из технологических особенностей, а также через неплотности в кладке и щели. Практика показывает, что воздух, засасываемый в камеру печи, может приво-

доть к увеличению угара металла на 15—20%, поэтому при эксплуатации пламенных нагревательных печей следует принимать меры, направленные на исключение или сведение до минимума подсоса холодного воздуха. Самым эффективным мероприятием в борьбе с подсосом воздуха является автоматизация регулирования давления в рабочей камере.

На угар металла и другие показатели работы нагревательных печей положительно влияет также автоматизация температурного режима и соотношения топлива с воздухом.

### 3. Нагрев в расплавленной стекломассе и в солях

Нагрев в расплавленной стекломассе происходит в специальных барабанных рекуперативных печах (см. рис. 149), ванны которых заполнены расплавленным стеклом (стекломассой), а в солях — в электрических электродных печах ванного типа (рис. 164), заполненных солями, состоящими примерно из 75% хлористого бария и 25% хлористого натрия. Как при нагреве в стекломассе, так и при нагреве в солях, вследствие отсутствия контакта металла с кислородом, угар полностью исключается, а тонкие пленки стекла или солей, образующиеся на поверхности заготовок, предохраняют их также от окисления при перемещении от печей к прессам или молотам и в процессе штамповки.

### 4. Защитные покрытия при нагреве

Перегретые пары хлористого лития и карбоната лития, находящиеся в рабочем пространстве нагревательной печи, способны, конденсируясь на холодной поверхности нагревательных заготовок, образовывать защитные пленки, предохраняющие металл от окисления.

Литий интенсивно вступает в соединения с кислородом, с  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  и т. д., в результате чего полностью устраняется окисляющее действие печной атмосферы. Одновременно с этим поверхность заготовок покрывается тончайшим слоем окиси лития, которая предохраняет нагретый металл от окисления при транспортировке заготовок от печи к молоту и во время процесса штамповки. Расход лития составляет 30—38 г на 1000 кг стали (примерно 1 г на 1 м<sup>3</sup> защитного газа).

В качестве защитных покрытий при нагреве стали могут служить специальные огнестойкие обмазки, обладающие хорошей плотностью при изменении температуры и объема металла

(например, жидкое стекло). Устранения или резкого снижения угара в таком случае достигают исключением или значительным ослаблением контакта окислительных печных газов с нагреваемым металлом. Жидкое стекло, применяемое в качестве огнестойкой обмазки, в которое добавлено небольшое количество графита, должно находиться в дисперсном состоянии. Защитную обмазку наносят тонким и ровным слоем на холодный металл перед нагревом.

### 5. Скоростной нагрев

При скоростном нагреве вследствие большого перепада температур печи и нагреваемого металла время нахождения заготовок в печи может быть сокращено в 2—4 раза по сравнению с обычным нагревом, в результате этого угар сокращается на 25—50%. Скоростной нагрев осуществляется в полностью механизированных и автоматизированных нагревательных печах, отапливаемых высококалорийным газом или мазутом (рис. 145).

### 6. Нагрев в печах открытого пламени с восстановительной атмосферой

Сущность процесса нагрева в восстановительной атмосфере заключается в следующем. В газовых печах обычных типов, но частично видоизмененных в конструктивном отношении (рис. 148), искусственно создают условия для неполного горения высококалорийного газообразного топлива с таким расчетом, чтобы в составе продуктов неполного горения было 10—12%  $\text{CO}$  и до 15—17%  $\text{H}_2$ . Это соответствует коэффициенту расхода воздуха  $\alpha = 0,45—0,5$  (см. рис. 12). Продукты неполного горения с большим содержанием  $\text{CO}$  и  $\text{H}_2$  в таких печах направляются в специальные камеры, в которые одновременно подается необходимое количество воздуха для полного завершения горения газообразного топлива.

Затем продукты полного горения при температуре 1200—1600 °C из камер дожигания направляют в регенераторы или рекуператоры, в которых за счет тепла уходящих газов нагревают воздух, расходуемый на неполное горение газа, до высоких температур — 650—1100 °C. Воздух, нагретый до высокой температуры, позволяет в кузнечных печах получать необходимую температуру нагрева металла. Он устраняет в значительной степени отрицательное влияние химической неполноты горе-

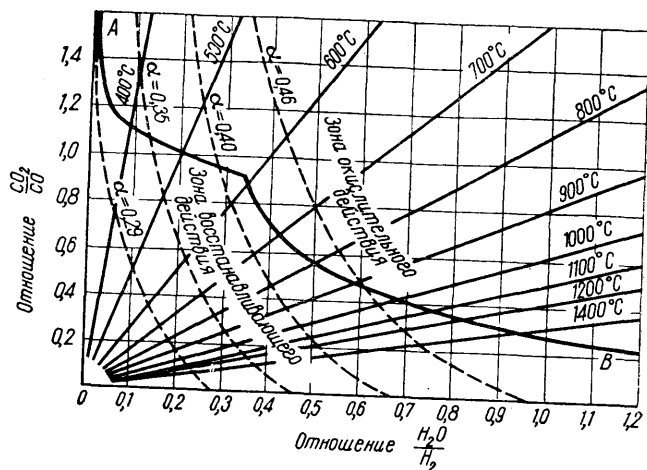
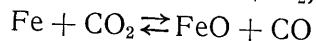
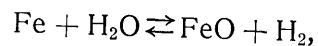


Рис. 104. Диаграмма равновесия системы атмосфера печи — нагреваемый металл

ния на расход топлива в рабочей камере. Безокислительный нагрев стали в продуктах неполного горения газа характеризуется определенными соотношениями  $\text{CO}/\text{CO}_2$  (или  $\text{CO}_2/\text{CO}$ ) и  $\text{H}_2/\text{H}_2\text{O}$  (или  $\text{H}_2\text{O}/\text{H}_2$ ).

Из теории равновесия системы атмосфера печи — металл известно, что константы равновесия для реакций окисления железа в печи



при разных температурах имеют присущие им значения, например: при 1200°С

$$K_1 = \frac{P_{\text{H}_2\text{O}}}{P_{\text{H}_2}} = 0,793; \quad \frac{1}{K_1} = 1,29;$$

$$K_2 = \frac{P_{\text{CO}_2}}{P_{\text{CO}}} = 0,317; \quad \frac{1}{K_2} = 3,16;$$

при 1000°С

$$K_1 = 0,740; \quad \frac{1}{K_1} = 1,35;$$

$$K_2 = 0,350; \quad \frac{1}{K_2} = 2,85 \text{ и т. д.}$$

На рис. 104 показана диаграмма равновесия для коксового газа, сжигаемого с  $\alpha = 0,29—0,46$  в пределах температур 400—1400°С. Кривая АВ является пограничной линией между окисляющим и восстанавливающим действием печной атмосферы. Как видно из диаграммы, полный безокислительный нагрев стали, соответствующий нормальной работе кузнечных печей при сжигании коксового газа, возможен при  $\alpha = 0,45—0,5$ , когда в атмосфере печи значение соотношений указанных составляющих будет в пределах

$$\frac{\text{CO}_2}{\text{CO}} = 0,3 \quad \text{и} \quad \frac{\text{H}_2\text{O}}{\text{H}_2} = 0,75.$$

При отоплении печей безокислительного нагрева природным газом восстановительная печная атмосфера получается также при коэффициенте расхода воздуха  $\alpha = 0,5$  при соотношениях:

$$\frac{\text{CO}_2}{\text{CO}} = 0,3 \quad \text{и} \quad \frac{\text{H}_2\text{O}}{\text{H}_2} = 0,7.$$

Как показывают исследования, интенсивный угар железа происходит при значении коэффициента расхода воздуха  $\alpha = 0,6—0,7$  и выше (рис. 105).

## 7. Безокислительный нагрев металла в печах с защитной атмосферой

Безокислительный процесс нагрева в муфельных пламенных и электрических печах основан на применении газовых контролируемых сред, обладающих защитными свойствами от окисления и обезуглероживания.

Составы защитных газов, получаемые в результате неполного сжигания различных видов топлива, приведены в табл. 45.

9 Скворцов А. А. и др.

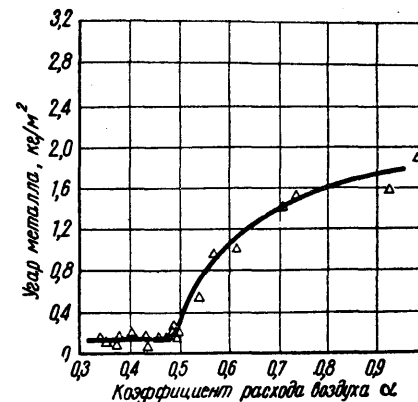


Рис. 105. Зависимость величины угара металла от коэффициента расхода воздуха  $\alpha$  при сжигании коксового газа

Таблица 45

## Составы контролируемых защитных атмосфер

Защитный газ	H <sub>2</sub>	CO	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub>	Расход топлива на 1000 м <sup>3</sup> газа
Генераторный газ из антрацита . . . . .	15	23	6	1	25	200 кг антрацита
Продукты неполного сжигания природного газа . . . . .	15	10	5	1	69	150 м <sup>3</sup> газа
Керосиновый газ . . . . .	2—12	6,5—16	3,5—6,0	8,5—11	50—60	—
Аммиачный газ (сжигание аммиака при α=0,7—0,9) . . . . .	7—20	—	—	—	93—80	220 кг аммиака

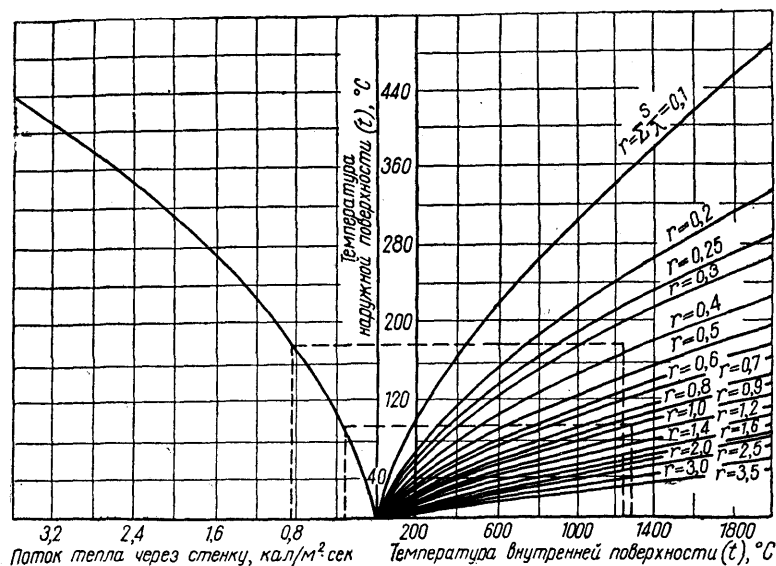


Рис. 106. График для подсчета тепловых потерь через стенки и своды печей

## ОСНОВЫ ТЕПЛОВОЙ РАБОТЫ ПЕЧЕЙ

## § 48. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Тепловой баланс печи составляют, исходя из равенства прихода тепла в печь  $Q_{\text{прих}}$  от отдельных источников и суммы расходов  $Q_{\text{расх}}$  на нагрев металла и потери. Математически это записывают следующим образом:

$$Q_{\text{прих}} = Q_{\text{расх}} \quad (361)$$

Формула (361) выражает закон сохранения энергии применительно к условиям работы металлургической печи.

Приходная часть баланса складывается из следующих составляющих:

$$Q_{\text{прих}} = Q_{\text{топл}} + Q_{\text{в}} + Q_{\text{т.ф.}} + Q_{\text{экз}}, \quad (362)$$

где  $Q_{\text{топл}}$  — тепло, полученное печью в результате горения топлива;

$Q_{\text{в}}$  — тепло, внесенное в печь с воздухом для горения;

$Q_{\text{т.ф.}}$  — физическое тепло топлива;

$Q_{\text{экз}}$  — тепло экзотермических реакций, не связанных с горением топлива.

Расходная часть баланса:

$$Q_{\text{расх}} = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5 + Q_6 + Q_7, \quad (363)$$

где  $Q_1$  — полезно использованное тепло (в нагревательных печах — тепло, потраченное на нагрев металла);

$Q_2$  — потери тепла с отходящими газами;

$Q_3$  — потери тепла от химической неполноты горения;

$Q_4$  — потери тепла от механической неполноты горения;

$Q_5$  — потери тепла в окружающее пространство;

$Q_6$  — расход тепла на разогрев кладки и других составных частей печи;

$Q_7$  — расход тепла на эндотермические реакции.



Приравнивая приходную часть к расходной части теплового баланса, получим развернутую форму исходного уравнения (361):

$$Q_{\text{топл}} + Q_{\text{в}} + Q_{\text{т. ф.}} + Q_{\text{экз}} = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5 + Q_6 + Q_7. \quad (364)$$

Для электрических печей уравнение (364) значительно упрощается:

$$Q_{\text{эл}} + Q_{\text{экз}} = Q_1 + Q_5 + Q_6 + Q_7, \quad (365)$$

где  $Q_{\text{эл}}$  — тепло, полученное за счет расхода электрической энергии.

Составляющие теплового баланса  $Q$  могут быть выражены различными способами.

У периодически действующих печей статьи баланса  $Q$  относятся к определенному промежутку времени (периоду — циклу) и имеют размерность  $[кдж/период]$ . У печей непрерывного действия статьи баланса выражают в  $[вт]$ .

Составляющие теплового баланса можно также отнести к количеству нагретого металла или к количеству израсходованного топлива и, наконец, во всех случаях статьи баланса выражают в процентах от общего прихода или от общего расхода тепла.

Равенства (364) и (365) необходимо соблюдать во всех случаях. Невязку, которая получается при испытаниях печи, относят обычно к неучтенным потерям и потерям в окружающее пространство.

На эндотермические реакции в нагревательных печах тепло  $Q_7$  обычно не расходуются. В газовых и мазутных печах не бывает потерь от механической неполноты горения  $Q_4$ .

Приходные части баланса  $Q_{\text{в}}$  и  $Q_{\text{т. ф.}}$  учитывают только при наличии воздухоподогревателей и газоподогревателей (у газовых печей).

Необходимо всегда точно представлять, в каких пределах составляют тепловой баланс. Для печей чаще всего тепловой баланс составляют в пределах рабочей камеры. Для устройств, использующих тепло отходящих газов, составляют самостоятельный тепловой баланс. Кроме того, возможно составление суммарного теплового баланса печи в комплексе с теплоиспользующими устройствами.

Уравнение теплового баланса служит при проектировании печей для определения расхода топлива и получения других необходимых расчетных данных.

При испытаниях печей уравнение теплового баланса используют для анализа тепловых потерь и выявления путей улучшения использования топлива и работы печи в целом.

В соответствии с изложенной выше методикой составления теплового баланса различают следующие виды коэффициентов полезного действия печей: термический к. п. д., когда полезно использованное тепло относится ко всему приходу тепла в печь, и эффективный к. п. д., когда полезно использованное тепло относят к теплу, выделяющемуся при горении топлива (или к расходу электрической энергии):

термический к. п. д.

$$\eta_{\text{терм}} = \frac{Q_1}{Q_{\text{прих}}} \cdot 100\%; \quad (366)$$

эффективный к. п. д.

$$\eta_{\text{эф}} = \frac{Q_1}{Q_{\text{топл}}} \cdot 100\%. \quad (367)$$

Кроме того, при анализе условий использования тепла в печи применяют:

коэффициент использования тепла в печи

$$k_1 = \frac{Q_{\text{прих}} - Q_2}{Q_{\text{прих}}} \quad (368)$$

и коэффициент использования топлива

$$k_2 = \frac{Q_{\text{топл}} - Q_2}{Q_{\text{топл}}}. \quad (369)$$

Обозначения, использованные в формулах (368) и (369), приведены выше.

В условиях эксплуатации эффективность использования топлива учитывают также величиной удельного расхода условного топлива  $b$ :

$$b = \frac{B}{G} \cdot \frac{Q_{\text{н}}^{\text{р}}}{29300} [кг \text{ усл. топл.}/кг]. \quad (370)$$

В этой формуле и в других  $B$  — расход топлива в  $кг/сек$  или  $м^3/сек$  при н. ф. у. при теплотворности  $Q_{\text{н}}^{\text{р}}$ ;  $G$  — производительность печи,  $кг/сек$ .

## 1. Приходная часть теплового баланса

Тепло, полученное в результате горения топлива:

$$Q_{\text{топл}} = B Q_{\text{н}}^{\text{р}} [вт]. \quad (371)$$

В электрических печах аналогично

$$Q_{эл} = \frac{W}{\tau} \cdot 10^3 [вт], \quad (372)$$

где  $W$  — расход электрической энергии, *квт-ч* за период времени  $\tau$  ч.

Тепло, внесенное с подогретым воздухом,

$$Q_v = B c_v t_v \alpha V_{v, \tau} [вт], \quad (373)$$

где  $c_v$  — теплоемкость воздуха, *кдж/м<sup>3</sup> · град* при н. ф. у. — средняя от 0°С до  $t_v$ , °С. Остальные обозначения приведены выше.

Тепло, внесенное с подогретым топливом (газом)

$$Q_{т. ф} = B c_t t_t [вт], \quad (374)$$

где  $c_t$  и  $t_t$  — теплоемкость и температура подогрева топлива (обычно этот член учитывают при подогреве газообразного топлива).

Тепло, полученное от экзотермической реакции горения железа, определяют по формуле

$$Q_{эжз} = 5652 G a [вт], \quad (375)$$

где 5652 *кдж/кг* — суммарное количество тепла, полученное при окислении 1 *кг* железа;

$a$  — угар металла в долях от производительности печи. Обычно  $a=0,015-0,025$ .

## 2. Расходная часть теплового баланса

Тепло  $Q_1$ , полезно использованное на нагрев металла, определяют по формуле:

$$Q_1 = G (i'' - i') = G (c_0'' t'' - c_0' t') [вт], \quad (376)$$

где  $i''$  и  $i'$  — конечное и начальное теплосодержание металла, *кдж/кг*;

$c_0''$  и  $c_0'$  — средние начальная и конечная теплоемкости, *кдж/кг · град*;

$t''$  и  $t'$  — конечная и начальная температуры, °С.

Данные о теплосодержании и теплоемкости металлов приведены в приложении 5.

Потери с отходящими газами  $Q_2$  находят по формуле:

$$Q_2 = (B V_{пр. гор} - V_{сл}) c_{yx} t_{yx} [вт], \quad (377)$$

где  $V_{пр. гор}$  — объем продуктов горения, *м<sup>3</sup>/кг* (или *м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>* при н. ф. у.);

$V_{сл}$  — объем продуктов горения, потерянных при сливе газов через отверстия, подсчитываемый по формулам (99) или (102) с учетом продолжительности открывания отверстия, *м<sup>3</sup>/сек* при н. ф. у.;

$c_{yx}$  — средняя теплоемкость продуктов горения, *кдж/м<sup>3</sup> · град*;

$t_{yx}$  — температура уходящих газов, °С.

Температура уходящих газов  $t_{yx}$  из камерных печей обычно на 50—100°С выше температуры нагрева металла и при нагреве стальных заготовок под ковку и штамповку находится на уровне 1200—1350°С.

В методических печах температура уходящих газов ниже вследствие частичного использования тепла дымовых газов на подогрев металла. Она находится на уровне 700—1000°С.

Для методических прокатных и кузнечных печей, работающих на газе, величину  $t_{yx}$  можно примерно определить в зависимости от напряженности пода и коэффициента загрузки пода из следующих выражений:

для печей с одним верхним обогревом

$$t_{yx} = 625 + 0,68P \left(1 + \frac{1}{k}\right) - 300 \text{ к, } ^\circ\text{С}; \quad (378)$$

для печей с нижним подогревом

$$t_{yx} = 450 + 0,45P \left(1 + \frac{1}{k}\right) - 150 \text{ к, } ^\circ\text{С}, \quad (378a)$$

где  $P$  — напряженность пода, *кг/м<sup>2</sup> · ч*;

$k$  — коэффициент загрузки пода.

Для мазутных методических печей эта зависимость принимает следующий вид:

для печей с одним верхним обогревом

$$t_{yx} = 860 + 1,11P \left(\frac{1}{k} - 0,61\right) - 100 \text{ к, } ^\circ\text{С}; \quad (379)$$

для печей с нижним обогревом

$$t_{yx} = 520 + 0,55P \left(0,57 + \frac{1}{k}\right) - 250 \text{ к, } ^\circ\text{С}. \quad (379a)$$

Потери от химической неполноты горения при проектировании печей подсчитывают по следующей формуле:

$$Q_3 = BQ_{\pi_3}^p, \quad (380)$$

где  $\pi_3 = 0,02 - 0,05$ . При испытании печей потери  $Q_3$  определяют по результатам полного анализа отходящих газов:

$$Q_3 = BV_{\text{пр. гор}}^{\text{сух}} \frac{12749\text{CO} + 10760\text{H}_2 + 36126\text{CH}_4}{100} [\text{вт}], \quad (381)$$

где  $V_{\text{пр. гор}}^{\text{сух}}$  — объем сухих продуктов горения,  $\text{м}^3/\text{кг}$ , или  $\text{м}^3/\text{м}^3$  при н. ф. у.

Потери от механической неполноты горения  $Q_4$  бывают в печах, работающих на твердом топливе, и здесь не рассматриваются.

Потери тепла в окружающее пространство складываются из следующих составляющих: 1) потерь через кладку ( $Q_5^I$ ); 2) потерь со слившимися газами ( $Q_5^{II}$ ); 3) потерь от лучеиспускания из открытых отверстий ( $Q_5^{III}$ ); 4) потерь с охлаждающей водой ( $Q_5^{IV}$ ); 5) прочих потерь ( $Q_5^V$ ).

Потери тепла через кладку подсчитывают по формуле

$$Q_5' = Q_{\text{ст}} + Q_{\text{св}} + Q_{\text{кр}} + Q_{\text{пода}} = k_{\text{ст}}F_{\text{ст}}(t_{\text{п}} - t_{\text{в}}) + \\ + k_{\text{св}}F_{\text{св}}(t_{\text{п}} - t_{\text{в}}) + k_{\text{кр}}F_{\text{кр}}(t_{\text{п}} - t_{\text{в}}) + \\ + k_{\text{пода}}F_{\text{пода}}(t_{\text{п}} - t_{\text{гр}}) [\text{вт}], \quad (382)$$

где  $Q_{\text{ст}}$ ,  $Q_{\text{св}}$ ,  $Q_{\text{кр}}$ ,  $Q_{\text{пода}}$  — потери тепла соответственно через стенки, свод, крышки рабочих окон и под печи;

$F_{\text{ст}}$ ,  $F_{\text{св}}$ ,  $F_{\text{кр}}$ ,  $F_{\text{пода}}$  — соответствующие поверхности;  
 $t_{\text{п}}$  — средняя температура газов в печи;  
 $t_{\text{в}}$  и  $t_{\text{гр}}$  — соответственно температуры окружающего воздуха и грунта.

Коэффициенты теплопередачи  $k_{\text{ст}}$ ,  $k_{\text{св}}$ ,  $k_{\text{кр}}$ ,  $k_{\text{пода}}$  подсчитывают по формулам, приведенным в главе VI.

Для подсчета теплопотерь через стенки и свод можно пользоваться графиком рис. 106 (см. стр. 258).

Потери тепла со слившимися из отверстий газами подсчитывают по формуле

$$Q_5'' = V_{\text{сл}} t_{\text{п}} c_{\text{сл}} [\text{вт}], \quad (383)$$

где  $V_{\text{сл}}$  — объем сливающихся продуктов сгорания,  $\text{м}^3/\text{ч}$  при н. ф. у., подсчитанный по формуле (102);

$c_{\text{сл}}$  — средняя теплоемкость продуктов горения при температуре в печи  $t_{\text{п}}^{\circ}\text{C}$ .

Потери от лучеиспускания из открытых отверстий находят по формуле (265) (см. главу VI).

Потери с охлаждающей водой определяют следующим образом:

$$Q_5^{IV} = D(t'' - t') c [\text{вт}], \quad (384)$$

где  $D$  — расход охлаждающей воды,  $\text{кг}/\text{сек}$ ;  
 $t'' - t'$  — разность температур выходящей и входящей воды,  $^{\circ}\text{град}$ ;

$c$  — теплоемкость воды,  $\text{кДж}/\text{кг} \cdot ^{\circ}\text{град}$ .

Величины эти при испытании печей находят путем замера, а при проектировании печей пользуются данными работы аналогичных конструкций.

Среднечасовой расход тепла на разогрев кладки при неустановившемся режиме находят по формуле

$$Q_6 = \frac{V_{\text{кл}} \rho_{\text{кл}} c_{\text{кл}} (t_{\text{кл}}'' - t_{\text{кл}}')}{\tau_{\text{раз}}} [\text{вт}], \quad (385)$$

где  $V_{\text{кл}}$  — объем кладки,  $\text{м}^3$ ;  
 $\rho_{\text{кл}}$  — плотность материала кладки,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;  
 $c_{\text{кл}}$  — теплоемкость,  $\text{кДж}/\text{кг} \cdot ^{\circ}\text{град}$ ;  
 $t_{\text{кл}}'' - t_{\text{кл}}'$  — разница конечной и начальной температур кладки (усредненных по всему объему);  
 $\tau_{\text{раз}}$  — время разогрева,  $\text{сек}$ .

Для иллюстрации в табл. 46 приведены статьи прихода и расхода тепла для действующих печей разных типов (данные испытаний).

Таблица 46

Тепловые балансы нагревательных печей

Характеристика печи	Камерная кузнечная печь с рекуператором, $\text{квт}/\%$	Рекуперативный нагревательный колодец, $\text{МДж}/1000 \text{ кг}/\%$	Методическая прокатная печь без подогрева воздуха, $\text{квт}/\%$
Топливо	Мазут	Смешанный газ	Природный газ
Приход тепла:			
$Q_{\text{топл}}$	872,25/91,5	1763/74,9	8664,4/92,5
$Q_{\text{возд}}$	60,47/6,3	431/18,3	121/1,3
$Q_{\text{экз}}$	20,93/2,2	56,5/2,4	581,5/6,2

Продолжение табл. 46

Характеристика печи	Камерная кузнечная печь с рекуператором, квт/%	Рекуперативный нагревательный колодец, Мдж/1000 кг/%	Методическая про- катная печь без подогрева воздуха, квт/%
$Q_{\text{газ}}$	—	106,8/4,4	—
Расход тепла:			
$Q_1$	147,7/15,6	841,5/35,8	3850/41,0
$Q_2$	515,2/54,0	1300/43,8	3035/32,4
$Q_3$	23,26/2,4	1300/43,8	884/9,4
$Q_5$	267,5/28,0	482,0/20,4	1598/17,2
Термический к. п. д.	15,5	35,8	41,0
Эффективный к. п. д.	17,0	47,5	44,5

#### § 49. ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАСХОДА ТОПЛИВА И ТЕПЛОВЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЕЧЕЙ

Приравнивая приходную и расходную части теплового баланса, получаем уравнение для определения расхода топлива:

$$BQ_H^p + BV_{\text{в.гор}}c_{\text{в}}t_{\text{в}} + Bc_{\text{т.ф}}t_{\text{т.ф}} + 5654Ga = G\Delta i + BV_{\text{пр.гор}}c_{\text{ух}}t_{\text{ух}} + BQ_H^p\pi_3 + Q_5 + Q_6. \quad (386)$$

Решая это уравнение, получим

$$B = \frac{G\Delta i - 5652Ga + Q_5 + Q_6}{Q_H^p(1 - \pi_3) - V_{\text{пр.гор}}c_{\text{ух}}t_{\text{ух}} + V_{\text{в.гор}}c_{\text{в}}t_{\text{в}} + c_{\text{т.ф}}t_{\text{т.ф}}}. \quad (387)$$

Последнее выражение можно записать в следующем виде:

$$B = Gk + B_0, \quad (388)$$

$$\text{где } k = \frac{\Delta i - 5652a}{Q_H^p(1 - \pi_3) - V_{\text{пр.гор}}c_{\text{ух}}t_{\text{ух}} + V_{\text{в.гор}}c_{\text{в}}t_{\text{в}} + c_{\text{т.ф}}t_{\text{т.ф}}}; \quad (389)$$

$$B_0 = \frac{Q_5 + Q_6}{Q_H^p(1 - \pi_3) - V_{\text{пр.гор}}c_{\text{ух}}t_{\text{ух}} + V_{\text{в.гор}}c_{\text{в}}t_{\text{в}} + c_{\text{т.ф}}t_{\text{т.ф}}}. \quad (390)$$

Таким образом, часовой расход топлива складывается из двух составляющих:  $B_{\text{пер}} = Gk$  — переменной части расхода топлива, прямо пропорциональной производительности печи;  $B_0$  —

постоянная составляющая; в первом приближении она может быть принята в качестве постоянной величины.

Из выражения (388) определяют удельный расход топлива  $b$  на единицу продукции:

$$b = \frac{B}{G} = k + \frac{B_0}{G}. \quad (391)$$

Связь удельного расхода топлива с коэффициентом полезного действия можно получить из совместного решения уравнений (367), (371) и (376).

Расход топлива определяют по формуле

$$B = \frac{G(i'' - i')}{Q_H^p\eta_{\text{эфф}}} [\text{кг/сек}], \text{ или } [\text{м}^3/\text{сек при н. ф. у}]. \quad (392)$$

Удельный расход топлива

$$b = \frac{i'' - i'}{\eta_{\text{эфф}}}. \quad (393)$$

Эффективный к. п. д. печи равен

$$\eta_{\text{эфф}} = \frac{i'' - i'}{BQ_H^p} = \frac{G(i'' - i')}{(Gk + B_0)Q_H^p}. \quad (394)$$

Таким образом, эффективный к. п. д. является величиной, обратной удельному расходу топлива.

С изменением производительности печи  $G$  часовой расход топлива  $B$ , удельный расход  $b$  и эффективный к. п. д. изменяются.

Зависимость изменения этих величин от производительности печи, которую обычно выражают через напряженность пода  $P = \frac{G}{F_{\text{пода}}}$ , называется тепловой характеристикой печи.

На рис. 107 приведен пример тепловой характеристики печи. Из формул (388), (391), (394) и графика видно, что часовой расход топлива растет с увеличением производительности печи (напряженности пода) по закону прямой линии, удельный расход топлива сначала снижается, достигает минимума, а затем опять увеличивается, эффективный же к. п. д., наоборот, сначала увеличивается, достигает максимума, а затем снижается.

Печи, сжигающие мазут и высококалорийные газы, обычно работают в левой части характеристики и увеличение их производительности ведет к повышению к. п. д. и снижению удельного расхода топлива.

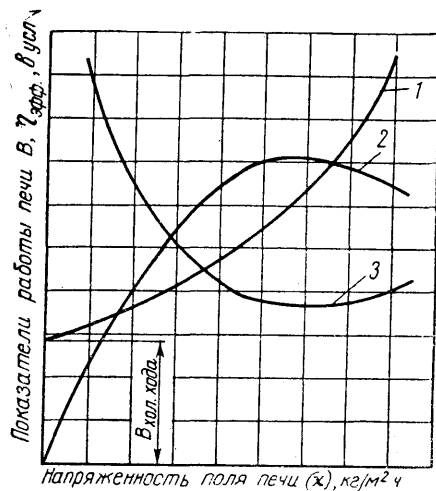


Рис. 107. Графическое изображение тепловой характеристики нагревательной печи:

1 — абсолютный расход топлива ( $B$ ); 2 — эффективный к. п. д. ( $\eta_{эфф}$ ); 3 — удельный расход условного топлива ( $\beta_{усл}$ )

В печах, работающих на низкокалорийных газах, максимального к. п. д. достигают при более низкой напряженности пода и поэтому они могут иногда работать и на правой части характеристики. Тогда с повышением производительности к. п. д. снижается, а удельный расход топлива увеличивается.

Приняв зависимость температуры отходящих газов от напряженности пода в первом приближении по закону прямой линии

$$t_{yx} = m + nP[^\circ\text{C}], \quad (395)$$

можно теоретически определить напряженность пода, соответствующую максимальному к. п. д.:

$$P_{\text{при } \eta_{\text{макс}}} = \frac{Q_b}{F_{\text{пода}}(i'' - i')} \left[ \sqrt{1 + \frac{F_{\text{пода}} \cdot (i'' - i')}{n Q_5 V_{\text{пр. гор}} c_{уx}} \times} \right. \\ \left. \times \left( 1 + \frac{\alpha V_{\text{в.т}} c_{\text{в}} t_{\text{в}} + c_{\text{т.ф}} t_{\text{т.ф}}}{Q_{\text{н}}^p} - \pi_3 - \pi_4 \frac{V_{\text{пр. гор}} c_{уx} m}{Q_{\text{н}}^p} \right) - 1 \right] [кг/м^2 \text{ч}]. \quad (396)$$

Тепловые характеристики печей можно получить двумя способами: расчетным и экспериментальным.

Следует отметить, что эксплуатационный удельный расход топлива  $b_{\text{экспл}}$  обычно всегда выше расчетного или полученного при испытании печи  $b$  вследствие неизбежных дополнительных расходов топлива на холостые ходы и на разогрев печей после простоев и ремонтов.

Связь между величинами  $b$  и  $b_{\text{экспл}}$  можно выразить следующим образом:

$$b_{\text{экспл}} = \frac{bN100}{\delta} + \frac{B_1 \tau_1 + B_2 \tau_2}{G_{\text{м}}} 3600, \quad (397)$$

где  $\delta$  — запланированный процент выхода годного металла;  
 $N$  — средняя кратность нагревов (количество нагревов одной заготовки);

$B_1$  — средний расход топлива на холостой ход,  $кг/сек$ ;

$\tau_1$  — количество часов горячих простоев в месяц;

$B_2$  — расход топлива на разогрев печи,  $кг/сек$ ;

$\tau_2$  — количество часов разогревов печи в месяц;

$G_{\text{м}}$  — месячная производительность печи,  $кг$  годного/мес.

При наличии большого количества агрегатов и отсутствии индивидуального учета расхода топлива целесообразно строить объединенные тепловые характеристики  $b=f(P)$  для группы печей, участка или даже цеха в целом.

Кроме проведения эксплуатационно-технологических мероприятий (переход на трехсменную непрерывную работу, сокращение простоев и т. д.), увеличения производительности нагревательных печей можно достигнуть при совершенствовании конструкций (введение нижнего подогрева в прокатных печах, повышение температурного напора, всемерная механизация процессов загрузки и выгрузки и др.).

Для уменьшения расхода топлива необходимо принимать меры к сокращению потерь тепла с охлаждающей водой и наружными поверхностями.

Опыт показывает, что в ряде случаев отмечен чрезмерный, ничем не оправданный, расход воды на охлаждение печей. Можно рекомендовать периодические замеры перепада температур и расхода воды мерными баками с последующим подсчетом количества тепла, теряемого с уходящей водой.

Большие прокатные печи целесообразно переводить на испарительное охлаждение. При этом уменьшаются потери тепла на охлаждение и получается дополнительное количество технологического пара.

Так, если в больших методических прокатных печах, работающих на газе, потери тепла с охлаждающей водой составляют 13—20% и выше, то при испарительном охлаждении эти потери не превышают 10% и частично возвращаются в виде технологического пара.

Хорошая тепловая изоляция особенно важна для малых нагревательных печей, у которых велико отношение суммарной наружной поверхности кладки к полезной площади пода. Примерные потери тепла через стенки камерных печей приведены в табл. 47.

Подробные данные о термоизоляционных материалах приведены в главе IX.

В последнее время наиболее применимы легковесные огнеупоры. Они обладают меньшим удельным весом, низкой тепло-

Таблица 47

Потери тепла стенками пода, $\text{вт/м}^2$			
Стенки пода	Площадь пода, $\text{м}^2$		
	0—2	2—5	5 и выше
Без изоляции . .	34 800—46 400	29 000—34 800	21 000—29 000
С изоляцией . .	21 000—29 000	17 400—21 000	13 900—17 400

емкостью и пониженной теплопроводностью по сравнению с огнеупорами обычных марок. Кладка, изготовленная из легковесных огнеупоров, значительно легче обычной, что наряду с пониженной теплоемкостью значительно сокращает время разогрева печей.

Таким образом, применение легковесных огнеупоров особенно выгодно для периодически действующих печей.

Характерной особенностью нагревательных печей является высокая температура отходящих газов, ведущая к большим потерям тепла. Так как эти потери технологически неизбежны, то возникает первоочередная задача снижения температуры газов и использования тепла за пределами рабочей камеры.

Уменьшения потерь тепла с отходящими газами вследствие снижения их температуры достигают, применяя методические печи, имеющие более высокий к. п. д.

В печах меньшей производительности, предназначенных для нагрева деталей при индивидуальном и малосерийном производстве, можно рекомендовать замену однокамерных нагревательных печей двухкамерными. В этом случае тепло отходящих газов, поступающих из одной камеры, используется для предварительного нагрева заготовок во второй камере.

Возможно применение реверсивных печей, у которых топочные устройства каждой из камер могут работать попеременно.

Замена однокамерной печи двухкамерной на одном из заводов увеличило производительность с 250 до 330  $\text{кг/ч}$  и повысило к. п. д. печи с 14,5 до 21,5%.

Тепло отходящих газов за пределами печей утилизируется в теплоиспользующих устройствах, которые можно разделить на две основные группы.

В устройствах первой группы тепло тратится на подогрев воздуха (реже газа), требующегося для горения, поэтому оно возвращается в печь (рис. 108).

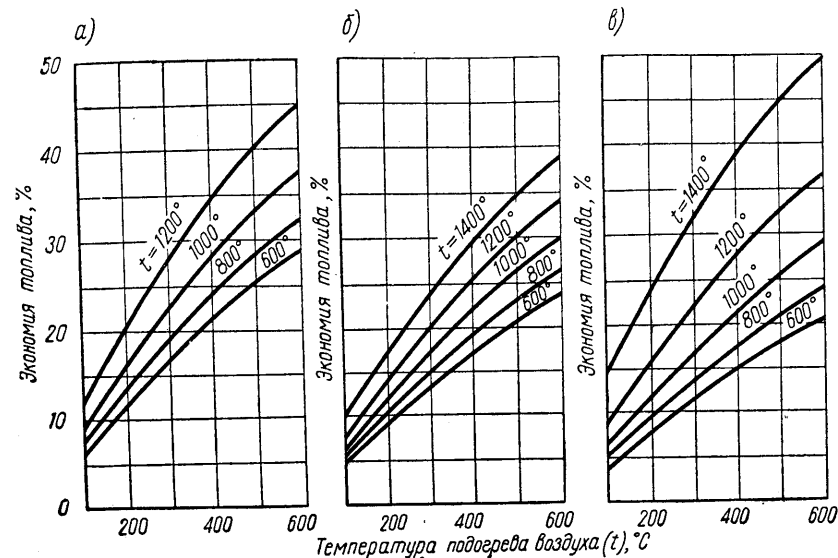


Рис. 108. Экономия топлива при подогреве воздуха в зависимости от температуры отходящих газов и температуры воздуха:

а — при сжигании каменного угля; б — при сжигании мазута; в — при сжигании генераторного газа

Для эффективного применения подогрева воздуха устанавливают рекуператоры и регенераторы разных конструкций. В устройствах второй группы тепло отходящих газов используется для других, обычно энергетических целей.

К теплоиспользующим аппаратам этой группы относятся: 1) водоподогреватели для отопления и горячего теплоснабжения; 2) котлы-утилизаторы для получения технологического пара; 3) газовые турбины для получения энергии.

Конструкции теплоиспользующих устройств подробно описаны в главе X.

## § 50. ТЕПЛОВЫЙ БАЛАНС ТЕПЛОИСПОЛЬЗУЮЩИХ УСТРОЙСТВ

При расчете и испытаниях теплоиспользующих устройств также необходимо составлять их тепловой баланс. Ниже для примера рассматривается тепловой баланс воздухоподогревателя, который наиболее часто бывает на практике.

Приход тепла в воздухоподогреватель при отсутствии потерь тепла в соединительных каналах численно равен потерям рабочей камеры с уходящими газами:

$$Q_{\text{прих}} \approx Q_2 = (BV_{\text{пр. гор}} - V_{\text{сл}}) c_{\text{yx}} t_{\text{yx}} \quad (398)$$

Расход тепла

$$Q_{\text{расх}} = V_{\text{возд}} c_{\text{в}} (t_{\text{в}}'' - t_{\text{в}}') + Q_2' + Q_5', \quad (399)$$

где  $V_{\text{возд}}$  — количество подогреваемого воздуха,  $\text{м}^3/\text{сек}$  при н. ф. у.;

$Q_2'$  — потери тепла с уходящими газами после воздухоподогревателя;

$Q_5'$  — потери тепла в окружающую среду в пределах подогревателя;

Значения остальных обозначений приведены выше.

Пренебрегая присосами в пределах воздухоподогревателя, будем иметь:

$$Q_2' = (BV_{\text{пр. гор}} - V_{\text{сл}}) c_{\text{yx}} t_{\text{yx}}', \quad (400)$$

где  $t_{\text{yx}}'$  и  $c_{\text{yx}}$  — температура и теплоемкость газов после воздухоподогревателя.

Приравняв уравнение (398) к уравнению (399), получим

$$(BV_{\text{пр. гор}} - V_{\text{сл}}) c_{\text{yx}} t_{\text{yx}} = BV_{\text{возд}} c_{\text{в}} (t_{\text{в}}'' - t_{\text{в}}') + B(V_{\text{пр. гор}} - V_{\text{сл}}) c_{\text{yx}}' t_{\text{yx}}' + Q_5'. \quad (401)$$

Из этого уравнения можно определить  $t_{\text{в}}''$  при заданной  $t_{\text{yx}}'$  или величину  $t_{\text{yx}}'$  при заданной  $t_{\text{в}}''$ .

Принимая для упрощения вычислений  $t_{\text{в}}' = 0$ , получим

$$t_{\text{в}}'' = \frac{B(V_{\text{пр. гор}} - V_{\text{сл}}) c_{\text{yx}} (t_{\text{yx}} - t_{\text{yx}}') - Q_5'}{V_{\text{возд}} c_{\text{в}}} [^\circ\text{C}], \quad (402)$$

$$t_{\text{yx}}' = t_{\text{yx}} - \frac{V_{\text{возд}} c_{\text{в}} t_{\text{в}}'' + Q_5'}{(BV_{\text{пр. гор}} - V_{\text{сл}}) c_{\text{yx}}} [^\circ\text{C}]. \quad (402a)$$

## МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ СТРОИТЕЛЬСТВА ПЕЧЕЙ

### § 51. ОГНЕУПОРНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

#### 1. Общие сведения

Для строительства печей применяют огнеупоры, строительные и теплоизоляционные материалы, черные и цветные металлы и жаростойкие сплавы.

Огнеупорами в технике называют строительные материалы, которые служат для устройства тепловых агрегатов и имеют температуру плавления не ниже  $1580^\circ\text{C}$ . Подвергаясь действию высоких температур газообразных продуктов горения топлива, летучей золы, окалины и расплавленных шлаков, огнеупоры должны длительно сохранять свою строительную прочность.

Из огнеупорных материалов строят топки и рабочие камеры печей или футеруют стенки теплоиспользующих устройств и дымоходов.

Из всех материалов, применяемых для устройства печей, огнеупоры являются наиболее специфическими. Они оказывают большое влияние на стойкость печей и их производительность. Огнеупоры хорошего качества в сочетании с правильной эксплуатацией могут значительно повышать технико-экономические показатели работы печей.

В зависимости от температуры плавления огнеупорные материалы делят на три группы: огнеупорные с  $t_{\text{пл}} = 1580-1770^\circ\text{C}$ ; высокоогнеупорные с  $t_{\text{пл}} = 1770-2000^\circ\text{C}$  и высшей огнеупорности с  $t_{\text{пл}} > 2000^\circ\text{C}$ .

Все огнеупоры являются химически неоднородными телами. Они состоят из огнеупорной основы, представляющей собой простые окислы ( $\text{SiO}_2$ ;  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ;  $\text{MgO}$ ;  $\text{CaO}$  и др.), карбиды, нитриды или бориды ( $\text{SiC}$  и др.) или огнеупорные соединения

Классификация огнеупорных материалов

Кремнеземистые	Алюмосиликатные	Магнезиальные
Динасовые, содержащие не менее 90% $\text{SiO}_2$	Кварцевые, содержащие более 99% $\text{SiO}_2$	
Полукислые, содержащие не менее 65% $\text{SiO}_2$ и не более 30% $\text{Al}_2\text{O}_3$	Шамотные, содержащие менее 65% $\text{SiO}_2$ и от 30 до 45% $\text{Al}_2\text{O}_3$	
Высокоглиноземистые, содержащие более 45% $\text{Al}_2\text{O}_3$	Магнезитовые, содержащие не менее 85% $\text{MgO}$	
Доломитовые, содержащие не менее 40% $\text{CaO}$ и 35% $\text{MgO}$	Форстеритовые, содержащие от 35 до 55% $\text{MgO}$ и до 35% $\text{SiO}_2$	
Шпинельные, содержащие $\text{MgO}$ и $\text{Al}_2\text{O}_3$ в молекулярном отношении		

( $2\text{MgO} \cdot \text{SiO}_2$  — форстерит;  $3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$  — муллит и др.), а также различных примесей и связи.

По химическим свойствам огнеупорной основы различают кислые огнеупоры, в которых преобладает кислотный окисел  $\text{SiO}_2$ ; нейтральные, когда кислотный окисел нейтрализуется основным (например, шамот, состоящий из  $\text{SiO}_2$  и  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ); основные, в которых преобладает основной окисел ( $\text{MgO}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  и др.), и индифферентные, или амфотерные, не имеющие ни кислотных ни основных свойств (например углеродистые, хромистые —  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ; циркониевые —  $\text{ZrO}_2$  и др.).

В соответствии с ГОСТ 4385—48 огнеупорные материалы по химико-минералогическим свойствам делят на восемь классов, включающих 18 групп (табл. 48).

Огнеупоры можно применять в виде кирпичей различных размеров (стандартных), фасонных изделий и изделий специального назначения.

По способу изготовления огнеупоры делят на 1) пиленные из естественных горных пород; 2) формованные из пластических масс; 3) полусухого и сухого прессования, полученные из сухих или увлажненных порошков; 4) трамбованные; 5) литые и 6) изделия, полученные особыми способами формования.

По способу термической обработки различают огнеупоры безобжиговые, обжиговые и плавленые.

по ГОСТ 4385—48

Таблица 48

Хромистые	Углеродистые	Циркониевые	Окисные	Карбидные и нитридные
Хромитовые, содержащие до 30% $\text{Cr}_2\text{O}_3$	Хромомагнезитовые, содержащие 10—30% $\text{Cr}_2\text{O}_3$ , и 35% $\text{MgO}$	Графитовые, содержащие 30—60% C	Цирконовые (из минерала циркона $\text{ZrO}_2 \cdot \text{SiO}_2$ )	Циркониевые (из минерала циркония $\text{ZrO}_2$ )
		Коксовые, содержащие 70—90% C		Изделия из окисей бериллия, тория, церия и т. д.
				Карборундовые, содержащие от 30 до 90% $\text{SiC}$
				Изделия из нитридов, карбидов и боридов

## 2. Свойства огнеупоров

Огнеупорные материалы характеризуются физическими и рабочими свойствами.

Рабочие свойства огнеупоров следующие.

✓ **Огнеупорность** — свойство огнеупоров противостоять действию высоких температур. Огнеупорность зависит главным образом от химико-минералогического состава и определяется температурой, при которой испытуемый образец в виде усеченной трехгранной пирамиды высотой 30 мм, со сторонами основания 8 мм и сторонами верхнего сечения 2 мм склоняет свою вершину до основания (рис. 109).

Температуру, при которой происходит падение пирамиды испытуемого огнеупора, определяют сравнением с температурой падения эталонных образцов — пироскопов, изготовленных из смесей материалов с известной огнеупорностью (ГОСТ 4069—48).

✓ **Механическая прочность** — свойство огнеупоров выдерживать различные нагрузки. Огнеупоры испытывают на сжатие при комнатной температу-

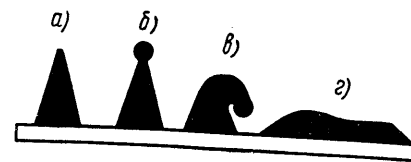


Рис. 109. Керамические пироскопы: а — до нагрева; б — начало размягчения; в — момент падения; г — полное расплавление



ре по ГОСТу 4071—48. Предел прочности при сжатии для различных огнеупоров составляет 8—68 Мн/м<sup>2</sup>.

**Деформация под нагрузкой** при высоких температурах является важнейшим свойством огнеупоров. Показателем строительной прочности огнеупора при высоких температурах является температура начала размягчения.

Для определения деформации под нагрузкой стандартные образцы (ГОСТ 4070—48) ( $d=36$  мм;  $h=50$  мм) испытывают на сжатие под нагрузкой  $\sim 0,2$  Мн/м<sup>2</sup> при непрерывном повышении температуры. Температура начала размягчения соответствует сжатию образца на 0,3 мм.

✓ **Термическая стойкость** (термостойкость) — это свойство огнеупоров выдерживать колебания температур, не разрушаясь, т. е. не образуя трещин и отколов.

Термостойкость огнеупоров зависит от природы и структуры исходного сырья и определяется по ГОСТу 7875—56 на 5 штук цельных кирпичей путем 10-минутного нагрева их торцов на глубину 50 мм в печи, разогретой до 1300°С, и последующего охлаждения в проточной воде в течение 5 мин и 10 мин на воздухе.

Нагрев и охлаждение при определении термостойкости повторяют до потери 20% веса кирпича.

Характеристикой термостойкости является количество теплосмен (одно нагревание и одно охлаждение).

✓ **Шлакоустойчивость** — способность огнеупоров сопротивляться разрушению от химического и физического действия соприкасающихся с ними компонентов: шлаков, окислов, газов и т. п. Наиболее интенсивно огнеупоры разрушаются шлаками при температурах выше 1200°С и тогда, когда воздействующие на них компоненты противоположны им по химическим свойствам: кислые материалы (динасовые) интенсивно разрушаются основными компонентами, а основные — кислыми компонентами.

✓ **Постоянство объема.** При нагревании и охлаждении огнеупоры изменяют объем от действия на них тепла, от дополнительной усадки или роста и от деформации под нагрузкой.

В производственных условиях большое значение имеет дополнительная усадка или рост, так как они вызывают необратимые изменения линейных размеров огнеупорных изделий при повторных нагреваниях до высоких температур. Дополнительную линейную усадку или рост определяют по ГОСТ 5402—50.

### 3. Физические свойства огнеупоров

✓ **Пористость.** Под пористостью понимают отношение объема пустот ко всему объему огнеупорного изделия. Различают три вида пористости: истинную (общую), кажущуюся (открытую) и закрытую. Общая пористость огнеупоров, выражаемая в процентах, колеблется в широких пределах (от 10 до 80%). Пористость определяют по ГОСТ 2409—53.

✓ **Удельный и объемный вес.** Удельный вес огнеупоров определяют как отношение веса высушенного порошка определенной крупности зерен при 105°С к занимаемому им объему без пор. За объемный вес огнеупоров принимают вес единицы его объема с учетом всех пор (ГОСТ 2409—59 и 2211—43).

✓ **Газопроницаемость.** Способность огнеупоров пропускать газ называется газопроницаемостью. Ее измеряют количеством газа в литрах, прошедшего через испытуемый образец площадью 1 м<sup>2</sup>, при толщине образца 1 м и разности давлений, равной примерно 0,1 Мн/м<sup>2</sup>. Газопроницаемость зависит от природы огнеупорного материала, его обработки, от температуры и давления газа. С повышением температуры газопроницаемость у всех огнеупоров понижается вследствие того, что тепловые расширения способствуют уплотнению материала, а легкоплавкие примеси иногда несколько закупоривают его поры.

Газопроницаемость находится в прямой зависимости от открытой сквозной пористости. Ее определяют по ОСТ — НКТП—4312.

✓ **Теплопроводность.** Огнеупорные материалы являются плохими проводниками тепла (за исключением карборунда и графита). С повышением температуры теплопроводность большинства огнеупоров увеличивается, только теплопроводность магнезита и карборунда снижается при повышении температуры. Зависимость эта с большим или меньшим приближением можно выразить формулой:

$$\lambda_t = a \pm bt \text{ [вт/м} \cdot \text{град]}.$$

✓ **Теплоемкость.** Средняя теплоемкость огнеупоров увеличивается с повышением температуры. Для динаса, шамота, магнезии и других огнеупоров она отличается очень немного и может быть принята:  $c_0^{100} \approx 0,838$  кДж/кг · град и  $c_0^{1000} \approx 1,130$  кДж/кг · град. Для углеродистых огнеупоров теплоемкость несколько выше:  $c_0^{100} \approx 1,256$  кДж/кг · град и  $c_0^{1000} \approx 1,517$  кДж/кг · град.

✓ **Форма и точность размеров.** По форме огнеупоры разделяют на нормальный кирпич, кирпич других размеров и фасонные изделия. К нормальному кирпичу относят так называемый

прямой кирпич, а также продольный и поперечный клин следующих размеров:

большой прямой —  $250 \times 123 \times 65$  мм; большой клин —  $250 \times 123 \times 65 \times 55$  мм;

малый прямой —  $230 \times 113 \times 65$  мм; малый клин —  $230 \times 113 \times 65 \times 55$  мм.

Отклонение размеров зависит от способа получения огнеупора и обусловлено ГОСТами.

Характеристика рабочих и физических свойств огнеупоров приведена в табл. 49.

#### 4. Краткие сведения о технологии производства и применении огнеупоров

**Динасовые изделия** изготавливают из кварцевых пород (кварцитов), содержащих не менее 93%  $\text{SiO}_2$ .

В качестве связующего вещества обычно применяют слабый известковый раствор (известковое молоко), составляющий 1,5—3% от веса шихты.

Изделия прессуют на механических прессах давлением  $\sim 20\text{--}30$  Мн/м<sup>2</sup>. Динасовые изделия обжигают по сложному ступенчатому термическому режиму с конечной температурой обжига  $\sim 1470^\circ\text{C}$ .

Огнеупорная промышленность выпускает в основном динасовые изделия в виде кирпича различных размеров по ГОСТу 8691—58, 6024—51, 1566—50.

В нагревательных и других печах динасовые изделия способны выдерживать высокие температуры (до  $1680^\circ\text{C}$ ), являясь достаточно стойкими по отношению к кислым шлакам и окислительным реагентам.

Однако наряду с положительными свойствами динасовые изделия характеризуются и отрицательными моментами: 1) плохой стойкостью по отношению к основным окислам, основным шлакам и пыли; 2) большим увеличением линейных размеров и объема при нагревании от термических расширений кирпича и модификационных изменений кварца; 3) низкой термической стойкостью, т. е. быстрым разрушением кирпича от колебания температур и ударов в кладку факела горелок (форсунок).

При устройстве нагревательных печей динасовые изделия можно применять для кладки сводов и стен рабочих камер высокотемпературных печей, работающих без резких колебаний температуры.

✓ **Шамотные изделия** получают путем обжига сырца, полученного из размолотых огнеупорных глин, отощенных шамотом. Сырьем для шамотных огнеупоров являются огнеупорные гли-

ны ( $t_{\text{пл}} \geq 1580^\circ$ ), основной составной частью которых является каолинит.

Шамотные изделия применяют в промышленности в виде кирпича различных стандартных размеров (ГОСТы 390—54, 8691—58, 6024—51 и т. д.), а также в виде фасонных изделий.

Шамотные огнеупоры характеризуются хорошей термической устойчивостью (до 50 теплосмен), низкой температурой начала деформации под нагрузкой  $\sim 0,2$  Мн/м<sup>2</sup> ( $1250\text{--}1400^\circ\text{C}$ ), плохой химической стойкостью по отношению к расплавленным шлакам, заметной усадкой при температуре  $1200\text{--}1400^\circ\text{C}$  (до 1%).

Шамотные изделия по сравнению с другими являются наиболее дешевыми и доступными в изготовлении из местного сырья. Поэтому производство шамотных изделий достигает 70% от общего производства всех огнеупоров в СССР.

Из шамотных огнеупоров выполняют стены и своды всех типов нагревательных печей, газоходы, топки, дымовые трубы и т. д.

**Высокоглиноземистые и корундовые изделия** получают путем обжига сырца, отформованного из измельченных высокоглиноземистых пород (диаспора, муллита, андалузита, силлиманита, корунда и др.), содержащих более 45%  $\text{Al}_2\text{O}_3$  на глиняной или другой связке.

**Корундовые изделия** изготавливают из тонкоизмельченного глинозема, сформованного в брикеты на глиноземистой связке и обожженного при температуре  $1700\text{--}1750^\circ\text{C}$ .

**Плавленные высокоглиноземистые** огнеупоры получают путем электроплавки в дуговых печах специальных шихт, содержащих до 70—80% муллита или других высокоглиноземистых минералов. Высокоглиноземистые огнеупоры отличаются высокой огнеупорностью и термостойкостью.

В нагревательных печах высокоглиноземистые изделия в виде кирпича стандартных размеров можно применять для кладки топок, стен и других ответственных частей высокотемпературных печей.

✓ **Магнезитовые (периклазовые)** огнеупорные изделия получают из измельченного «намертво» обожженного магнезитового порошка, полученного путем обжига природного магнезита ( $\text{MgCO}_3$ ).

Магнезитовые изделия характеризуются высокой огнеупорностью (выше  $2000^\circ$ ), высокой температурой начала деформации ( $1550\text{--}1600^\circ$ ), хорошей химической стойкостью к основным и железистым шлакам, очень низкой термической стойкостью, резким снижением качества при попадании влаги, значительным расширением при нагревании.

Характеристика огне

Огнеупоры	Химический состав огнеупорной основы, %	Огнеупорность по стандартному образцу, °С (не менее)	Температура начала деформации под нагрузкой $\approx 0,2 \text{ МН/м}^2$ , °С	Максимальная допустимая рабочая температура, °С	Термическая стойкость в водяных теплосменах
Динасовые (ГОСТ 4157—48)	$\text{SiO}_2=93-97$	1690—1729	1620—1660	1630—1680	1—4
Полукислые (кварцевые глинистые ГОСТ 4873—49)	$\text{SiO}_2=70-80$ $\text{Al}_2\text{O}_3=26-15$	1600—1700	1300—1400	1250—1350	4—15
Шамотные	$\text{SiO}_2=50-65$ $\text{Al}_2\text{O}_3=45-30$	1610—1730	1250—1400	1200—1400	10—50
Высокоглиноземистые (муллитовые, корундовые и др.)	$\text{SiO}_2=0-45$ $\text{Al}_2\text{O}_3=100-50$	1750—2050	1450—1870	1400—1850	20—50
Мagneзитовые	$\text{MgO}=91-96$	1900—2000	1500—1550	1750—1800	1—2
Форстеритовые	$\text{SiO}_2=33-40$ $\text{MgO}=60-40$	1750—1850	1550—1700	1500—1650	5—10

Таблица 49

упорных материалов

Временное сопротивление сжатию, $\text{МН/м}^2$	Плотность, $\text{кг/м}^3$	Объемная масса, $\text{кг/м}^3$	Коэффициент теплопроводности ( $\lambda$ ), $\text{Вт/м}\cdot\text{град}$	Средняя теплоемкость ( $c$ ) при 100° ( $c_{100}^\circ$ ), $\text{кДж/кг}\cdot\text{град}$	Пористость, %	Химические свойства при высоких температурах
15—20	2330—2430	1700—2000	$1,047+0,93 \times \frac{t}{1000}$	0,770	18—24	Плохая сопротивляемость основным шлакам и восстановительным реагентам. Хорошая сопротивляемость кислым шлакам и окислительным реагентам
10—12,5	—	1800—1950	—	—	20—32	Удовлетворительная сопротивляемость кислым и основным шлакам
10—15	2500—2700	1700—2300	$0,698+0,64 \times \frac{t}{1000}$	0,842	13—30	Плохая сопротивляемость основным шлакам и удовлетворительная — кислым шлакам, а также кислым и основным реагентам
20—60	—	3000—4000	1,63—3,26	—	до 25	Хорошая сопротивляемость основным и кислым шлакам. Удовлетворительная — восстановительным и окислительным реагентам
30—65	3500—3600	2400—2700	$4,30-0,51 \times \frac{t}{1000}$	0,913	25—28	Хорошая сопротивляемость основным шлакам и окислительным реагентам. Удовлетворительная — по отношению к восстановительным реагентам. Плохая сопротивляемость кислым шлакам
17,5—40	—	2000—3000	—	—	5—40	Удовлетворительная и хорошая сопротивляемость основным и кислым шлакам

Огнеупоры	Химический состав огнеупорной основы, %	Огнеупорность по стандартному образцу, °С (не менее)	Температура, начала деформации под нагрузкой $\sim 0,2 \text{ Мн/м}^2$ , °С	Максимальная допустимая рабочая температура, °С	Термическая стойкость в водяных теплосменах
Мagneзитохромитовые (хромомagneзитовые)	$\text{MgO}=66-35$ $\text{Cr}_2\text{O}_3=8-18$	1800—1900	1500—1550	1650—1700	5—50
Графитовые	$\text{SiO}_2=33-46$ $\text{Al}_2\text{O}_3=30-12$ $\text{C}=20-50$	Более 2000°	1400—1600	—	—
Углеродистые (коксовые)	$\text{C}=85-92$	Более 2500	1700	—	—
Карборундовые	$\text{SiC}=50-95$	1820—2000	1700—1850	1600—1750	50—60
Циркониевые	$\text{ZrO}_2=70-90$	Более 2000	Более 1700	1800—1950	—

Продолжение табл. 49

Временное сопротивление сжатию, $\text{Мн/м}^2$	Плотность, $\text{кг/м}^3$	Объемная масса, $\text{кг/м}^3$	Коэффициент теплопроводности ( $\lambda$ ), $\text{вт/м} \cdot \text{град}$	Средняя теплоемкость ( $c$ ) при 100° ( $c_{100}^\circ$ ), $\text{кДж/кг} \cdot \text{град}$	Пористость, %	Химические свойства при высоких температурах
20—50	3500—4000	2600—3200	$1,97-0,215 \times \frac{t}{1000}$	—	16—28	Хорошая сопротивляемость основным шлакам и окислительным реагентам. Удовлетворительная — по отношению к кислым шлакам и плохая сопротивляемость восстановительным реагентам
13—30	—	1800	При 300° С 3,4—4,65	—	23—28	Удовлетворительная сопротивляемость основным и кислым шлакам и восстановительным реагентам. Плохая сопротивляемость окислительным реагентам
12—30	1800—2200	1400—1600	При 300° С 5,80—17,5	1,256	30—35	То же
40	2800—3100	2300	При 300° С 4,65—5,8	—	20—26	Плохая сопротивляемость основным и кислым шлакам. Хорошая — по отношению к восстановительным реагентам и удовлетворительная — к окислительным реагентам
140	—	3700	При 300° С 2,9	—	—	Хорошая сопротивляемость окислительным реагентам. Удовлетворительная — по отношению к основным и кислым шлакам. Плохая — к восстановительным реагентам.

Магнезитовые изделия в виде кирпича нормальных размеров (ГОСТ 4689—49) широко применяются для кладки ответственных элементов рабочего пространства высокотемпературных металлургических печей.

В нагревательных кузнечных и прокатных печах магнезитовые изделия можно применять в зонах высоких температур и для футеровки подин.

**Форстеритовые изделия** содержат от 35 до 55% MgO при отношении  $MgO : SiO_2 = 0,94—1,33$ . Сырьем для получения форстеритовых изделий являются силикаты магния: тальк, дунит, оливинит и т. д. Форстеритовые изделия можно применять в обожженном виде и безобжиговые. Форстеритовые изделия имеют достаточно высокую огнеупорность (до  $1800^\circ$ ), удовлетворительную шлакоустойчивость, высокую температуру начала деформации под нагрузкой, постоянство объема при нагревании и удовлетворительную термостойкость.

В высокотемпературных нагревательных печах форстеритовые изделия в виде кирпича нормальных размеров ( $230 \times 113 \times 65$ ) можно применять для кладки стен рабочих камер и топок.

✓ **Хромомагнезитовые изделия** содержат 46—30%  $Cr_2O_3$  и 30—70% MgO. Основными компонентами шихты, из которой изготавливают хромомагнезитовые изделия, являются магнезитовый порошок и измельченный хромит.

Изделия характеризуются высокой огнеупорностью ( $1800—1900^\circ$ ), высокой температурой начала деформации под нагрузкой  $\sim 0,2 \text{ Мн/м}^2$ , незначительной усадкой и постоянством объема, более высокой термостойкостью по сравнению с обычными магнезитовыми изделиями и хорошей шлакоустойчивостью.

Кроме обычных хромомагнезитовых изделий огнеупорная промышленность выпускает изделия с повышенной термостойкостью, называемые термостойкими магнезитохромитовыми огнеупорами.

При производстве термостойких магнезитохромитовых изделий применяют шихты, содержащие 55—65% магнезитового порошка, до 35% хромита и в некоторых случаях 4—6% железной руды. Изделия изготавливают обжиговые и безобжиговые.

В нагревательных печах обычные хромомагнезитовые изделия можно применять для футеровки топочных камер, кладки стен, футеровки подин, а термостойкие магнезитохромитовые — для кладки сводов высокотемпературных печей скоростного нагрева металла.

**Углеродистые изделия.** Графитовые изделия получают из графита, шамота и огнеупорной глины. Коксовые — из кокса, термоантрацита, прокаленных без доступа воздуха при  $1350—1400^\circ \text{C}$ .

Графитовые и углеродистые изделия могут работать при температуре до  $1700^\circ \text{C}$ , обладают хорошей термической стойкостью и удовлетворительной сопротивляемостью к основным и кислым шлакам. Графитовые изделия применяют главным образом в литейном деле.

✓ **Карборундовые изделия** получают из размельченного карбида кремния SiC (карборунда) на связке из глины, ферросилиция, кварца и т. п. Они обладают повышенной прочностью и твердостью, очень хорошо выдерживают колебания температур, имеют высокую огнеупорность и высокую температуру начала деформации под нагрузкой — выше  $1700^\circ$ , обладают повышенной теплопроводностью и электропроводностью.

Карборундовые изделия применяются для изготовления муфельных нагревательных печей, изготовления высокотемпературных рекуператоров и нагревательных элементов высокотемпературных электрических печей сопротивления.

**Тальковые изделия** изготавливаются из тальковых пород, огнеупорной основой которых является водный силикат магния ( $3MgO \cdot 4SiO_2 \cdot H_2O$ ).

Тальковые естественные изделия обладают огнеупорностью  $1500—1550^\circ$ , малым постоянством объема при нагревании и хорошей химической стойкостью по отношению к окислам железа и железистым шлакам, а также к воздействию печной атмосферы.

Тальковые изделия в виде выпиленного кирпича из талька (породы) и фасонных изделий применяют для футеровки (выстилки) подов нагревательных печей, работающих при температуре  $1300—1350^\circ \text{C}$ .

**Легковесные огнеупоры** выпускает огнеупорная промышленность в виде шамотных легковесных изделий с плотностью от 400 до  $1300 \text{ кг/м}^3$ , высокоглиноземистых и динасовых легковесных изделий.

Основное назначение легковесных огнеупоров — уменьшение расхода тепла на разогрев кладки периодически работающих печей. Кроме того, их можно использовать в качестве высокотемпературных теплоизоляционных материалов.

Наиболее часто употребляемые для печей легковесные шамотные изделия в зависимости от способа получения разделяют на легковесные, пеношамотные и ультралегковесные.

Легковесные изделия получают путем добавки в исходную шихту от 24 до 45% выгорающих примесей (древесных опилок, измельченного древесного угля и т. д.).

По способу получения выгорающих примесей получают легковесные шамотные изделия с плотностью  $1000—1300 \text{ кг/м}^3$ , временным сопротивлением сжатию  $\sim 5—10 \text{ Мн/м}^2$ , с температурой

начала деформации  $1100^{\circ}\text{C}$  и с коэффициентом теплопроводности  $0,232\text{—}0,349 \text{ вт/м}\cdot\text{град}$ .

Вследствие высокой пористости и газопроницаемости легковесные шамотные изделия обладают плохой химической стойкостью, дополнительной усадкой и значительной истираемостью при механическом воздействии.

Пеношамотные изделия получают путем добавки в исходную шихту эмульсии из канифоли и мыла и последующего обжига сырца. Они имеют объемную массу  $700\text{—}800 \text{ кг/м}^3$ .

Ультралегковесные шамотные изделия получают химическим методом: вводят в шихту доломит или известняк, способный во время изготовления изделий выделять углекислый газ и образовывать пузырчатую структуру. Они имеют объемную массу  $300\text{—}500 \text{ кг/м}^3$ , малую теплопроводность и применяются в печах главным образом как теплоизоляционный материал.

Легковесные огнеупоры применяют для кладки стен низкотемпературных и среднетемпературных печей, работающих периодически, а также для футеровки заслонок и в качестве теплоизоляции высокотемпературных печей.

**Прочие огнеупорные изделия** составляют группу, к которой относятся цирконистые, карбидные и нитридные огнеупоры. Все они характеризуются весьма высокой огнеупорностью (до  $2600^{\circ}\text{C}$ ) и высокой химической стойкостью. Сырьем для производства цирконистых изделий является двуокись циркония  $\text{ZrO}_2$  или силикат циркония  $\text{ZrSiO}_4$ . Карбидные и нитридные изделия получают из карбидов и нитридов тугоплавких металлов.

В настоящее время цирконистые, карбидные и нитридные огнеупоры применяют в лабораторных условиях или в печах, требующих весьма высоких температур.

✓ **Огнеупорные бетоны** получают из высокоглиноземистого цемента, глиноземистого гидравлически твердеющего цемента, портландцемента с тонкомолотыми добавками глины, шамота, кварца и жидкого стекла с добавками кремнефтористого натрия.

В качестве заполнителей при изготовлении огнеупорных бетонов служат различные измельченные огнеупоры. Для бетонов, работающих при температуре  $900\text{—}1300^{\circ}\text{C}$ , применяют шамот и полуокислые огнеупоры, а для бетонов, выдерживающих  $1300\text{—}1500^{\circ}\text{C}$ , — хромит или хромомагнезит.

Шамотные бетоны содержат  $15\text{—}20\%$  глиноземистого цемента и  $80\text{—}85\%$  шамотного порошка определенных фракций. Фракции: зерно крупностью до  $1 \text{ мм}$  —  $60\%$ ,  $10\text{—}20 \text{ мм}$  —  $25\%$ ,  $40\text{—}60 \text{ мм}$  —  $15\%$ .

Хромитовые глиноземистые бетоны готовят из глиноземистого цемента ( $7\text{—}15\%$ ) и хромитового измельченного порошка ( $93\text{—}85\%$ ). Фракции хромита: зерна крупностью до  $0,5 \text{ мм}$  —  $35\text{—}45\%$ ,  $0,5\text{—}5 \text{ мм}$  —  $65\text{—}55\%$ .

При изготовлении огнеупорных бетонов выполняют следующие операции: готовят сырой бетон в бетономешалках, смешивая цемент, заполнитель и воду, заполняют форму (опалубку) сырым бетоном, выдерживают бетон в формах в течение  $5\text{—}14$  суток, сушат при температуре  $110^{\circ}\text{C}$  в течение  $2\text{—}3$  суток и обжигают при температуре  $1300\text{—}1350^{\circ}\text{C}$  с постепенным подъемом температуры до  $600^{\circ}\text{C}$  (по  $30\text{—}35^{\circ}\text{C}$  в час) и выше  $600^{\circ}\text{C}$  со скоростью не более  $80\text{—}100^{\circ}\text{C}$ .

Сушка и обжиг изделий могут производиться при сооружении крупных элементов печей в период их разогрева и подготовки к пуску. Огнеупорные бетоны широко применяют при сооружении низкотемпературных и среднетемпературных печей, работающих при  $600\text{—}1000^{\circ}\text{C}$ .

**Набивные огнеупорные массы** изготовляют из различных огнеупорных порошков: кварца, шамота, магнезита, хромита, кокса на связке из огнеупорной глины, обезвоженной каменноугольной смоле, жидком стекле и органическом клее.

Каменноугольную смолу вводят от  $5$  до  $10\%$  от веса порошка. Массу готовят в специальных обогреваемых смесителях. Набивные массы на жидком стекле и органическом клее составляют в обычных смесителях, добавляя огнеупорную глину ( $5\text{—}15\%$ ) и жидкое стекло или клей ( $2\text{—}5\%$ ). Влажность готовой смеси составляет  $5\text{—}8\%$ . Массу набивают вручную, трамбовками или специальными торкретирующими машинами (устройствами). Набивные массы применяют для изготовления амбразур горелок, для футеровки стен печей и т. д.

**Огнеупорные обмазки** применяют для защиты поверхности огнеупорных футеровок от вредного действия печной среды, а также для снижения газопроницаемости кладки. Нанесение циркониевых обмазок на футеровку (кладку) из обычных огнеупоров может привести к значительному повышению срока службы огнеупоров в кладке.

Для приготовления огнеупорных обмазок применяют огнеупорные порошки и различные связующие вещества, жидкое стекло, органический клей и т. д. (табл. 50).

✓ **Огнеупорные растворы** (мертели) являются полужидкими массами, применяемыми при строительстве или ремонте печей для заполнения промежутков между кирпичами (табл. 51). Огнеупорность раствора должна быть близкой к огнеупорности изделий, из которых выполняют кладку.

Таблица 50

## Огнеупорные обмазки, применяемые для нагревательных печей

Наименование массы или обмазки	Составные части	Содержание по объему, %	Применение
Шамотная Ш-800-1000	1. Шамотный порошок из боя кирпича	88,0	Для обмазки шамотной футеровки (кладки) печей, работающих при температуре 800—1000°С Толщина слоя обмазки 2—4 мм
	2. Огнеупорная глина молотая	12	
	3. Жидкое стекло (от объема сухой массы)	3	
Шамотная Ш-1100-1400	1. Шамотный порошок из боя кирпича класса А	91	Для обмазки футеровки печей, работающих при 1100—1400°С
	2. Глина огнеупорная молотая	9	
	3. Жидкое стекло (от объема сухой массы)	2	
Кварцекаолиновая КК-110-1400	1. Песок кварцевый с содержанием SiO <sub>2</sub> не менее 95%	70	То же
	2. Каолин	19	
	3. Глина огнеупорная молотая	11	
Хромитовая Х-1400-1500	1. Хромит Саранского месторождения с содержанием Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> не менее 35%	88	Для обмазки футеровки печей, работающих при 1400—1500°С Толщина слоя обмазки — 2—4 мм
	2. Глина огнеупорная молотая	12	
	3. Сульфитный шлох с удельным весом 1,2 (от объема сухой массы)	7	

Таблица 51

## Составы растворов, наиболее часто применяемых при кладке печей

Наименование раствора	Состав сухой массы по объему, %	Крупность помола, мм	Количество воды на 1 м <sup>3</sup> сухой смеси, л	Применение
Шамотный густой	Шамотный порошок—60—70 Огнеупорная глина — 40—30	До 3	400	Для грубой шамотной и полукислой кладки со швами шириной 3—5 мм
Шамотный полугустой	То же	До 3	500	Для обыкновенной кладки из шамота и полукислых огнеупоров со швами шириной 2—3 мм
Шамотный жидкий	Шамотный порошок—70—80 Огнеупорная глина — 30—20	До 1	600	Для тщательной шамотной или полукислой кладки со швами шириной 2—3 мм
Динасовый полугустой	Динасовый порошок или кварцевый песок — 85—90 Огнеупорная глина — 15—10	До 2,1	500	Для обыкновенной динасовой кладки
Динасовый жидкий	То же	До 2	600	Для тщательной динасовой кладки
Хромомагнезитовый или магнезитовый	Хромомагнезитовый или магнезитовый порошок — 85—90 Каменноугольная смола — 15—10	0—1	—	Для хромомагнезитовой и магнезитовой кладки
Трепельный раствор	Трепел — 80 Известь — 10 Цемент — 10	1—5	40	Для теплоизоляционной кладки и обмазки

## 5. Сравнительная стоимость огнеупоров

При сооружении и эксплуатации нагревательных и других печей необходимо учитывать стоимость огнеупоров, так как затраты, связанные с их применением, влияют на себестоимость продукции. Ниже приведена относительная стоимость различных огнеупоров по сравнению со стоимостью динаса, принятой за единицу:

Динасовые изделия — 1,0

Шамотные — 0,8—1,2

Высокоглиноземистые — 1,6—3,1

Магнезитовые — 1,5

Форстеритовые — 1,4

Хромомагнезитовые  
рядовые — 1,0

Хромомагнезитовые  
термостойкие — 1,2—  
1,4

Графитовые — 4,5—6,0

Карборундовые — 37,0

Циркониевые — 50,0

## § 52. ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Теплоизоляционные материалы плохо проводят тепло, обладают незначительным объемным весом и применяются для уменьшения потерь тепла во внешнюю среду непрерывно работающих печами.

Они могут быть естественные и искусственные. К естественным материалам относятся диатомит, инфузорная земля, трепел и асбест. Искусственными теплоизоляционными материалами являются шлаковая вата и легковесные изделия, изготовляемые из шамотных, динасовых и других масс в смеси с различными веществами, которые в результате обжига делают изделия очень пористыми.

Термоизоляционные материалы можно применять в виде штучных изделий, засыпных материалов и мастичных масс. Основные свойства теплоизоляционных материалов и их применение указаны в табл. 52.

## § 53. ОБЩЕСТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ЖАРОСТОЙКИЕ СПЛАВЫ

К общестроительным материалам, применяемым для строительства печей, относятся черные и цветные металлы, строительный кирпич, бутовый камень, песок, гравий и т. д.

Таблица 52

Основные свойства теплоизоляционных материалов и изделий

Материалы и изделия	Объемная масса, кг/м³		Коэффициент теплопроводности ( $\lambda$ ), вт/м·град	Максимальная температура применения, °С	Применение
	в порошке	в изделиях			
<b>Материалы</b>					
Асбестовая мелочь шестого сорта (ОСТ 12928—39) . . . . .	650—850	—	0,0233+0,000186t	500	Для изоляции горячих поверхностей (чаще трубопроводов) мастичными материалами
Асбозурит . . . . .	450	—	0,16224+0,0001686 t	300	То же
Диатомит в порошке . . . . .	300—500	—	0,0907+0,00028 t	800—900	В качестве засыпной изоляции в печах различного типа
Трепел в порошке . . . . .	500	—	0,1046 при t = 50°	900	То же
Зонолит (вермикулит) . . . . .	0,150—0,250	—	0,0721+0,000262 t	900—1000	»
Минеральная вата . . . . .	180—250	—	0,0465—0,058 при t=50°	500	В качестве засыпной изоляции для низкотемпературных печей
Шлаковая вата . . . . .	200—250	—	0,058+0,000162 t	750	То же
Совелит . . . . .	230—250	—	0,0901+0,0000872 t	500	»
<b>Изделия</b>					
Диатомовый кирпич (ГОСТ 2694—52) . . . . .	—	550—750	0,1128+0,00023 t	800—900	Для кладки наружного изоляционного слоя стен и сводов печей



Материалы и изделия	Объемная масса, кг/м <sup>3</sup>		Коэффициент теплопроводности ( $\lambda$ ), вт/м·град	Максимальная температура применения, °C	Применение
	в порошке	в изделиях			
Кирпич легковесный шамотный (ГОСТ 5040—58) . . . . .	—	900—1300	0,605 при $t=100^\circ$ 0,756 при $t=1200^\circ$	1000—1200	Для кладки стен и сводов печей с рабочей температурой до 1100°С и для изоляции стен и сводов высокотемпературных печей
Кирпич пеношамотный	—	600—800	0,128—0,186 при $t=100^\circ\text{C}$	1000—1100	Для изоляции стен и сводов высокотемпературных печей и для кладки стен низкотемпературных печей
Вермикулитовые плиты	—	300—380	0,0198+0,000151 $t$	660—750	Для изоляции стен и сводов печей
Совелитовые плиты . . . . .	—	400—450	0,079+0,000186 $t$	450—500	Для изоляции стен и сводов низкотемпературных печей
Вулканитовые плиты	—	400	0,0802+0,000209 $t$	700—750	Для изоляции стен и сводов печей
Асбестоцементные плиты . . . . .	—	400	0,0988 при $t=100^\circ\text{C}$	—	То же

Таблица 53

## Жароупорные сплавы для деталей печей

Название и марка сплава	Химический состав, %					Применение
	Углерод	Кремний	Марганец	Хром	Никель	Прочие элементы
Хромистый ЖЧХ-09	2,8—3,4	1,5—2,5	1,0	0,7—1,1	—	—
Хромистый ЖЧХ-1,5	2,8—3,4	1,7—2,7	1,0	1,2—1,9	—	—
Хромистый ЖЧХ-2,5	3,0—3,5	2,8—3,8	1,0	2,0—2,7	—	—
Никельмеднохромистый чугун ЖЧНДХ-15-7-2	2,5—3,0	1,5—3,0	0,5—1,2	1,5—2,5	14—17	Si=6÷8,5 Mg≥0,08
Кремнистый чугун с шаровидным графитом ЖЧСШ 5,5-01	2,4—3,0	5,0—6,0	0,7	0—0,2	—	—
Сталь Х25ТЛ	0,2	0,7	0,6	23—27	0,6	Ti=0,4÷0,8
Сталь 1Х18Н9ТЛ	0,14	1,0	1,0—2,0	17—20	8—11	Ti≤0,8

Для шиберов, колосников и других печных деталей, работающих при температуре до 600°С

То же при температуре до 650°С

То же при температуре до 700°С

То же при температуре до 850°С

То же при температуре 950—1000°С

Для печной арматуры

Для деталей печной арматуры, нагреваемых до 900°С

Название и марка сплава	Химический состав, %					Применение
	Углерод	Кремний	Марганец	Хром	Никель	Прочие элементы
Сталь X9C2Л	0,35—0,5	2,0—3,0	0,7	8—10	0,6	—
Сталь X24H12CЛ	0,4	0,5—1,5	0,3—0,8	22—26	11—13	—
Сталь X18H24C2Л	0,3—0,4	2,0—3,0	1,5	17—20	23—25	—
Сталь X25H2Л	0,4—0,6	1,0—2,0	0,4—0,7	24—27	1,5—2,0	—
Сталь X25H12Л	0,4—0,6	1,0—1,5	0,2—0,5	24—27	12—13	—

Для печной арматуры, нагреваемой до 700° С

Для деталей, работающих при высоких температурах и давлениях

Для деталей печей, работающих при высоких температурах и нагрузках (печные конвейеры, подвой болт и т. д.)

Для деталей, работающих при температурах до 1100° С и испытывающих ударную нагрузку

То же

Черные металлы в виде сортового и листового стального проката применяются для изготовления каркасов, пятых баб, опорных колонок, кожухов, рабочих площадок, водоохлаждаемых деталей, воздухоподогревателей и других конструктивных узлов печей и относящихся к ним устройств.

Из стали и чугуна отливают многие детали печей: рамы, дверцы, горелочные плиты, шиберы и т. п.

Бутовый камень используют при устройстве фундаментов печей. Из строительного кирпича выполняют части печей, не подвергающиеся воздействию высоких температур. Детали печей, работающие при высоких температурах и подвергающиеся большим механическим воздействиям (устройства для перемещения материалов в печах, муфели, детали рекуператоров и т. д.), изготавливают из жароупорных сплавов — хромистых и хромоникелевых сталей и специальных легированных чугунов (табл. 53).

## ЭЛЕМЕНТЫ КОНСТРУКЦИЙ И КЛАДКА ПЕЧЕЙ

## § 54. ФУНДАМЕНТЫ ПЕЧЕЙ

Фундамент служит опорой всей печи и передает на грунт статическую нагрузку, состоящую из веса кладки, металлических конструкций и нагреваемых изделий, а также воспринимает возможные динамические нагрузки.

Расчет фундаментов для печей ведут по методике и нормам, применяемым при проектировании строительных сооружений.

Фундаменты печей выполняют обычно из бетона, железобетона, красного строительного кирпича и бутового камня. Применяют бетоны марок 100, 110 и др. Фундаменты могут быть в виде сплошной подушки (плиты), параллельных узких плит (лент) и отдельных столбов (рис. 110). При высоком уровне грунтовых вод фундаменты печей и дымоходов выполняют в виде бетонных или железобетонных кессонов (коробок) с хорошей гидроизоляцией (см. рис. 110).

## § 55. МЕТАЛЛИЧЕСКИЙ КАРКАС ПЕЧИ

Для скрепления кладки печи, а также восприятия усилий, возникающих в ней (в частности, от сил распора свода), и передачи их на фундамент, служит металлический каркас. Кроме того, каркас используется для монтажа рам, заслонок, механизмов подъема заслонок, топочных дверей, горелок, форсунок и других деталей арматуры и гарнитуры печи, а иногда и для подвески свода печи.

Конструкция каркаса определяется типом и конструкцией кладки печи. Основными элементами каркаса являются стойки (колонки) из различного проката (из швеллеров, уголков, дву-

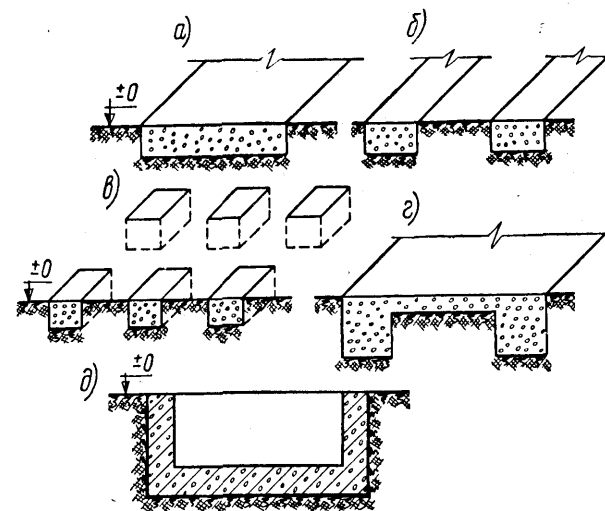


Рис. 110. Фундаменты нагревательных печей:

а — сплошная плита (подушка); б — узкие плиты (ленты); в — отдельные столбы; г — плита с утолщением для стоек; д — кессон

тавров, рельс и т. д.), стянутые продольными и поперечными тягами, продольные и поперечные балки из швеллеров или уголков (одну из продольных балок располагают обязательно против пяты свода), кожух из листовой стали и режее из чугуновых плит (рис. 111—113).

Каркасы небольших печей можно выполнять в виде сплошных кожухов из листовой стали, усиленных прокатными профилями (рис. 111, в).

В зависимости от особенностей восприятия усилий, возникающих в результате температурных расширений кладки, каркасы делятся на жесткие и подвижные. При жестких каркасах расширения кладки направляются в сторону швов, при подвижных они компенсируются (частично) пружинами, устанавливаемыми между тягами и вертикальными стойками, или ослаблением натяжения гаек на тягах при разогреве печи.

Жесткие каркасы обычно устраивают следующим образом: низ стойки укрепляют в фундаменте, а верх скрепляют не круглой тягой, а уголком или швеллером (рис. 111, а).

Расчет элементов каркаса сложен и неточен, так как трудно правильно определить силы, возникающие в результате температурных расширений кладки.

При выборе некоторых размеров элементов каркаса можно пользоваться следующими соотношениями.

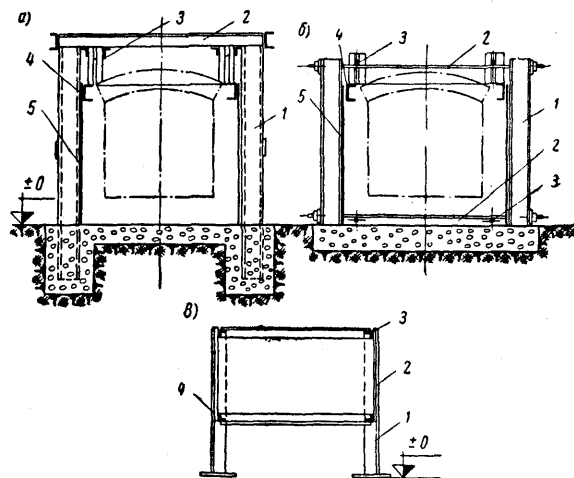


Рис. 111. Каркасы (металлоконструкции) нагревательных печей:

а — жесткий сварной: 1 — стойка; 2 — поперечная балка; 3 — продольная балка; 4 — пятая балка; 5 — кожух из листовой стали;  
 б — нежесткий каркас: 1 — стойка; 2 — поперечные тяги (связи); 3 — продольные тяги; 4 — пятая балка; 5 — кожух из листовой стали;  
 в — сварной каркас малой переносной печи: 1 — стойка; 2 — кожух из листовой стали; 3 и 4 — продольные и поперечные угольники жесткости

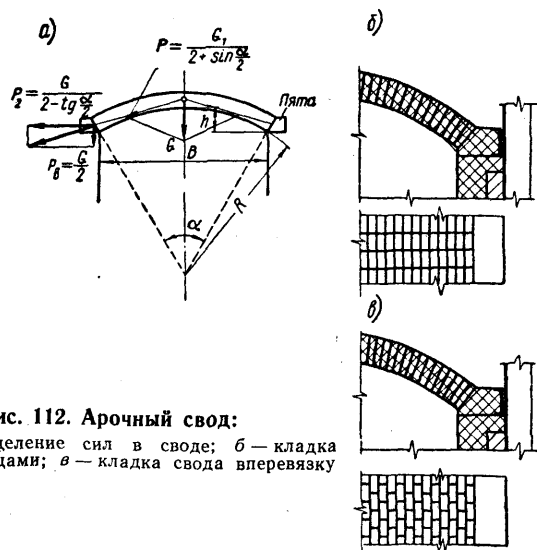


Рис. 112. Арочный свод:

а — распределение сил в своде; б — кладка свода кольцами; в — кладка свода вперевязку

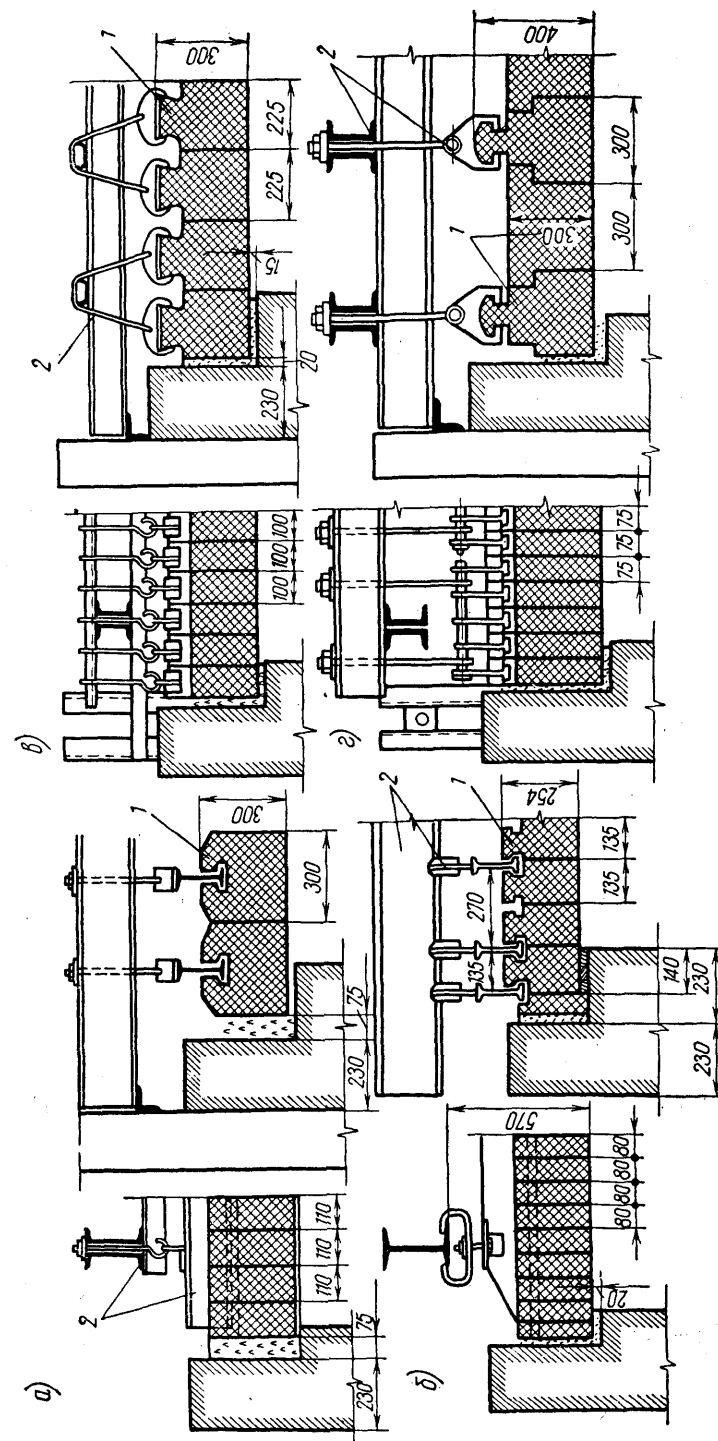


Рис. 113. Подвесные своды:

а и б — своды с секционным креплением фасонных кирпичей; в — свод с индивидуальным креплением фасонных кирпичей; г — полуподвесной свод; 1 — фасонные кирпичи; 2 — металлические конструкции для подвески кирпичей

Высота профиля стойки  $h = 1/16 l$ , где  $l$  — расстояние между верхней и нижней тягами.

Диаметр тяги  $d$  связан с высотой профиля  $h$  следующим соотношением:

$h$ , мм	100	120	160	200	300
$d$ , мм	20	22	25	30	45

## § 56. КЛАДКА ПЕЧЕЙ

Кладка нагревательных печей подвергается воздействию высоких температур, которые могут изменяться во времени. Кроме того, некоторые части кладки могут подвергаться разъедающему действию шлаков и летучей золы. Износ кладки определяет обычно продолжительность кампании печей и поэтому оказывает большое влияние на технико-экономические показатели их работы. Высокой стойкости кладки достигают в результате правильного выбора конструкции элементов кладки, рационального применения различных видов огнеупоров, выполнения кладки высокого качества, а также в результате строгого соблюдения правил эксплуатации печей. Категории кладок печей различают по толщине швов и применяемому раствору (табл. 54).

Таблица 54

Категории кладки нагревательных печей

Категория	Вид кладки	Раствор	Толщина шва, мм	Область применения
I	Особенно тщательная	Жидкий	1	Для печей безокислительного нагрева
II	Тщательная	То же	1—2	То же и для печей скоростного нагрева
III	Обыкновенная огнеупорная	Полугустой	3	Для обычных нагревательных печей
IV	Простая огнеупорная	То же	4	Для кладки неответственных частей печей
V	То же	Густой	5	Для кладки наружных изоляционных слоев
VI	» »	То же	8—10	То же

Основными элементами кладки нагревательных печей являются стены, своды, подины, дымоходы и различные отверстия.

## 1. Стены

Стены нагревательных печей обычно имеют внутренние рабочие (огнеупорные) слои и наружные теплоизоляционные. Чаще встречаются прямые вертикальные стены, реже — наклонные и радиальные. Толщина стен и отдельных слоев связана с температурным режимом и размерами самой стены.

Данные, которыми можно руководствоваться при выборе конструкции кладки стен, приведены в табл. 55.

Таблица 55

Рекомендуемые конструкции и размеры кладки

Высота стены, м	Температура в рабочей камере, °C	Рабочий огнеупорный слой		Наружный изоляционный слой	
		Материал	Толщина	Материал	Толщина
До 1	≤1200	Шамот, класс Б	1/2 кирпича—115 мм	Диатомит или пеношамот	1 кирпич — 230 мм
До 1	>1200	То же	1 кирпич — 230 мм	То же	1/2—1 кирпич — 115—230 мм
Более 1	≤1200	„	1 кирпич — 230 мм	„	1 кирпич — 230 мм
Более 1	>1200	Шамот, класс А	1—1 1/2 кирпича 230—350 мм	„	1/2—1 кирпич 115—230 мм

Примечание. Для периодически работающих печей с температурой до 1000°С рабочий слой может быть выполнен из легковесного шамота.

Для защиты кладки от механических воздействий и устранения фильтрации газов рекомендуется применять наружный кожух из листовой стали толщиной 4—10 мм.

## 2. Сводь

Рабочее пространство печи сверху перекрывают сводом. По конструкции своды бывают плоские, арочные, полуциркульные и подвесные (частично или полностью). Для нагревательных печей чаще всего применяют арочные своды.

Плоские своды выполняют из специальных шамотных плит и применяются для небольших печей, работающих при температурах до 1000°С.

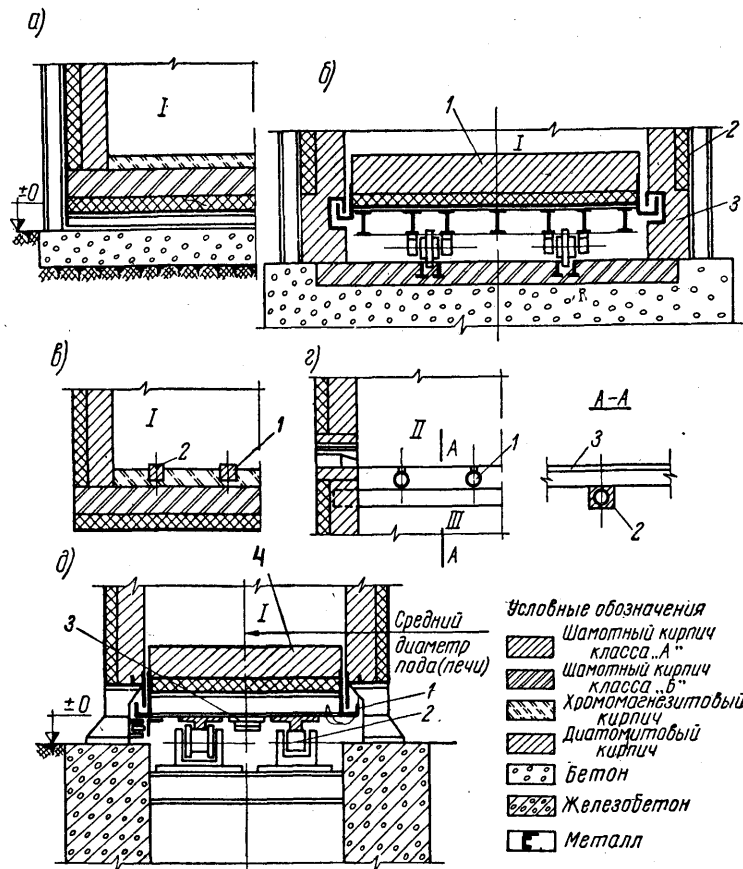


Рис. 114. Поды нагревательных печей:

а — под стационарной камерной печи;  
 б — выдвигной под: 1 — выдвигная подина; 2 — песочный затвор; 3 — ролик;  
 в — под методической печи со стальными глissажными шинами: 1 и 2 — стальные не-  
 охлаждаемые бруссы;  
 г — под методической печи с двухсторонним обогревом: 1 — водоохлаждаемая труба; 2 —  
 опорный водоохлаждаемый квадрат; 3 — стальной прут, приваренный к трубе;  
 д — кольцевой под карусельной печи: 1 — песочный затвор; 2 — опорный ролик; 3 — коль-  
 цевая шестерня; 4 — кольцевая подина; I — рабочая камера; II — верхняя камера;  
 III — нижняя камера

Арочный свод в разрезе представляет собой арку с постоянным радиусом кривизны. Арочные своды просты по конструкции и надежны в эксплуатации, но требуют обязательного применения каркаса для восприятия горизонтальной силы, распирающей стенки печи (рис. 119, а).

Параметрами, характеризующими арочный свод, являются: радиус внутренней дуги свода ( $R$ ), ширина пролета ( $B$ ), цент-

ральный угол ( $\alpha$ ) и стрела подъема свода ( $h$ ). Обычно радиус свода  $R$  принимают равным ширине пролета  $B$  или немного меньше. Тогда стрела  $h$  составляет 12—18% от ширины пролета  $B$ . Свод опирается на стены в местах, которые называются пятами. Пяты рекомендуется делать из специального кирпича и только на небольших печах допускается применять обычный тесаный кирпич.

Из рис. 119, а видно, что теоретически на пяту симметричного свода действуют две силы:

$$\text{вертикальная } P_{\text{верт}} = \frac{G}{2} \text{ [н/м]}$$

и горизонтальная

$$P_{\text{гор}} = \frac{G}{2} \cdot \frac{1}{\text{tg } \frac{\alpha}{2}} \text{ [н/м]}, \quad (403)$$

где  $G$  — вес 1 м свода, н.

В действительности за счет расширения свода при нагревании эти силы будут больше и  $P_{\text{гор}}$  примерно можно определять по формуле

$$P_{\text{гор}} = k \frac{GB}{8h} \text{ [н/м]}, \quad (404)$$

где коэффициент  $k$  в зависимости от температуры равен:

$t_{\text{печи}}$	800	900	1000	1300
$k$	1,5	2	2,5	3

Кладку арочных сводов выполняют из прямого и клинового кирпича (расход последнего составляет 50—80% от общего). При этом известны два способа кладки: в перевязку и кольцами (рис. 119, б и в). В нагревательных печах чаще делают своды в перевязку. Однако обладая хорошей плотностью, такие своды затрудняют расширение кладки при нагреве. Поэтому их надо выполнять особенно тщательно, устраивая необходимые температурные швы. Для сводов, так же как и для стен печи, температурные швы следует выполнять, исходя из следующего расчета: в случае кладки из шамота 5—6 мм на 1 м кладки; из динаса — 10—12 мм; из магнезита — 8—10 мм.

Для уменьшения потерь тепла своды хорошо теплоизолируют. В печах безокислительного нагрева, а также в термических печах, работающих с защитными атмосферами, своды покрывают уплотнительной обмазкой или листовой сталью.

Толщину свода принимают в зависимости от ширины пролета (табл. 56).

Таблица 56

## Изменение толщины свода

Толщина свода, мм	Ширина пролета, м		
	До 1 м	От 1 до 3,5 м	Более 3,5 м
Толщина огнеупорного слоя . . .	115—250	230—250	230—300
Толщина изоляционного слоя . . .	65—120	65—250	120—250

Материалом для сводов нагревательных печей обычно служит шамотный кирпич класса Б при температурах печи до 1000°С и кирпича класса А при более высоких температурах. Иногда для сводов, работающих непрерывно при температурах выше 1250—1300°С, применяют диас или высокоглиноземистый кирпич. В качестве теплоизоляции используют диатомовый и пеношамотный кирпич, а также различные засыпки: кизельгур, вермикулит, шлаковую вату и другие материалы.

**Полуциркульные своды** — своды, у которых угол  $\alpha = 180^\circ$  ( $R = \frac{B}{2}$ ), характеризующиеся отсутствием горизонтальной силы  $P_{гор}$ . Практически такие своды устраивают редко, так как они создают большое подсводное пространство и при разогреве для них характерно большое раскрытие швов.

Подвесные своды применяют при больших пролетах (более 4,0—4,5 м), когда силы распора  $P_{гор}$  достигают очень больших величин. Их выполняют из специальных фасонных кирпичей, которые частично или полностью подвешивают с помощью металлических подвесок к балкам, расположенным над печью (рис. 113). Перекрытие при этом получается плоское.

**Подиной, или подом печи** называют нижнюю часть рабочего пространства, на которой располагают нагреваемый материал. Под является ответственной частью печи: он испытывает усилия от веса нагреваемого металла, подвергается химическому воздействию окислы и шлаков, а также истиранию в случае перемещения по нему нагреваемых слитков или заготовок.

В крупных и средних печах поды непосредственно или через специальные конструкции опираются на фундамент, а в малых печах — часто на днища сварных каркасов, усиленных стальными балками разных профилей (рис. 114).

Толщина пода в зависимости от размеров рабочей камеры и температуры печи может колебаться в больших пределах — от 200—260 до 500—700 мм. При этом в нижней части пода кладут

теплоизоляционный слой из диатомового или пеношамотного кирпича. Верхний слой в нагревательных печах, работающих с температурой выше 1200—1250°С, выполняют из основных или нейтральных материалов, обладающих хорошей устойчивостью против воздействия железистых шлаков (против окиси железа), из талькового камня, хромомagneзита, магнезита в виде кирпича или в виде набивки. Основную же часть подины изготовляют обычно из шамота классов Б и В.

В термических печах с температурой до 1000°С и в печах безокислительного нагрева верхний слой пода может быть выполнен из шамотного кирпича класса А.

В печах с перемещением нагреваемого материала от мест загрузки к местам выдачи для уменьшения износа в кладку пода закладывают металлические бруссы, плиты или водоохлаждаемые трубы (так называемые глиссажные шины).

В механизированных печах устройство пода тесно связано с конструкцией устройств, используемых для механизации загрузки, выгрузки и движения материала в печи. К ним относятся печи с выдвижным подом, печи с шагающим подом, печи с вращающимся подом и др. (см. рис. 114).

### 3. Отверстия в печах, рамы, заслонки и механизмы подъема заслонок

В стенах, сводах, а иногда и подах печей устраивают отверстия для загрузки и выгрузки нагреваемого материала, отвода газов, установки горелок или форсунок, установки термпар и других приборов, для наблюдения за горением топлива и нагревом металла, спуска шлака и т. д.

Количество и размеры отверстий следует принимать, увязывая их с размерами нагреваемых слитков, заготовок или деталей, конструкцией печи и особенностью процесса нагрева. Необходимо стремиться к тому, чтобы количество отверстий и их размеры были как можно меньше.

Отверстия, через которые загружают и выгружают нагреваемый материал, называются рабочими окнами, а отверстия для наблюдения за процессами, происходящими в печи, — смотровыми окнами или гляделками.

Оконные отверстия обычно сверху перекрывают аркой, пята которой относят немного вглубь кладки. Иногда в высокотемпературных печах при большой ширине окна перекрытие его устраивают с применением прямых водоохлаждаемых балок. Для предотвращения разрушения кладки оконные отверстия с наружной стороны обрамляют рамами, которые крепят к каркасу

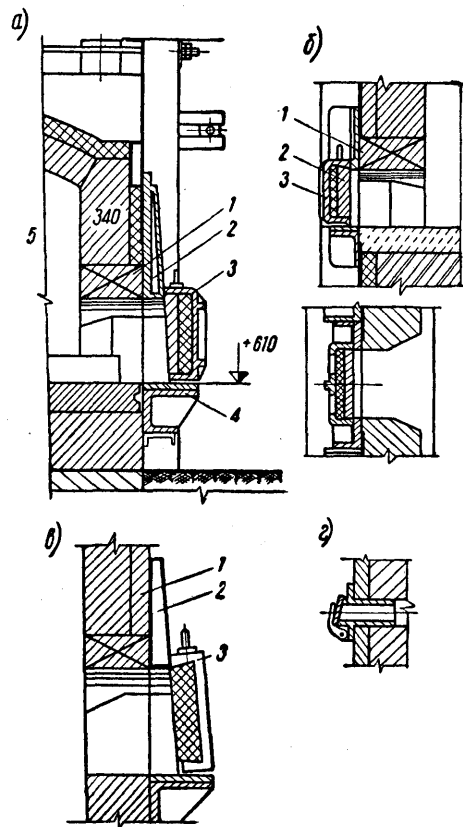


Рис. 115. Окна и заслонки (крышки) нагревательных печей:

а — окно выдачи методической печи: 1 — арка окна; 2 — водоохлаждаемая сварная верхняя часть рамы; 3 — литая футерованная заслонка; 4 — нижняя литая часть рамы; 5 — рабочая камера;

б — рабочее окно малой камерной печи: 1 — арка окна; 2 — литая чугунная рама; 3 — литая заслонка;

в — рабочее окно большой камерной печи: 1 — арка окна; 2 — водоохлаждаемая сварная рама; 3 — сварная водоохлаждаемая футерованная крышка;

г — смотровое окно печи

печи. Рамы делают обычно литыми, чугунными и реже сварными водоохлаждаемыми (рис. 115).

Проемы окон закрывают заслонками или дверцами, которые предотвращают потери тепла излучением и с выбивающимися газами, а также препятствуют подосу холодного воздуха в печь.

Заслонки должны плотно закрывать окна и иметь низкую теплопроводность при небольшом весе. Для этого размеры заслонки делают на 50—100 мм больше размеров окна. Заслонку футеруют легковесным шамотом и теплоизоляционным кирпичом. Корпус заслонки выполняют чаще литым — чугунным, реже — сварным водоохлаждаемым и, наконец, для очень крупных заслонок (ширина окна более 1,5—2 м) — сварной сборной из профильного проката. В целях уплотнения рекомендуется наружную поверхность рамы, по которой скользит заслонка, делать наклонной в сторону разливки и песочные затворы в нижней, а иногда и в верхней части заслонок. В печах безокислительного нагрева заслонки должны особенно плотно прилегать к рамам.

а над ними следует устраивать зонты с вытяжкой, так как в продуктах горения может быть некоторое количество СО.

Заслонки рабочих, а иногда и смотровых окон подвешивают

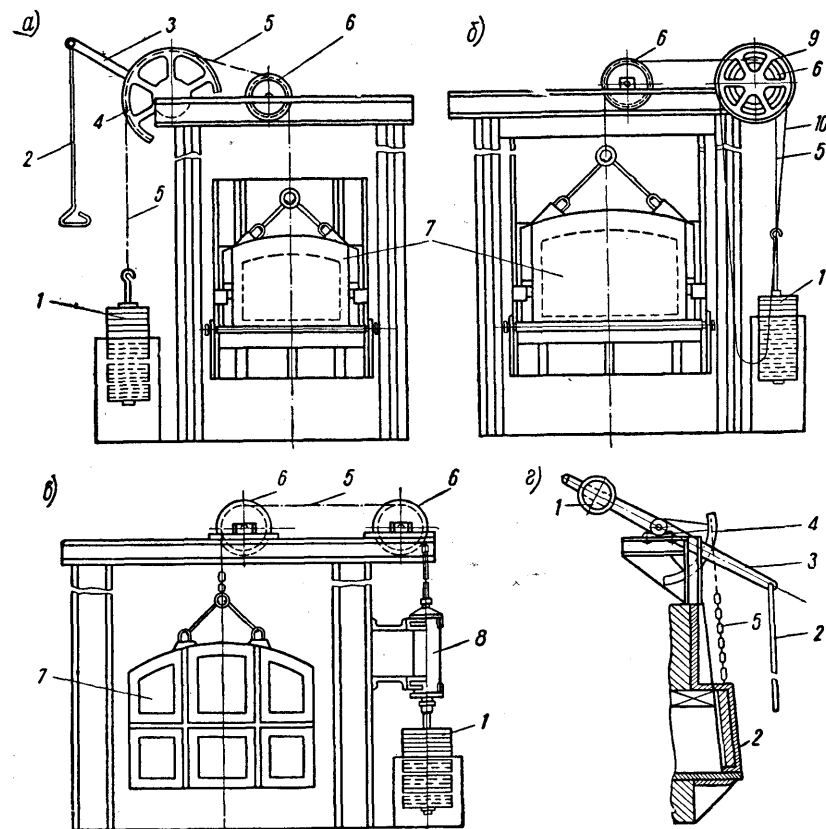


Рис. 116. Механизмы подъема заслонок:

а — ручной рычажный; б — ручной с бесконечной цепью; в — механизированный с пневматическим или гидравлическим цилиндром; г — ручной секторный; 1 — противовес; 2 — тяга для подъема; 3 — рычаг подъема; 4 — направляющий сектор; 5 — цепь или трос; 6 — направляющие блоки; 7 — заслонка; 8 — пневматический цилиндр; 9 — цепное колесо; 10 — бесконечная цепь

на тросах или цепях, перекинутых через блоки. Обычно они уравниваются грузами (противовесами), чтобы уменьшить усилия, требуемые для подъема заслонок. Для подъема и опускания заслонок применяют ручные (рычажные и цепные), а также механизированные (пневматические, гидравлические и электрические) устройства. На рис. 116 показаны основные применяемые схемы. Наиболее простыми и удобными из механизированных устройств являются пневматические. В печах с механическим движением нагреваемого материала работа подъемных механизмов заслонок синхронизируется с работой механизмов, служащих для загрузки, выгрузки и движения материала.



#### 4. Каналы и дымоходы

Для обеспечения нормальных условий движения газов каналы для отвода их из рабочего пространства печи располагают обычно в нижней части стен на уровне пода или немного выше (для того, чтобы в них не попадали окалина и шлак).

Площадь сечения отводящих каналов ( $F_k$ ) определяют по формуле (48) (см. гл. III), исходя из средней скорости газов в каналах  $w_0 = 0,5—1,5$  м/сек.

Количество и расположение отводящих каналов принимают сообразно с типом печи и конструкцией рабочего пространства. В малых камерных печах их располагают по передней линии со стороны рабочих окон, чтобы воздух, засосанный в окно, уходил в канал, а не попадал в рабочее пространство печи. В средних и больших камерных печах каналы обычно располагают равномерно по углам рабочей камеры, в методических, полуметодических и проходных печах — вблизи места загрузки.

Если газы отводят через дымовую трубу или дымосос, каналы направляют вниз и соединяют с дымоходами, располагаемыми обычно под землей. При отводе продуктов горения под зонт, установленный над печью, отводящие каналы направляются прямо вверх в стенках печи. Кладку отводных каналов выполняют обычно из шамотного кирпича классов Б и В.

Дымоходами, или боровами называют подземные каналы прямоугольного сечения, которые служат для отвода продуктов горения и связывают печи с дымовыми трубами и дымососными установками. В редких случаях дымоходы располагают на уровне и даже выше уровня пола цеха.

Площадь сечения дымоходов определяют по формуле (48), только среднюю скорость газов принимают при температуре продуктов горения в дымоходе  $600—1000^\circ\text{C}$  —  $w_0 = 1,0—2,0$  м/сек, а при температуре  $300—600^\circ\text{C}$  —  $w_0 = 2,0—2,5$  м/сек.

При определении секундного количества продуктов горения, протекающих по дымоходу, необходимо учитывать подсос воздуха через неплотности кладки, шибера, клапанов и т. д. Так как во время эксплуатации печей нужно обеспечить чистку дымоходов, то минимальное сечение их принимают обычно равным  $\sim 500 \times 600$  мм.

После выбора сечения каналов и дымоходов следует обязательно подсчитать сопротивление отдельных участков пути и общее сопротивление движению газов от рабочего пространства до дымовой трубы или дымососной установки и, если это потребуется, скорректировать сечения каналов и дымоходов.

Кладку дымоходов обычно выполняют в два слоя: внутренний — из шамота класса В и наружный — из красного строи-

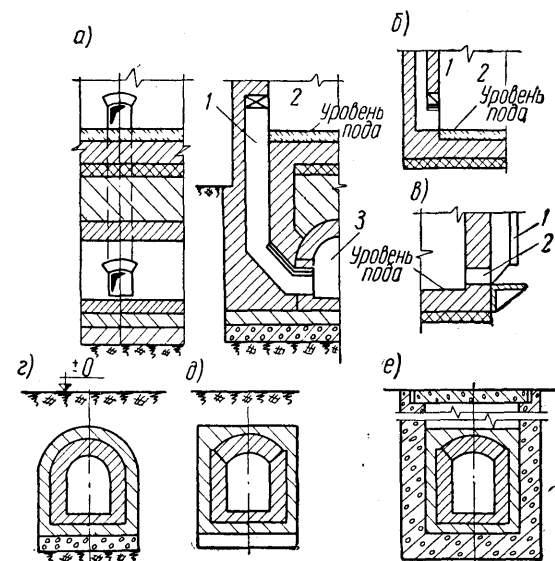


Рис. 117. Каналы и дымоходы для отвода дымовых газов:

- а — нижний канал: 1 — канал; 2 — рабочая камера; 3 — дымоход к трубе;
- б — верхний канал для отвода газов под зонт: 1 — канал; 2 — рабочая камера;
- в — устройство для отвода газов у щелевых печей: 1 — водоохлаждаемый щит; 2 — щелевидное окно;
- г — дымоход с полуциркульным сводом;
- д — дымоход с арочным сводом;
- е — дымоход в железобетонном кессоне

тельного кирпича. Под дымоходы устанавливают бутовые или бетонные подушки (фундаменты) толщиной 100—250 мм. При высоком уровне грунтовых вод дымоходы заключают в железобетонные кессоны, снабженные гидроизоляцией. Своды дымоходов делают чаще арочные и реже (при большой площади сечения и большой глубине залегания) — полуциркульные (рис. 117).

#### § 57. ДЫМОВЫЕ ШИБЕРЫ И ПЕРЕКИДНЫЕ УСТРОЙСТВА

Для поддержания необходимого давления в рабочей камере печи и регулирования отвода продуктов горения в дымоходах устанавливают заслонки — шиберы. Дымовые шиберы должны быть газоплотными, надежными и удобными в эксплу-

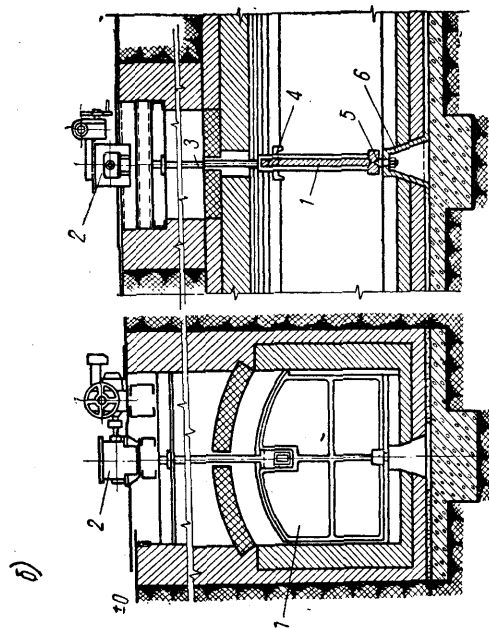
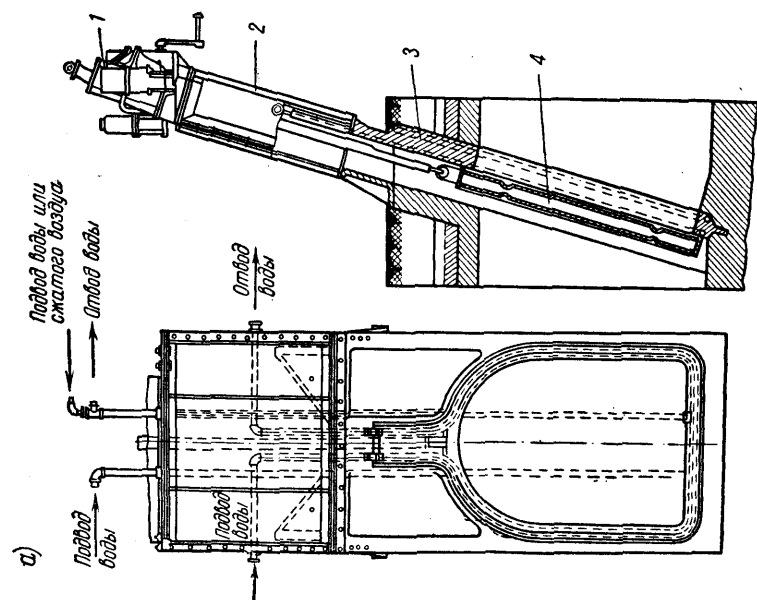


Рис. 118. Шиберы для регулирования тяги:

а — водоохлаждаемый шибер: 1 — механизм подъема и опускания; 2 — коробка шибера; 3 — чугунная водоохлаждаемая рама; 4 — водоохлаждаемая заслонка — шибер; б — поворотный шибер: 1 — шибер; 2 — механизм поворота; 3 — тяга; 4 — штырь; 5 — опора шибера; 6 — тумба

атации. В дымоходах, в которых температура газов выше 600—700° С, устанавливают обычно металлические водоохлаждаемые шиберы (рис. 118, а). При температуре продуктов горения ниже 600—700° С можно применять неохлаждаемые металлические шиберы, отлитые из чугуна или жароупорной стали. В настоящее время иногда применяют шиберы и в виде поворачивающихся дроссельных заслонок (рис. 118, б).

Для подъема и опускания или вращения вокруг вертикальной оси шиберы оборудуют специальными механизмами с ручным, гидравлическим, пневматическим или электрическим приводом.

Шиберами крупных нагревательных печей, снабженными механизированным приводом, управляют автоматическими регуляторами, поддерживающими в полости печи определенное заданное давление.

При использовании тепла отходящих газов в регенераторах печи следует оборудовать специальными перекидными устройствами, предназначенными для того, чтобы через регенеративную насадку периодически проходили продукты горения и воздух.

В печах, работающих на мазуте и высококалорийных газах, применяют по одной паре регенераторов и в дымоходах требуется только переключение воздуха.

В высокотемпературных печах, отапливаемых низкокалорийными газами и оборудованных двумя парами регенераторов, приходится производить перекидку воздуха и газа одновременно.

Перекидные устройства должны обеспечивать хорошую газоплотность и не вызывать больших потерь давления на пути движения воздуха и продуктов горения. Для нагревательных регенеративных печей чаще применяют шиберные системы перекидки с тарельчатыми воздушными клапанами (рис. 119). На том же рисунке показан другой тип воздушного клапана и газовый перекидной клапан.

## § 58. УСТРОЙСТВА ДЛЯ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ И ОТВОДА ГАЗОВ

Чтобы обеспечить движение продуктов горения и отвод их после отдачи тепла в рабочей камере и теплоиспользующих устройствах, применяют дымовую трубу, дымовые каналы и зонт с естественной или искусственной вентиляцией, дымососы прямого и косвенного действия, эжекторы.

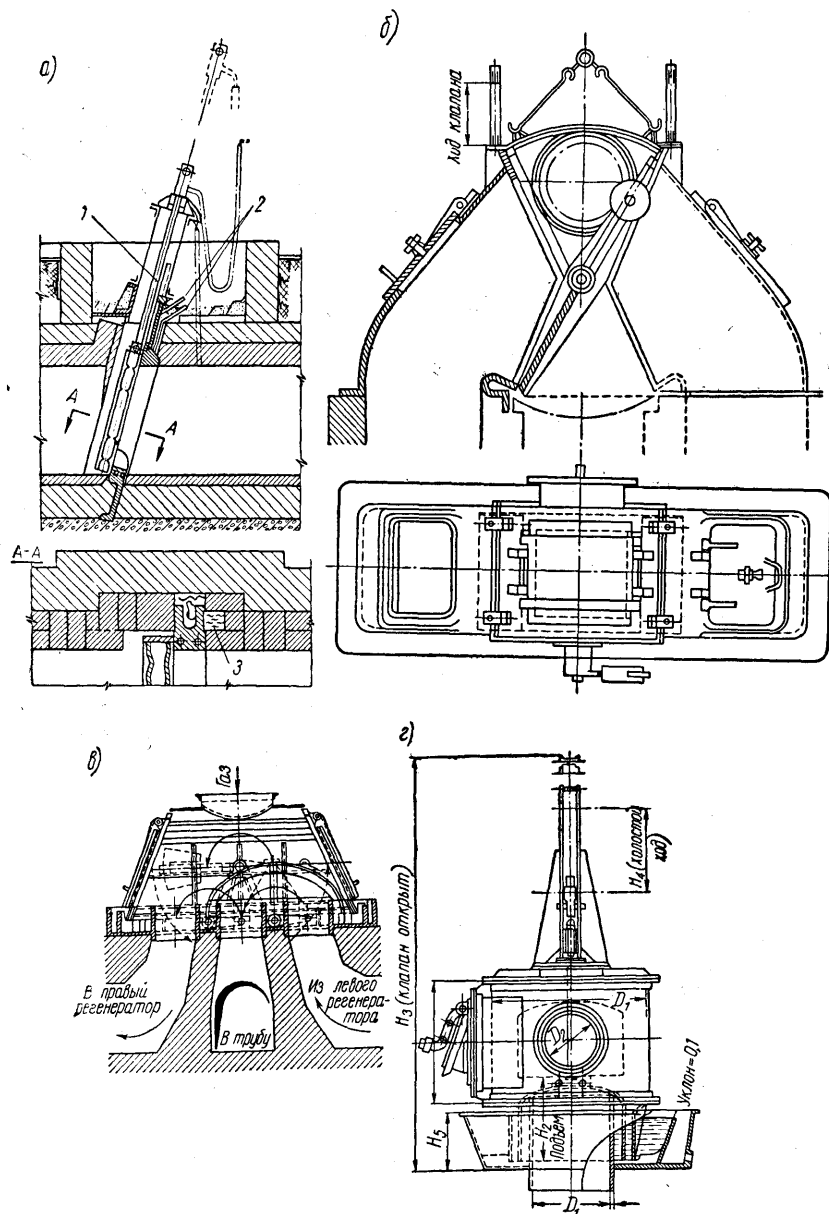


Рис. 119. Перекидные устройства регенеративных печей:

- а — устройство шиберного типа: 1 — установочная точка; 2 — подвод и отвод охлаждающей воды; 3 — уплотняющая масса;  
 б — клапан мотылькового типа;  
 в — газовый клапан Фортера с водяным затвором; г — тарельчатый клапан с водяным охлаждением

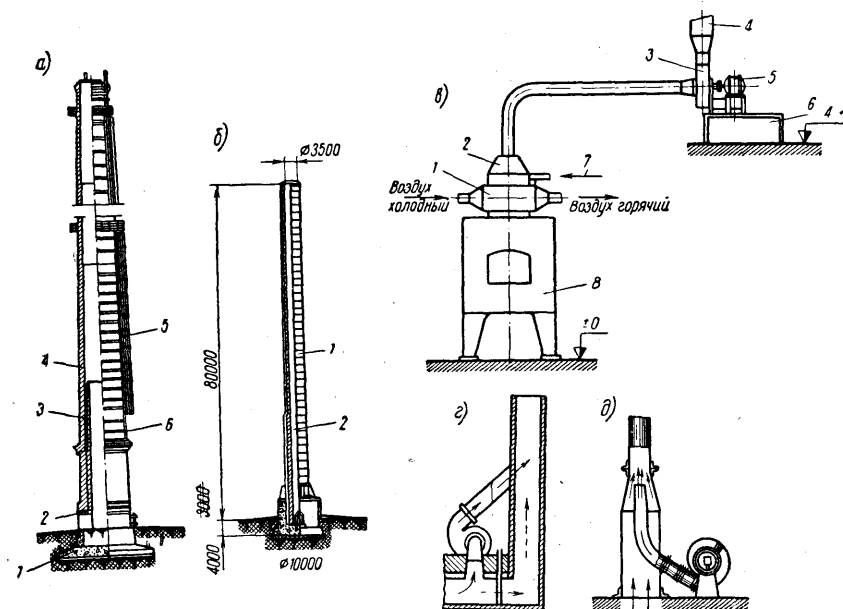


Рис. 120. Устройства для удаления продуктов горения:

- а — кирпичная дымовая труба: 1 — фундамент; 2 — отверстие для подвода дымохода; 3 — футеровка из шамотного кирпича; 4 — кладка из строительного (красного) кирпича; 5 — лестница; 6 — стяжные кольца;  
 б — металлическая дымовая труба: 1 — кожух из листовой стали; 2 — футеровка из шамотного кирпича;  
 в — зонт с вентилятором: 1 — рекуператор; 2 — зонт; 3 — вентилятор; 4 — труба; 5 — мотор; 6 — площадка; 7 — патрубок с дросселем для регулирования подсоса холодного воздуха; 8 — нагревательная камерная печь;  
 г — дымосос прямого действия; д — дымосос косвенного действия

Дымовая труба является надежным устройством, создающим разрежение, необходимое для движения продуктов горения от топки через рабочее пространство, систему дымоходов и теплоиспользующих устройств с удалением их в окружающее пространство на достаточно большой высоте.

В соответствии с требованиями санитарной техники и пожарной охраны высота дымовой трубы должна быть на 3—5 м выше конька наиболее высокого здания в радиусе 100 м.

Для нагревательных печей применяют кирпичные и железобетонные трубы конической формы с внутренней футеровкой из шамотного кирпича, а также цилиндрические трубы, сваренные (или склепанные) из стальных листов с внутренней шамотной футеровкой (рис. 120, а и б).

Последние значительно дешевле кирпичных и железобетонных, но срок службы их меньше (10—15 лет). Высота стальных

труб достигает 60 м и более, кирпичных — 100 м и более, железобетонных — 150 м и более.

Расчет размеров дымовой трубы приведен на стр. 91. Разрежение, создаваемое дымовой трубой, должно быть на 15—25% более потери напора при перемещении продуктов горения от топки до дымовой трубы. Этим учитывают неточности расчета, увеличение сопротивления дымоходов в результате их засорения и необходимость форсирования работы печи. Если труба обслуживает две или несколько печей, то необходимое разрежение рассчитывают по максимальному сопротивлению — по наиболее длинному и сложному тракту от печи до трубы, а диаметр трубы и сечение общего дымохода — по суммарному количеству продуктов горения. Если к трубе подключают два или несколько дымоходов, то во избежание ухудшения работы той или иной печи (перебоя тяги) у основания трубы делают разделяющие их перегородки высотой 2—4 м.

Среднюю температуру воздуха, окружающего трубу, можно определить по формуле:

$$t_b = t'_b - \frac{VH}{2} [^\circ\text{C}], \quad (405)$$

где  $H$  — примерная высота трубы, м;

$t'_b$  — температура воздуха у основания трубы: в местностях умеренного климата  $t'_b = 5-20^\circ\text{C}$ ; жаркого —  $t'_b = 15-30^\circ\text{C}$ ; холодного —  $t'_b = -10+10^\circ\text{C}$ .

Коэффициент трения газов и сечение трубы для определения  $\delta_{\text{тр}}$  в формуле (84) принимают для футерованных труб  $\lambda = 0,05$ , для металлических труб без футеровки  $\lambda = 0,03$ .

**Пример.** Рассчитать сечение и высоту кирпичной дымовой трубы по следующим данным: суммарное сопротивление движению газов  $\Sigma\delta \approx 200 \text{ н/м}^2$ ; объем продуктов горения, протекающих через трубу,  $V_0^2 = 3,0 \text{ м}^3/\text{сек}$  при н. ф. у.; продуктов горения у основания трубы  $t_1^2 = 400^\circ\text{C}$ ; удельный вес продуктов горения  $\gamma_0^r = 12,94 \text{ н/м}^3$ ; температура воздуха у основания трубы  $t'_b = 20^\circ\text{C}$ ; барометрическое давление  $B = 10^5 \text{ н/м}^2$ .

1. Определяем размеры сечения трубы. Диаметр выходного сечения трубы при заданной скорости  $w_2 = 3,0 \text{ м/сек}$  будет

$$D_2 = \sqrt{\frac{4}{\pi} \cdot \frac{V_0^2}{w_2}} = \sqrt{\frac{4}{\pi} \cdot \frac{3}{3}} = 1,13 \text{ м} \text{ принимаем } 1,2 \text{ м.}$$

Скорость  $w_2$  при этом будет равна 2,7 м/сек.  
Диаметр у основания трубы:

$$D_1 = 1,5D_2 = 1,5 \cdot 1,2 = 1,8 \text{ м.}$$

$$\text{Средний диаметр трубы } D_{\text{ср}} = \frac{1,8 + 1,2}{2} = 1,5 \text{ м.}$$

Скорость продуктов горения у основания трубы

$$w_1 = \frac{V_0^r}{\frac{\pi}{4} \cdot D_1^2} = \frac{3}{\frac{\pi}{4} \cdot 1,8^2} = 1,2 \text{ м/сек.}$$

2. Находим примерную высоту трубы по формуле

$$H_{\text{тр}} = (25 - 30) \cdot D_{\text{ср}} = 40 \text{ м.}$$

3. Определяем среднюю по высоте трубы температуру воздуха и его удельный вес:

$$t_b = t'_b - \frac{\sqrt{H}}{2} = 20 - \frac{\sqrt{40}}{2} \approx 17^\circ\text{C};$$

$$\gamma_{t; p}^b = \gamma_0^r \frac{273}{273 + t} \cdot \frac{10^5}{1,033 \cdot 10^5} = 12,94 \frac{273}{273 + 17} \cdot \frac{10^5}{1,033 \cdot 10^5} = 11,6 \text{ н/м}^3.$$

4. Определяем среднюю температуру по формуле (85) и средний удельный вес газов в трубе:

$$t'_{\text{ср}} = \frac{t_1^r - t_2^r}{2} = \frac{400 + (400 - 1,5 \cdot 40)}{2} = 370^\circ\text{C};$$

$$\gamma_{t; p}^r = 12,94 \frac{273}{273 + 370} \cdot \frac{10^5}{1,033 \cdot 10^5} = 5,39 \text{ н/м}^3.$$

5. Определяем потерю давления от трения газов при движении их по трубе (86):

$$\delta_{\text{тр}} = \lambda \frac{w_{\text{ср}}^2}{2g} \cdot \gamma_0^r \frac{T}{273} \cdot \frac{H}{D_{\text{ср}}} = 0,05 \left( \frac{2,7 + 1,2}{2} \right)^2 \frac{1}{2 \cdot 9,81} \times \\ \times 12,94 \cdot \frac{370 + 273}{273} \cdot \frac{40}{1,5} = 8 \text{ н/м}^2.$$

6. Высоту дымовой трубы определяем по формуле (84), принимая создаваемое трубой разрежение с запасом:

$$\Delta P_{\text{расч}} = 1,25 \Sigma\delta = 1,25 \cdot 200 = 250 \text{ н/м}^2,$$

$$\Delta P_{\text{расч}} = H_{\text{тр}} (\gamma_{t; p}^b - \gamma_{t; p}^r) - \frac{w_2^2 - w_1^2}{2g} \cdot \gamma_0^r \cdot \frac{T_{\text{ср}}}{273} - \delta_{\text{тр}},$$

$$250 = H_{\text{тр}} (11,6 - 5,39) - \frac{2,7^2 - 1,2^2}{2 \cdot 9,81} \cdot 12,94 \frac{370 + 273}{273} - 8,0$$

$$(\gamma_{t; p}^b = 11,6 \frac{\text{н}}{\text{м}^3} \text{ — удельный вес воздуха при } t_1 = 17^\circ\text{C и } B = 10^5 \text{ н/м}^2),$$

откуда

$$H_{\text{тр}} = \frac{250 + 9,3 + 8}{11,6 - 5,39} = 43 \text{ м.}$$

Так как эта величина совпадает с первоначально полученной величиной, то пересчета не производим.

При наличии нескольких мелких печей дымовая труба работает плохо, так как количество газов при нормальной работе значительно меньше максимального, на которое приходится рассчитывать дымовую трубу и, кроме того, возможны значительные подсосы воздуха, снижающие среднюю температуру газов в трубе, а с ней и разрежение, создаваемое дымовой трубой. Поэтому, если в цехе имеется значительное количество небольших печей, то продукты горения из них отводятся через каналы в кладке и загрузочные окна под зонт, соединенный с естественной или искусственной вентиляцией. Схема такого устройства показана на рис. 120, в.

При больших сопротивлениях на пути движения газов и низкой их температуре высота дымовой трубы получается очень большой, а сама труба — очень дорогой при строительстве. В таких случаях рационально переходить на искусственную тягу.

Применяемые схемы дымососа прямого действия, дымососа косвенного действия и эжектора приведены на рис. 120, г и д.

Следует указать, что схему устройства эжектора, работающего на паре или на компрессорном воздухе, нельзя считать технически рациональной, так как стоимость пара или сжатого воздуха очень велика. Такую схему можно применять как временную, например при разогреве печи после ремонта или длительной остановки.

## § 59. УСТРОЙСТВА ДЛЯ СЖИГАНИЯ ТОПЛИВА

Устройствами для сжигания топлива называют конструкции и приспособления, при помощи которых подводят топливо и воздух, перемешивают их и осуществляют горение. Часть печи, в которой происходит процесс горения, называется топкой.

Топливосжигательные устройства должны обеспечивать: 1) необходимую полноту горения; 2) необходимую длину факела пламени; 3) концентрацию тепловыделения на определенных участках печи; 4) широкое регулирование количества топлива, сжигаемого в единицу времени.

Экономичность и производительность нагревательных печей в значительной степени зависят от работы топливосжигательных устройств. Поэтому, кроме указанных выше требований, топливосжигательные устройства должны быть простой конструкции, надежными в работе, иметь незначительные

эксплуатационные расходы и небольшие начальные затраты на изготовление и монтаж.

В зависимости от рода топлива устройства для сжигания топлива можно разделить на: 1) горелки для сжигания газообразного топлива; 2) форсунки для сжигания жидкого топлива; 3) топки для сжигания твердого топлива; 4) горелки для сжигания пылевидного топлива.

### 1. Горелки для сжигания газообразного топлива

Конструкции горелок, применяемых для сжигания газообразного топлива, очень разнообразны.

По способу смешения газа с воздухом их можно разделить на горелки внутреннего смешения (газ с воздухом смешивается внутри горелки), горелки частичного смешения (смешение газа с воздухом частично происходит в горелке и заканчивается вне ее) и горелки внешнего смешения (газ с воздухом смешивается вне горелки).

Горелки с внутренним смешением газа и воздуха дают короткий факел, поэтому их иногда называют беспламенными. Горелки с частичным и внешним смешением газа и воздуха дают сравнительно длинный факел; их называют пламенными.

В зависимости от величины давления газа различают горелки низкого давления ( $p_r \leq 5000 \text{ н/м}^2$ ) и горелки высокого давления ( $p_r > 5000 \text{ н/м}^2$ ). По форме выходного сечения и получающегося факела горелки делят на круглые и щелевые (плоские).

К горелкам внутреннего смешения (беспламенным) относят инжекторные горелки и горелки с предварительным смешением газа и воздуха.

Для нагревательных печей применяют инжекторные горелки чаще всего с инжекцией газом воздуха и редко с инжекцией воздухом газа.

Обычно инжекционные горелки работают на холодном газе и воздухе, но они могут работать и на воздухе или газе, подогретых до температуры ниже температуры воспламенения смеси.

В инжекционной горелке газ и воздух смешиваются в смесителе, а горение газозвушной смеси, выходящей из горелки, происходит в коническом или цилиндрическом тоннеле, находящемся в кладке печи. Один смеситель может обслуживать одну, две или три горелки.

При сжигании высококалорийных газов, когда на  $1 \text{ м}^3$  нужно засосать 8—12  $\text{м}^3$  воздуха, применяют двухступенчатые

Рис. 121. Горелки внут-  
реннего смещения (бе-  
спламенные):

а — инжекторная горелка для  
низкотемпературного газа; 1 —  
смеситель; 2 — горелка;  
б — многосопловая инжектор-  
ная горелка: 1 — смеситель;  
2 — наконечник; 3 — подача  
газа; 4 — сопло;

в — инжекторная горелка для  
природного газа: 1 — газовое  
сопло; 2 — смеситель;

г — двухступенчатая инжек-  
торная горелка «Союзтепло-  
строй»: 1 — газовый патру-  
бок; 2 — первое сопло; 3 —  
второе сопло; 4 — тоннель  
в кладке;

д — инжекторная горелка для  
работы на подогревом возду-  
хе: 1 — подача газа; 2 — по-  
дача горячего воздуха; 3 —  
смеситель; 4 — водоохлажда-  
емый носок горелки;  
е — керамическая (радиаци-  
онная) горелка: 1 — жаро-  
упорный носок горелки; 2 —  
керамическая насадка; 3 —  
корпус горелки

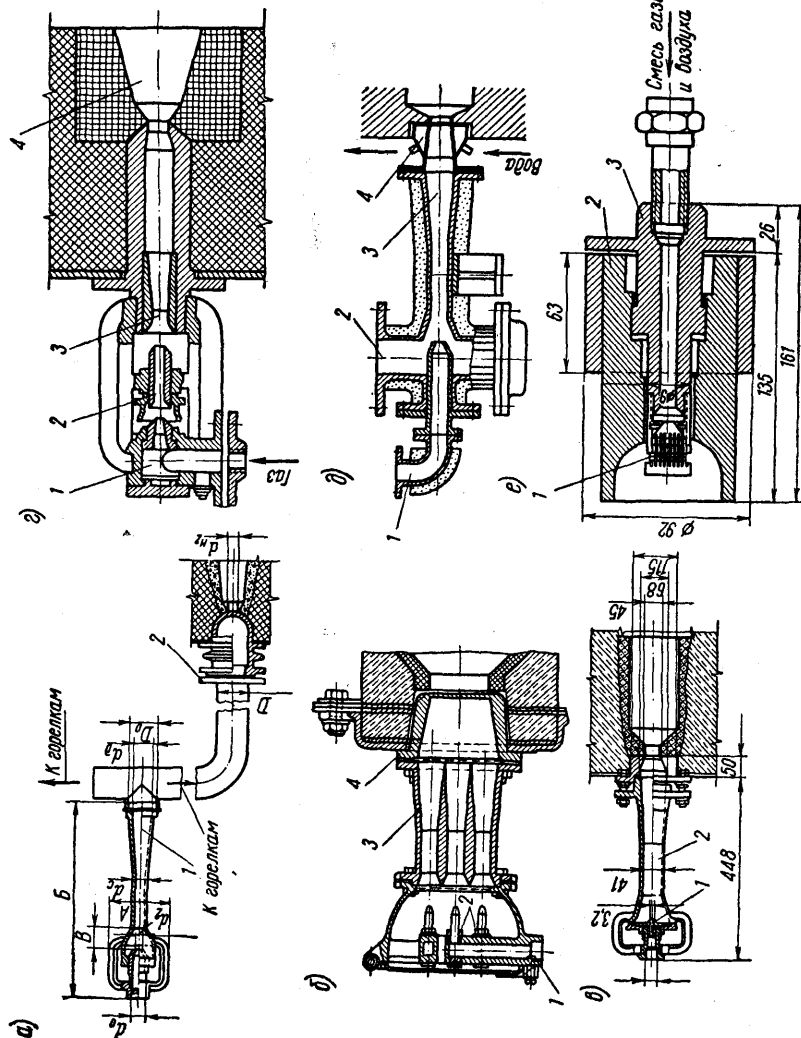


Таблица 57

Инжекционные горелки для газов теплотворностью 3768—9211 кДж/м³  
при н. ф. у. с отдельными смесителями (рис. 121, а).

Смеситель								Количество горелок на 1 смеситель						Произво- дитель- ность, квт
Размеры, мм							Вес, кг	Размеры горелки, мм						
$D_0$	$d_0$	$d_c$	$d_d$	A	B	B		D	$d_{нг}$	D	$d_{нг}$	D	$d_{нг}$	
25	19	13	26	86	294	19	1,5	38	13 14,5 16	—	—	—	—	15,12 19,77 23,26
32	19	16	38	86	346	24	1,8	38	16 18 20	38	11 13 14,5	— — —	— — —	23,26 29,08 36,05
32	25	20	40	120	424	30	2,7	51	20 22 24	38	14,5 16 17	— — —	— — —	36,05 44,2 52,34
51	25	24	48	120	484	36	4,3	63	24 27 30	51	17 19 21	38	14,5 16 17	52,34 66,29 82,57
63	32	30	56	150	552	45	7,8	80	30 33 37	51	21 23 28	38	17 19 21	82,57 100 127,9
								80	37 41 45	63	26 30 33	51	21 24 26	127,9 151,2 186,1
76	38	37	68	150	640	55	9,3	100	45 50 55	80	33 37 39	63	26 30 33	186,1 232,6 279,1
102	51	45	80	200	692	57	11,7	125	55 61	100	39 43	80	33 37	279,1 337,3
Уменьшен- ное														
102	51	55	96	200	787	57	14,3	150	67		50	100	41	407,1

Примечание. Давление газа перед соплом горелки в зависимости от теплотвор-  
ной способности газа колеблется от 2000 до 2500 н/м².

инжекторные горелки, а иногда многосопловые горелки (рис. 121, б и г).

Характеристики одноступенчатых и двухступенчатых инжекторных горелок приведены в табл. 57—58.

Таблица 58

Производительность двухступенчатых инжекционных горелок конструкции «Союзтеплостроя» (рис. 121, г),  $\text{нм}^3/\text{ч}$

Газ	$Q_{\text{н}}^{\text{Р}}$ , кДж/м <sup>3</sup> при н. ф. у.	$p_1$ , н/м <sup>2</sup>	Типоразмер горелки					
			ГВ-2	ГВ-4	ГВ-5	ГВ-6	ГВ-7	ГВ-8
Коксовый	16 750	30 000	4	14	27	43	60	87
Смешанный	8374	20 000	8	28	52	85	115	165
Генераторный	5443	10 000	10	35	65	105	140	210

В табл. 58  $Q_{\text{н}}^{\text{Р}}$  — низшая теплотворность газа;  $p_1$  — давление газа перед соплом горелки.

Преимуществами инжекторных горелок являются: 1) сжигание газа с малым избытком воздуха ( $\alpha=1,05$ ); 2) получение значительной напряженности топочного объема и высокой температуры горения; 3) отсутствие воздухоудного хозяйства и воздухопроводов при работе на холодном воздухе; 4) сохранение соотношения газ — воздух при изменении подачи газа в известных пределах.

Недостатками инжекционных горелок являются возможность проскока пламени в смеситель при малых расходах газа и небольшие пределы регулирования (расход газа может меняться в 2—2,5 раза).

Инжекционные горелки рассчитывают по формулам для расчета струйных приборов.

Примером горелки с предварительным смешением является так называемая радиационная, или керамическая горелка (см. рис. 121, е). Газовоздушная смесь получается в специальной газозоудовке и под давлением 200—2000 н/м<sup>2</sup> подается в горелку.

Горение смеси происходит на поверхности керамической насадки, которая сильно разогревается и интенсивно излучает тепло в печь. Чтобы обеспечить надежность работы горелки, ее носок охлаждают водой.

Керамические горелки набирают в панели и устанавливают близко к нагреваемому материалу (обычно в печах скоростного нагрева).

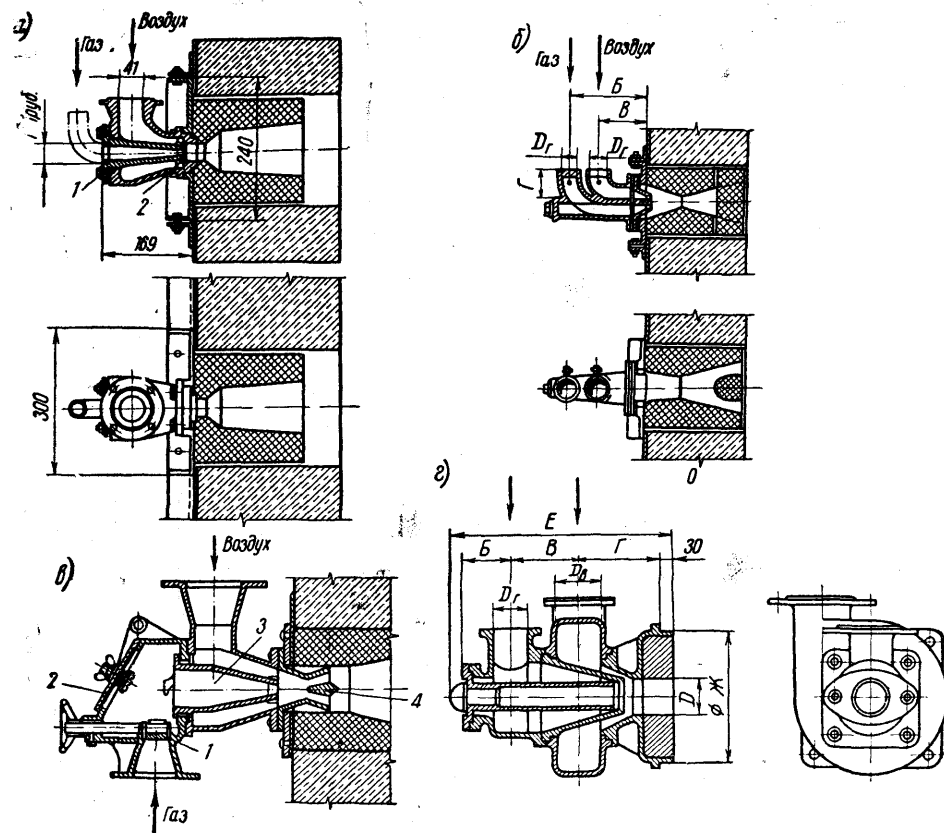


Рис. 122. Горелки частичного смешения (пламенные):

- а — горелка типа труба в трубе: 1 — газовое сопло; 2 — воздушное сопло;  
 б — щелевая горелка типа ГШ;  
 в — щелевая горелка для неочищенного генераторного газа: 1 — газовая задвижка; 2 — крышки для чистки; 3 — газовое сопло; 4 — рассекаль;  
 г — турбулентная горелка

Применяют еще так называемые печи со светящейся футеровкой. Стены печи, под и свод выкладывают из специального пористого кирпича. Газовоздушная смесь проходит через поры и сгорает на внутренней поверхности футеровки, нагревая ее и заставляя светиться.

Горелки частичного смешения, или двухпроводные горелки требуют подачи воздуха от вентилятора или зоудовки. Они могут работать на подогретом воздухе и газе и дают возможность регулировать производительность горелки в широких пределах (расход газа может изменяться в 5—6 раз). Горелки эти

работают с избытком воздуха  $\alpha=1,05-1,15$  и создают светящийся факел пламени.

Наиболее простой конструкцией такой горелки является горелка типа «труба в трубе» (рис. 122, а).

В табл. 59 и 60 приведены характеристики щелевых и турбулентных горелок.

Таблица 59

Производительность горелок низкого давления конструкции «Союзтеплостроя» (рис. 122, б)

Типоразмер горелки	Производительность, $\text{м}^3/\text{ч}$ при н. ф. у.			Давление (в $\text{н}/\text{м}^2$ ) при газе с $Q_{\text{н}}^{\text{Р}}$ $\text{кДж}/\text{м}^3$ при н. ф. у.					
	минимальная	средняя	максимальная	5024		5652		6280	
				для газа	для воздуха	для газа	для воздуха	для газа	для воздуха
ГЩО и ГЩД — 1"	5	10	15	800	800	800	850	850	1100
ГЩО и ГЩД — 1 1/2"	10	20	30	800	800	800	850	850	1050
ГЩО и ГЩД — 2"	80	40	60	750	750	800	850	850	1000
ГЩО и ГЩД — 2 1/2"	40	70	100	750	750	750	850	800	1000
ГЩК — 3"	60	100	140	500	750	550	850	600	1000
ГЩК — 4"	100	150	200	500	700	550	800	600	950
ГЩК — 5"	150	225	300	500	700	550	750	600	950

Примечание. Давление указано при максимальной производительности горелки. ГЩО — горелка щелевая односторонняя, ГЩД — горелка щелевая двухсторонняя; ГЩК — гока щелевая комбинированная.

Таблица 60

Производительность турбулентных горелок низкого давления конструкции «Стальпроекта» (рис. 122, в),  $\text{м}^3/\text{ч}$  при н. ф. у.

Газ теплотворностью $Q_{\text{н}}^{\text{Р}} = 3768-5862 \text{ кДж}/\text{м}^3$ при н. ф. у.				Газ теплотворностью $Q_{\text{н}}^{\text{Р}} = 5862-9210 \text{ кДж}/\text{м}^3$ при н. ф. у.			
Номер горелки	Расход газа	Номер горелки	Расход газа	Номер горелки	Расход газа	Номер горелки	Расход газа
№ 1	35—70	№ 4	140—280	№ 8	30—60	№ 12	190—380
№ 2	50—100	№ 5	220—450	№ 9	40—80	№ 13	270—550
№ 3	80—110	№ 6	320—650	№ 10	70—130	№ 14	450—900
		№ 7	550—1100	№ 11	120—230		

Примечание. Производительность горелки указана для минимального давления газа  $1000 \text{ н}/\text{м}^2$  и воздуха  $1500 \text{ н}/\text{м}^2$ .

Расчет горелок частичного смешения сводится к определению сечений для выхода газа и воздуха на основании формул истечения.

Горелки с внешним смешением газа и воздуха в нагревательных печах в настоящее время не применяют.

## 2. Форсунки для сжигания жидкого топлива

Устройства для сжигания жидкого топлива называют форсунками. Основное назначение форсунки — распылить жидкое топливо, превратить его в мельчайшие капельки, а затем перемешать с воздухом.

Кроме того, форсунки должны обеспечить в рабочем пространстве определенное давление продуктов горения.

По способу распыливания мазута форсунки делятся на паровые (распыливание происходит паром), воздушные (распыливание происходит сжатым воздухом), механические (распыливание происходит за счет энергии самого топлива, вытекающего из небольшого отверстия под большим давлением) и комбинированные, в которых механическое распыливание совмещается с паровоздушным.

В нагревательных печах в настоящее время применяют главным образом воздушное распыливание.

По давлению распыливающего воздуха форсунки делятся на форсунки высокого, среднего и низкого давления.

Распылителем в форсунках высокого давления служит компрессорный воздух ( $p=0,2-0,6 \text{ Мн}/\text{м}^2$ ).

Расход распылителя —  $0,5-1,2 \text{ кг}$  на  $1 \text{ кг}$  жидкого топлива (мазута), что составляет  $7-15\%$  от всего воздуха, необходимого для горения. Остальное количество воздуха инжектируется форсункой из окружающего пространства или подается под небольшим давлением от вентилятора по специальному воздухопроводу (вторичный воздух). Вторичный воздух, как и первичный, рационально подогревать в рекуператорах до  $200-400^\circ \text{С}$ . Это улучшает процесс горения и экономит топливо.

Производительность форсунок высокого давления колеблется в широких пределах — от  $5,0$  до  $2000 \text{ кг}/\text{ч}$  и более. Эти форсунки образуют длинный и узкий факел. Их рациональнее применять в печах, имеющих удлиненную топочную или рабочую камеру. В небольших нагревательных печах такие форсунки применять не рекомендуется.

Воздушные форсунки высокого давления могут работать на перегретом паре соответствующего давления.

Типичной для форсунок высокого давления является форсунка конструкции В. Г. Шухова (табл. 61).



Таблица 61

Производительность и размер выходных отверстий форсунок высокого давления (рис. 123, а)

Номер форсунки	Выходные отверстия, мм		Диаметр мазутопровода, мм	Производительность при давлении мазута и воздуха, кг/ч		
	Мазут	Пар (воздух)		$P_{\text{маз}}=5030 \text{ Н/м}^2$ $P_{\text{воз}}=0,2-0,3 \text{ Мн/м}^2$	$P_{\text{маз}}=0,06-0,1 \text{ Мн/м}^2$ $P_{\text{воз}}=0,3-0,5 \text{ Мн/м}^2$	$P_{\text{маз}}=0,2-0,25 \text{ Мн/м}^2$ $P_{\text{воз}} \geq 0,5 \text{ Мн/м}^2$
1	2	4,5	76	3	7	10
2	3	5,5	76	6	20	30
3	4	7	12,7	12	40	60
4	5	8	12,7	19	60	90
5	6	9	12,7	27	80	120
6	7	10	12,7	38	100	150
7	8	11	12,7	50	130	180
8	10	13	19,2	70	180	240
9	13	16	19,2	125	250	320
10	16	20	19,2	200	350	400

В настоящее время для малых и средних нагревательных печей успешно применяют турбулентные короткопламенные форсунки высокого давления конструкции А. И. Карабина.

Распылитель (пар или воздух) в форсунке А. И. Карабина подается под углом 75—90° к боковой поверхности топлива (тангенциально), в результате чего мазут хорошо распыливается и образуется завихренный поток смеси, которая сгорает полностью на сравнительно коротком пути.

В форсунках среднего и низкого давления распылителем является воздух, подаваемый от воздуходувок или вентиляторов: с давлением от 20 000 Н/м<sup>2</sup> до 0,2 Мн/м<sup>2</sup> в форсунках среднего давления и от 2500 до 20 000 Н/м<sup>2</sup> в форсунках низкого давления.

Расход распылителя в форсунках среднего давления составляет от 15 до 30% всего воздуха, необходимого для горения. В форсунках низкого давления расход распылителя может быть от 30 до 60%, но обычно через форсунку пропускают весь воздух, необходимый для горения. Распыливание мазута форсунками низкого давления хуже, чем форсунками высокого давления. Для улучшения испарения капелек жидкого топлива при использовании этих форсунок устраивают форкамеры, а иногда против форсунки ставят столбик, так называемый разбойник из высокоогнеупорного материала.

Форсунки низкого давления широко используют в нагрева-

тельных печах небольших и средних размеров различного назначения.

Для улучшения распыливания и регулирования форсунок низкого давления применяют двухступенчатое и даже иногда трехступенчатое распыливание. Часть воздуха, поступающая на распыливание, не регулируется, а остальное количество воздуха регулируется изменением выходного сечения.

В табл. 62 приведена характеристика форсунок низкого давления конструкции «Стальпроекта» с одноступенчатым распыливанием, а на рис. 123, в и г показана турбулентная форсунка конструкции А. И. Карабина и двухступенчатая форсунка (ФДБ) конструкции «Союзтеплостроя».

Таблица 62

Характеристика форсунок низкого давления конструкции «Стальпроекта» (рис. 123, б)

Номер форсунки	Внутренний диаметр воздухопровода, мм	Производительность при давлении воздуха, кг/ч		Диаметры, мм	
		3000 Н/м <sup>2</sup>	7000 Н/м <sup>2</sup>	мазутного сопла	воздушного сопла
1	38	3,5	8	2,5	21
2	65	11	24	3	40
3	100	32	57	4	60
4	125	54	82	5	75
5	150	80	120	5	95
6	200	135	205	6	135

Расчет мазутных форсунок сводится к определению выходных сечений для мазута и воздуха на основе формул для расчета истечения. При этом коэффициент расхода для мазута берут в пределах  $\mu=0,2-0,3$ , а для воздуха  $\mu=0,5-0,7$ .

Мазут может подаваться к форсункам по следующим схемам: 1) самотеком от напорных баков, устанавливаемых вне помещения цеха; 2) под давлением сжатого воздуха, подаваемого сверху в баки, установленные под землей в специальном помещении; 3) насосом от баков, установленных вне цеха.

Во всех случаях на печь, а иногда и на группу печей устанавливают два бака и более. Пока из одного бака мазут расходует, в других происходит наполнение и обработка мазута (подогрев и отстой от воды и грязи).

Баки хорошо теплоизолируют и снабжают подогревателями (паровыми или электрическими), термометрами, а также поплавковым устройством с рейкой для контроля за расходом

Рис. 123. Форсунки для сжигания мазута:

а — форсунка высокого давления системы Шухова: 1 — мазутная трубка; 2 — центральный выступ; 3 — корпус; 4 и 10 — контргайки; 5 — тройник; 6 — наклонная гайка; 7 — мазутопровод; 8 — отверстие для мазута; 9 — гайка; 11 — хвостовик четырехгранный; 12 — патрубок для подачи пара или сжатого воздуха;  
б — форсунка низкого давления конструкции «Стальпро-екта»: 1 — мазутная трубка; 2 — подвижное сопло; 3 — воздушное сопло; 4 — центральный винт; 5 — корпус; 6 — воздуховод; 7 — эксцентрик для регулирования мазутного сопла; 8 — рукоятка эксцентрика; 9 — игольчатый клапан; 10 — маховик клапана; 11 — мазутопровод;  
в — форсунка низкого давления системы «Карабина»: 1 — маховик; 2 — мазутная трубка; 3 — корпус; 4 — иглы для регулирования подачи мазута; 5 — насадка для регулирования воздушного отверстия; 6 — пластины, захватывающие воздух;  
г — форсунка низкого давления с двухступенчатым распылением («Теплопроект»)

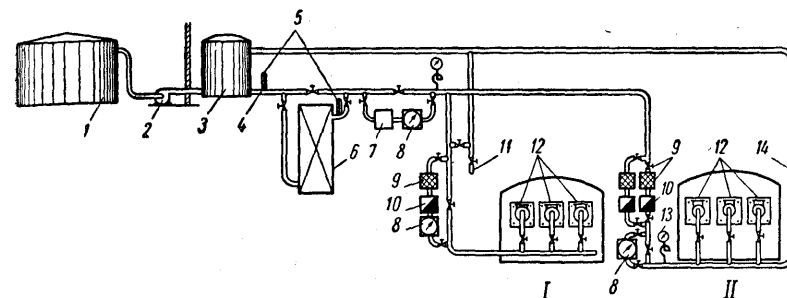
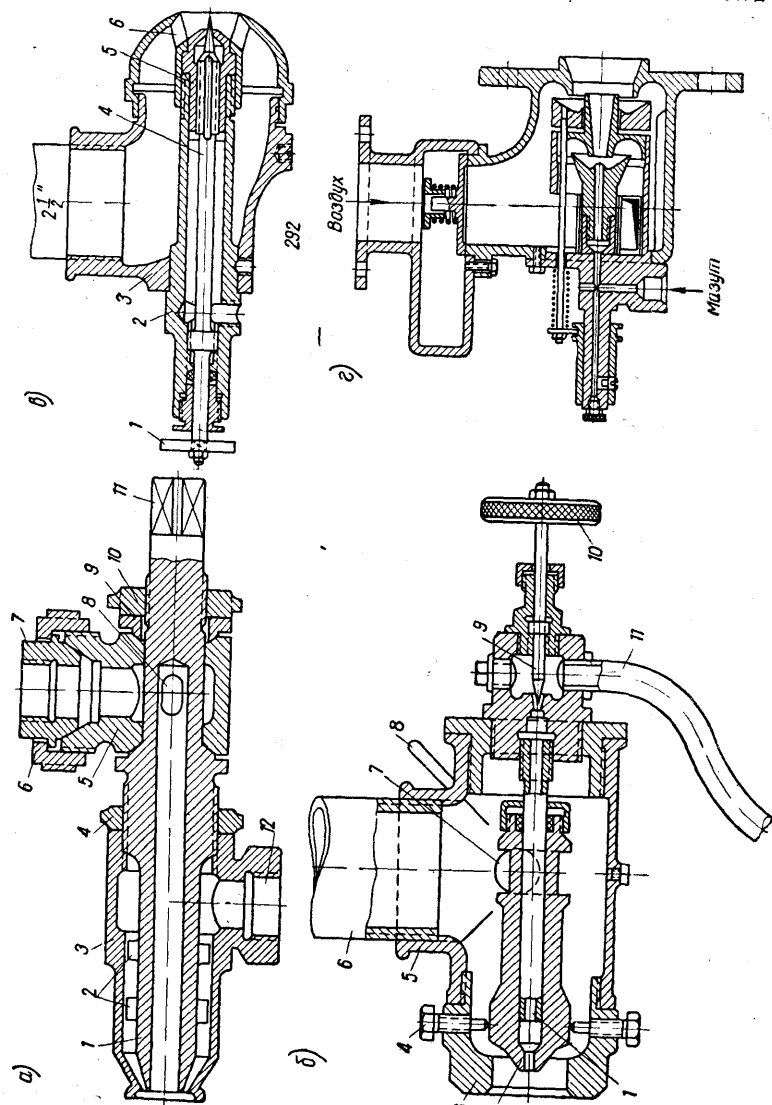


Рис. 124. Схема цехового мазутопровода:

I — тупиковая система подачи мазута; II — циркуляционная система подачи мазута; 1 — заводское мазутохранилище; 2 — насос для подачи мазута; 3 — цеховые баки; 4 — мазутопровод; 5 — термометры; 6 — мазутоподогреватель; 7 — регулятор давления; 8 — расходомеры; 9 и 10 — сетчатый и пластинчатый фильтры; 11 — сливной патрубок; 12 — форсунки; 13 — манометр; 14 — обратная линия

мазута. Если бак работает под давлением, то он снабжается еще предохранительным клапаном и манометром. При большом расстоянии от баков и подаче мазута под давлением около печей иногда устанавливают трубчатые паровые подогреватели и фильтры (сетчатые и пластинчатые).

Трубопроводы для подачи мазута от расходных баков к печам обогреваются прокладываемыми под ними паровыми трубками небольшого диаметра. Последние заключают (обычно) в общую теплоизоляцию с мазутопроводом.

Для обеспечения постоянного давления мазута у форсунок на мазутопроводах ставят регуляторы давления (если мазут к печам подается насосами), а для контроля за температурой и давлением на мазутопроводах около печей следует устанавливать манометры и термометры.

Схемы подачи мазута от баков к печам (тупиковая и циркуляционная) приведены на рис. 124.

Циркуляционная схема предпочтительнее, так как при тупиковой схеме во время отключения печи мазут в трубах может застыть, что очень осложняет следующий розжиг форсунок.

### 3. Топки для сжигания твердого кускового топлива

Для сжигания твердого кускового топлива применяют простые и полугазовые топки (рис. 125, а и б). В простой топке весь воздух подается под колосниковую решетку при небольшой толщине слоя топлива (три-четыре диаметра кусков). В полугазовой топке толщина слоя — более четырех-пяти диаметров кусков. Горение происходит с образованием продуктов непол-

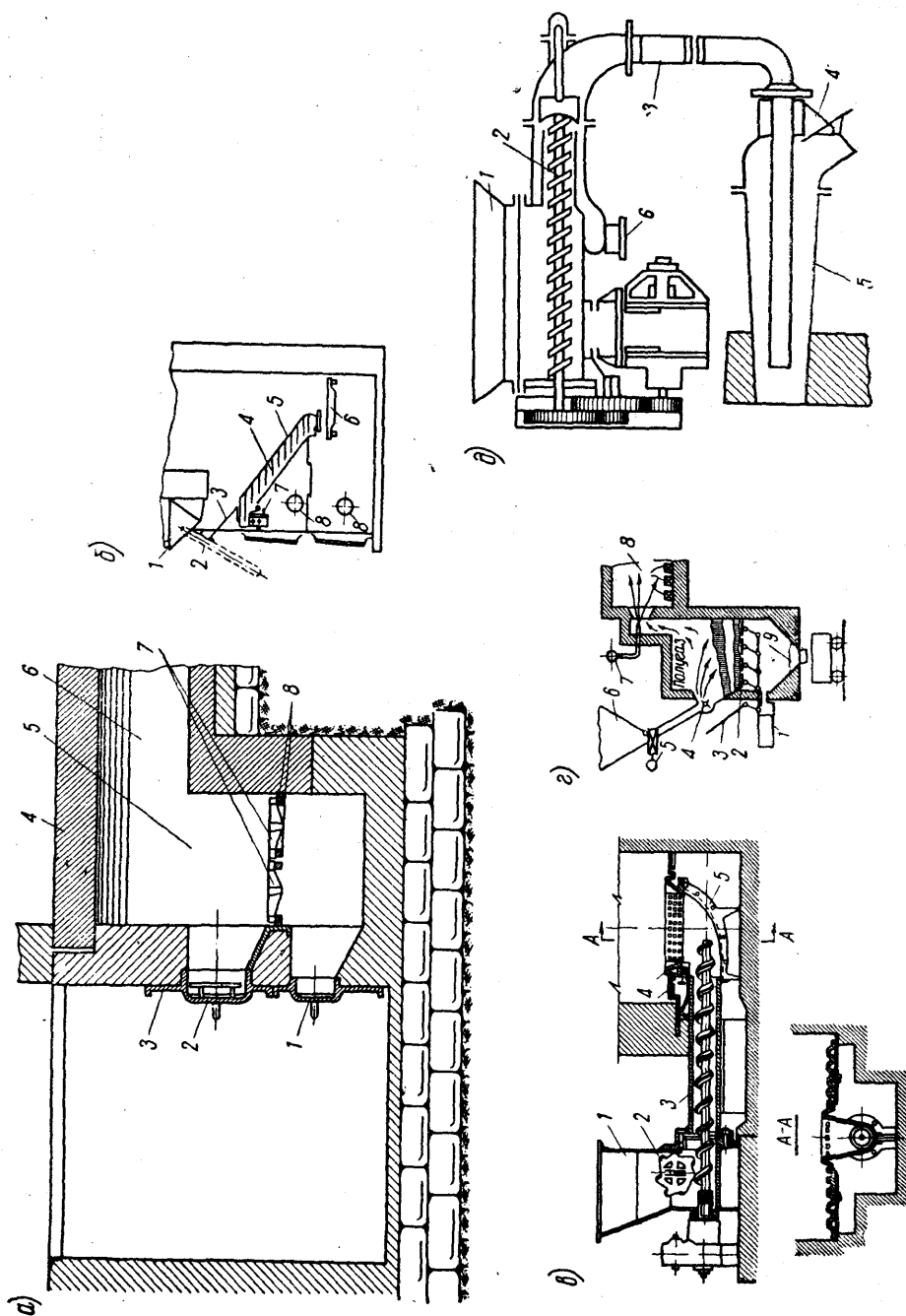


Рис. 125. Устройства для сжигания твердого кускового и пылевидного топлива

а — топка с горизонтальной колосниковой решеткой: 1 — дверца зольника; 2 — дверца топки; 3 — топочная рама; 4 — свод топки; 5 — топочный объем; 6 — газозаход в рабочее пространство печи; 7 — колосники; 8 — опорные балки;  
 б — топка со ступенчатой решеткой: 1 — бункер для топлива; 2 — дверца для шуровки; 3 — топочная рама; 4 — колосники; 5 — наклонная решетка; 6 — горизонтальная решетка; 7 — приспособление для изменения угла наклона решетки; 8 — воздуховод;  
 в — механизированная топка с нижней подачей: 1 — бункер; 2 — колесо для подачи угля из бункера к шнеку; 3 — шнек; 4 — колосники; 5 — корпус;  
 г — полуавтоматическая топка с механическим забросом топлива: 1 — воздуховод; 2 — колосниковая решетка с подвижными колосниками; 3 — привод поворота колосников; 4 — механизм заброса топлива; 5 — питатель; 6 — бункер; 7 — подача вторичного воздуха; 8 — горелка для пылеугольного топлива; 1 — бункер; 2 — шнек; 3 — трубопровод для пыли; 4 — подача воздуха; 5 — воздушное сыло; 6 — люк для очистки

ного сгорания, которые догорают в топочном объеме. Для этого под колосниковую решетку подают 50—65% от всего воздуха, необходимого для горения (первичный воздух), а остальное количество воздуха (вторичный воздух) подается в топку над слоем топлива или дальше в рабочее пространство печи.

В зависимости от конструкции колосниковых решеток различают топки с горизонтальной решеткой, топки с наклонной или ступенчатой решеткой.

По способу подачи топлива бывают топки ручные и механизированные (рис. 125, в).

Расчет топки сводится к определению необходимой площади колосниковой решетки и объема топки.

Площадь решетки определяют, исходя из весовой или тепловой напряженности:

$$F_{\text{кол. реш}} = \frac{BQ_{\text{н}}^{\text{р}}}{q \cdot 3600} = \frac{B}{b} [\text{м}^2], \quad (406)$$

где  $B$  — часовой расход топлива, кг/ч;

$Q_{\text{н}}^{\text{р}}$  — теплотворность топлива, кДж/кг;

$b$  — массовая напряженность решетки, принимаемая от 150 до 250 кг/м<sup>2</sup> · ч;

$q$  — тепловая напряженность, кВт/м<sup>2</sup>; для каменных и бурых углей  $q = 814 \div 1050$  кВт/м<sup>2</sup>; для дров и торфа  $q \approx 1163$  кВт/м<sup>2</sup>.

Линейные размеры решетки принимают, исходя из конструктивных требований с учетом удобства обслуживания. Длина топки не должна превышать 2000—2400 мм, а ширина на одну дверцу по фронту — 1200—1500 мм.

Живое сечение решеток, т. е. отношение площади воздушных проходов ко всей площади решетки колеблется в пределах 8—20%.

Объем топки приблизительно можно определить, исходя из тепловой напряженности объема по формуле

$$V_{\tau} = \frac{BQ_n^p}{3600 q_v} [m^3], \quad (407)$$

где  $q_v$  — тепловая напряженность топочного объема,  $квт/м^3$ .

Для достижения полного сжигания топлива в таком объеме величина  $q_v = (175 \div 582) кВт/м^3$ . Чем лучше условия перемешивания топлива с воздухом, тем выше можно брать значение  $q_v$ .

Для беспламенных горелок  $q_v$  достигает  $11,6 Мвт/м^3$  и даже более.

#### 4. Устройства для сжигания пылевидного топлива

Пылевидное топливо, применяемое в нагревательных печах довольно редко, сжигается в специальных горелках (рис. 125, з).

Пыль подается к горелке обычно с помощью воздуха, причем скорость его должна быть не менее  $15\text{—}20 м/сек$ .

Первичный воздух, несущий пыль, должен быть холодным. По давлению первичного воздуха различают горелки высокого давления ( $0,2\text{—}0,6 Мн/м^2$ ) и низкого давления (от  $3000 н/м^2$  и выше). Количество первичного воздуха зависит от давления и колеблется от 15% для горелок высокого давления до 70% для горелок наиболее низкого давления.

Горелки высокого давления делают обычно с центральной подачей пыли и кольцевой подачей вторичного воздуха. Горелки низкого давления делают и с центральной подачей вторичного воздуха при кольцевой подаче пыли.

При большой производительности применяют также многосопловые и турбулентные горелки.

### § 60. КОНСТРУКЦИИ ТЕПЛОИСПОЛЬЗУЮЩИХ УСТРОЙСТВ

Для использования тепла отходящих газов нагревательные печи оборудуют рекуператорами и регенераторами, устройствами для подогрева воды и котлами-утилизаторами.

Наиболее применимы для нагревательных печей рекуператоры, которые обеспечивают надежный и постоянный подогрев воздуха: металлические — максимально до температур  $600\text{—}800^\circ\text{C}$  и керамические — до температур  $800\text{—}1100^\circ\text{C}$ . Основны-

ми их недостатками являются невысокая стойкость металлических и низкая газоплотность керамических рекуператоров.

По применяемым материалам рекуператоры можно разделить на стальные с  $t_{\text{возд}}$  до  $350^\circ\text{C}$ , чугуны с  $t_{\text{возд}}$  до  $500^\circ\text{C}$ , из жаропрочного чугуна с  $t_{\text{возд}}$  до  $600^\circ\text{C}$ , из жароупорных сталей с  $t_{\text{возд}}$  до  $800^\circ\text{C}$ , шамотные с  $t_{\text{возд}}$  до  $1000^\circ\text{C}$ , карборундовые с  $t_{\text{возд}}$  до  $1100^\circ\text{C}$ .

По конструкции металлические рекуператоры можно разделить на трубчатые, игольчатые, термоблоки, радиационные и комбинированные.

#### 1. Трубчатые рекуператоры

Трубчатые рекуператоры (рис. 126, а и б) изготавливают из гладких стальных труб диаметром от  $10\text{—}15$  до  $120\text{—}150 мм$  (из углеродистых и легированных — жароупорных сталей). Трубчатые рекуператоры можно устанавливать над печами, а также в вертикальных каналах и горизонтальных подземных дымоходах.

Они состоят обычно из одного или нескольких пучков труб, трубных досок, в которых эти трубы крепят, патрубков для подвода и отвода воздуха, а также для передачи воздуха из одного пучка в другой.

Трубчатые рекуператоры имеют хорошую газоплотность и могут применяться не только для подогрева воздуха, но и для подогрева газообразного топлива (горючих газов).

При отоплении печей мазутом или твердым топливом дымовые газы можно пускать внутри прямых труб достаточно большого диаметра, а нагреваемый воздух по межтрубному пространству. Это облегчает возможность чистки поверхностей нагрева, которые быстро засоряются сажей и летучей золой. Когда продукты горения не засоряют поверхностей нагрева, то воздух следует пропускать внутри труб, а дымовые газы — снаружи. Это создает лучшие условия для теплообмена.

#### 2. Игольчатые рекуператоры

Игольчатые рекуператоры собирают из чугунных труб длиной  $880\text{—}1640 мм$ , отливаемых из чугуна различных марок (чаще типа силал). Трубы изготавливают с двусторонними и односторонними иглами (рис. 127, а). Иглы увеличивают поверхность нагрева и турбулизируют потоки дыма и воздуха. В результате коэффициент теплопередачи повышается. В игольчатых рекуператорах воздух пропускают внутри труб, а дымовые газы — снаружи. Рекуператоры с двусторонними иглами

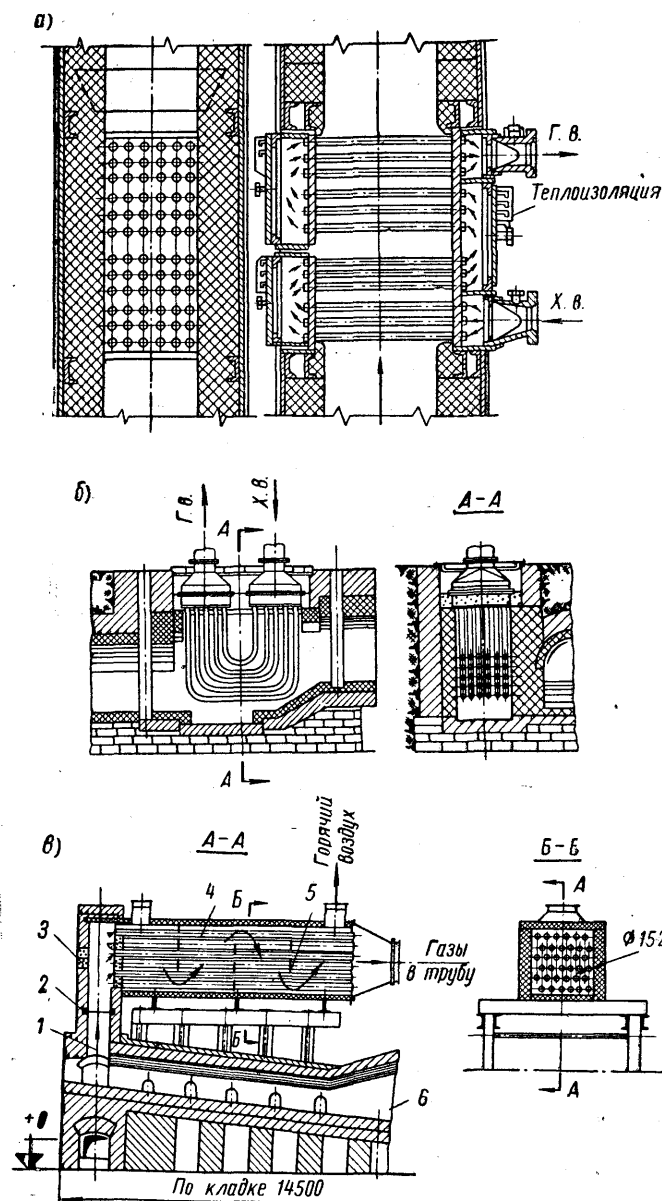


Рис. 126. Трубчатые рекуператоры и их установка:

а — установка трубчатого рекуператора в вертикальном дымоходе; б — установка в горизонтальном дымоходе; в — установка над печью: 1 — канал для подвода газов; 2 — шинбер; 3 — окно для чистки труб; 4 — трубчатый рекуператор; 5 — перегородки для направления воздуха; 6 — печь

рекомендуется применять только для печей, отапливаемых газообразным топливом (при «чистых» продуктах горения). Игольчатые рекуператоры собирают из отдельных труб в секции. Благодаря большому количеству стыков игольчатые рекуператоры имеют сравнительно невысокую газоплотность (потери воздуха в них достигают 15—20%), поэтому для подогрева горючих газов их не применяют.

Игольчатые рекуператоры можно монтировать из одной или нескольких секций. Они могут быть одно-, двух-, трех- и четырехходовые. На рис. 127, б показан двухсекционный игольчатый рекуператор.

Скорость движения дымовых газов в игольчатых рекуператорах принимают равной 1—4 м/сек, а воздуха 2—10 м/сек. Игольчатые рекуператоры рассчитывают на основании экспериментальных данных. Суммарный коэффициент теплопередачи определяют по графикам или эмпирическим формулам, как сопротивление движению воздуха и продуктов горения.

### 3. Рекуператоры типа термоблок

Рекуператоры типа термоблок представляют собой решетку стальных труб, залитых чугуном (рис. 127, в). Дымовые газы и воздух движутся в них по каналам, расположенным взаимно перпендикулярно.

Рекуператоры этого типа применяют обычно на небольших печах при высокой температуре отходящих газов (до 1200—1300°С). Они позволяют нагревать воздух до 350—450°С, имеют высокую стойкость и хорошую газоплотность. Суммарный коэффициент теплопередачи у них доходит до 40,7 Вт/м<sup>2</sup>·град, что обеспечивает их компактность.

Основной недостаток термоблоков — большой вес (большой расход металла на 1 м<sup>2</sup> поверхности нагрева), поэтому для крупных печей их стараются не применять.

### 4. Радиационные рекуператоры

Радиационные рекуператоры (рис. 128) очень просты по конструкции. По кольцевому каналу, образованному стенками наружной и внутренней труб (цилиндров), подается с большой скоростью (20—30 м/сек) воздух, а внутри трубы движутся дымовые газы со скоростью 0,5—2,0 м/сек.

Радиационные рекуператоры применяют при относительно высокой температуре отходящих газов — 800—1000°С и выше.

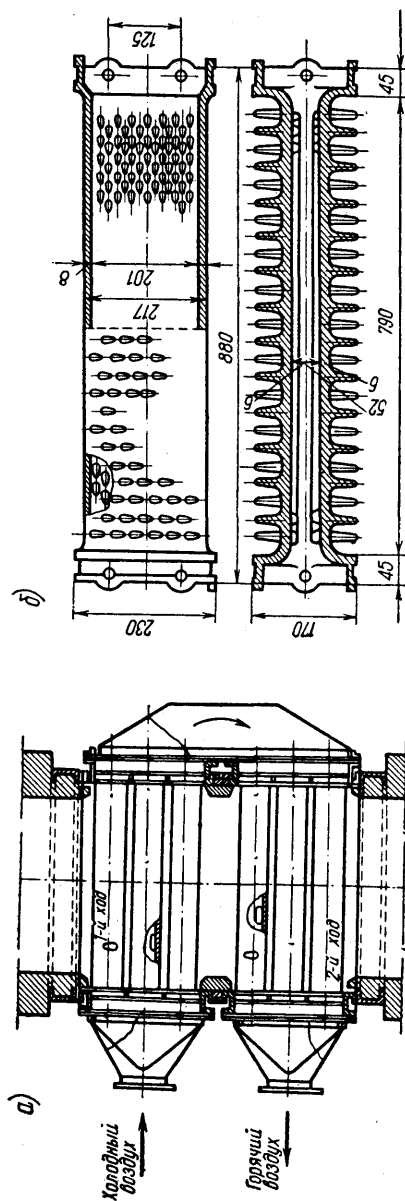


Рис. 127. Рекуператоры игольчатый и типа термоблок:

*а* — двухтрубной игольчатый рекуператор; *б* — труба игольчатого рекуператора типа 880; *в* — общий вид рекуператора типа термоблок с патрубками; *г* — основная часть рекуператора типа термоблок

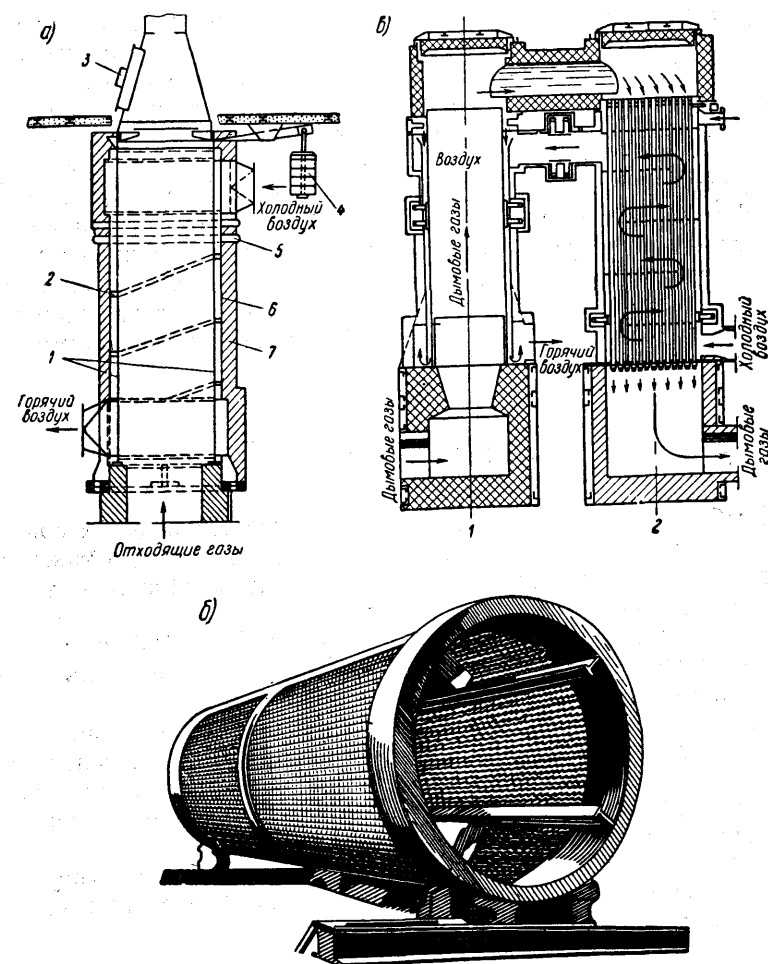
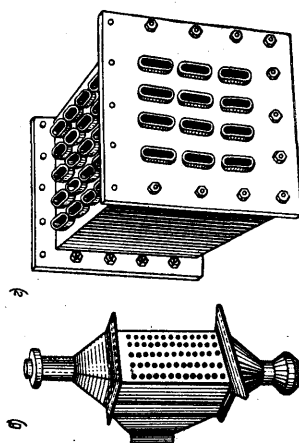


Рис. 128. Радиационные и комбинированный рекуператоры:

*а* — радиационный цилиндрический рекуператор: 1 — внутренний цилиндр; 2 — люк для чистки; 3 — направляющие для воздуха; 4 — противовес; 5 — компенсатор расширения наружного цилиндра; 6 — наружный цилиндр; 7 — теплоизоляция; 8 — радиационный «корзиночный» рекуператор; 9 — комбинированный радиационно-конвективный рекуператор: 1 — радиационная часть; 2 — конвективная часть

Вследствие большой толщины газового слоя и высокой температуры дымовых газов основную роль в теплообмене играет лучеиспускание, при этом рекуператоры работают с высокой нагрузкой ( $11,63\text{--}93 \text{ квт/м}^2$  и  $K=29\text{--}40,7 \text{ вт/м}^2 \cdot \text{град}$ ).

Радиационные рекуператоры имеют малое сопротивление на дымовом тракте и могут хорошо работать без дымососов.

Кроме цилиндрических, радиационные рекуператоры могут быть корзиночные и спиральные. В корзиночных кольцевую щель заменяют рядом трубок малого диаметра, соединяющих два кольцевых коллектора. Продукты горения движутся внутри этого пучка труб (рис. 128, б). В спиральных стенки канала, по которому движутся дымовые газы, состоят из стальных труб, расположенных по спирали. Последние можно применять и для подогрева горючих газов.

## 5. Комбинированные рекуператоры

Комбинированные рекуператоры применяют в целях совмещения положительных качеств отдельных типов, достижения лучшей стойкости и более высокой степени утилизации тепла дымовых газов.

Применяют радиационно-конвективные (рис. 128, в) термо-блочно-игольчатые, термоблочно-трубчатые и другие типы комбинированных рекуператоров.

Радиационно-конвективные рекуператоры можно применять при температуре продуктов горения до  $1300^\circ\text{C}$ , обеспечивая подогрев воздуха до  $600\text{--}800^\circ\text{C}$ . В радиационной части тепло передается главным образом лучеиспусканием, а в конвективной — главным образом конвекцией.

При использовании других комбинированных рекуператоров дымовые газы направляют прежде в наиболее термоустойчивый рекуператор.

## 6. Керамические рекуператоры

Керамические рекуператоры применяют при высокой температуре отходящих газов, когда воздух надо нагревать до  $800\text{--}1100^\circ\text{C}$ . Их собирают из отдельных элементов (камней), изготовляемых из шамота, карбошамота и карборунда. На рис. 129 показаны элементы блочных шамотных и карборундовых рекуператоров и их сборка. Толщина стенок рекуператоров колеблется в пределах  $12\text{--}18 \text{ мм}$ .

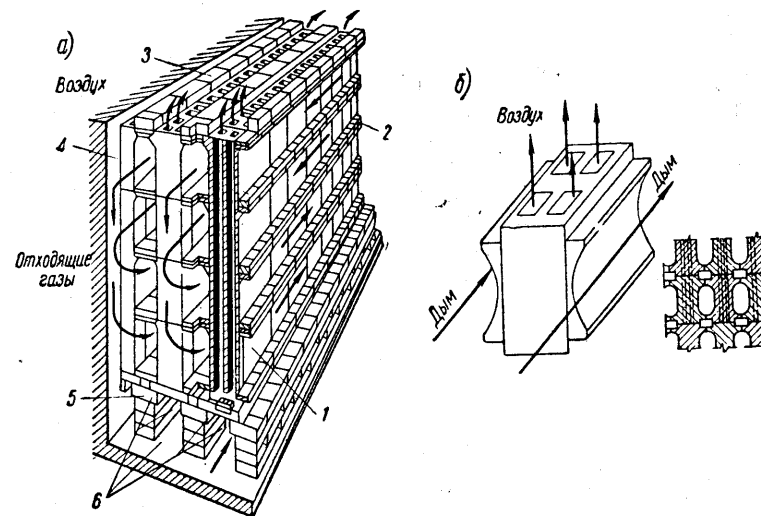


Рис. 129. Керамический рекуператор:

а — рекуператор в сборе: 1 — элемент с четырьмя каналами; 2 — перегородка; 3 — верхние фасонные кирпичи; 4 — боковые элементы; 5 — нижние фасонные кирпичи; 6 — каналы для подвода воздуха;

б — блок (элемент) керамического рекуператора

Для обеспечения газоплотности сборку рекуператоров из блоков выполняют особенно тщательно, применяя для швов специальный огнеупорный цемент.

Скорость воздуха в керамических рекуператорах небольшая —  $w_0=1\text{--}2 \text{ м/сек}$ , а дымовых газов —  $w_0=0,3\text{--}1,0 \text{ м/сек}$ . Суммарный коэффициент теплопередачи невелик —  $k=2,32\text{--}9,3 \text{ вт/м}^2 \cdot \text{град}$ , поэтому рекуператоры получаются очень громоздкими.

При расчете керамических рекуператоров необходимо учитывать, что от 15 до 30% воздуха перетекает в дымовые каналы через неплотности соединения элементов.

## 7. Регенераторы

Регенераторы, которые также используют иногда для подогрева воздуха в нагревательных печах, имеют следующие положительные качества: они могут работать при очень высокой температуре отходящих газов (до  $1500\text{--}1700$ ), что является решающим фактором при выборе способа использования тепла отходящих газов от таких печей, как нагревательные колодцы,

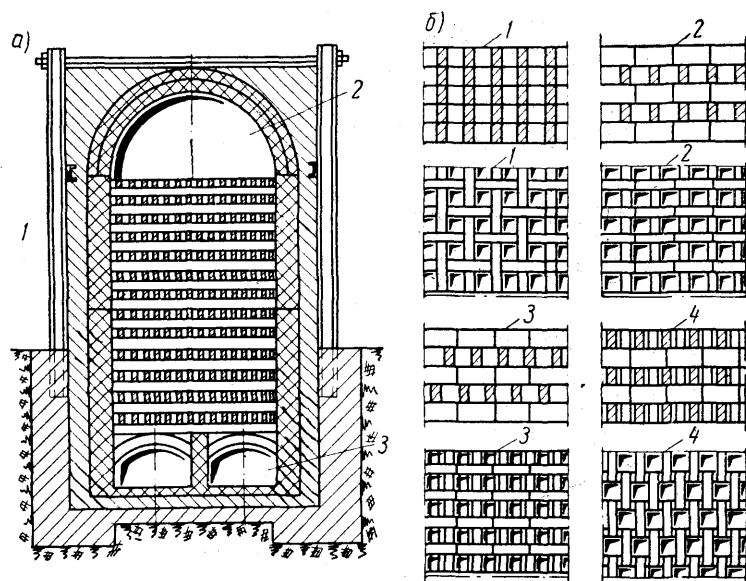


Рис. 130. Камера вертикального регенератора и типы насадок:

а — регенератор: 1 — насадка; 2 — наднасадочное пространство; 3 — поднасадочный канал;  
 б — типы насадок: 1 — насадка со сплошными каналами; 2 — насадка в клетку; 3 — насадка в клетку со смещенными каналами; 4 — насадка с чередующимися рядами

или печи для безокислительного нагрева стали открытым пламенем.

Регенераторы могут устойчиво нагревать воздух до 1000—1200°С. Они надежны в работе и долговечны.

К недостаткам регенераторов относятся: необходимость их периодических переключений и связанная с этим некоторая неравномерность температуры подогрева воздуха; кратковременное прекращение питания печи теплом во время переключения регенераторов; унос некоторого количества газа в дымовую трубу при переключениях (в случае подогрева в регенераторах воздуха и газа); громоздкость конструкции, большой объем и вес.

В зависимости от направления движения воздуха и дымовых газов регенераторы делят на вертикальные и горизонтальные. В подавляющем большинстве случаев применяют регенераторы с вертикальным движением воздуха и газов. При этом продукты горения движутся сверху вниз, а нагреваемый воздух или горючий газ — снизу вверх.

Основной частью каждого регенератора является насадка. Обычно ее выполняют из стандартного кирпича. Применяемые

системы насадок показаны на рис. 130. Специальные огнеупоры для насадок применяют очень редко. Следует отметить, что с уменьшением размеров элементов насадки общие размеры ее уменьшаются, но увеличивается частота переключений и ее сопротивление.

Верхние ряды регенеративных насадок выкладывают из динасового, высокоглиноземистого, магнезито-хромитового или форстеритового кирпича, а нижележащие — из шамота классов А и Б. Ячейки насадки из стандартного кирпича толщиной 65 мм принимают размером 65×65 мм; 80×80 мм; 100×100 мм. Чем меньше размеры ячейки, тем регенератор компактнее, но тем больше его сопротивление движению газов и воздуха.

Основы теории регенераторов и методика расчета описаны в главе V. Соотношение линейных размеров после расчета объема насадки определяют так называемым коэффициентом стройности:

$$k = \frac{H}{\sqrt{hB}}, \quad (408)$$

где  $H$  — высота насадки регенератора;

$h$  — длина;

$B$  — ширина насадки (все размеры в м).

Для равномерного омывания и лучшего использования объема насадки величина коэффициента  $k=1,0-1,2$ .

## 8. Устройства для подогрева воды и котлы-утилизаторы

Кроме подогрева воздуха, тепло отходящих газов нагревательных печей можно использовать для нагрева воды и получения пара.

Нагрев воды теплом отходящих газов можно осуществлять по следующим двум схемам.

По первой схеме в борове печи устанавливают трубчатую поверхность нагрева, к которой подводят холодную воду и отводят горячую к потребителю (рис. 131). По такой схеме воду можно нагревать не выше 50—60°С, так как при более высокой температуре нагрева из воды выпадают растворенные в ней соли и поверхность нагрева быстро засоряется.

По второй схеме поверхность нагрева, установленную в борове, соединяют со змеевиком, расположенным в баке вне боров. Змеевики образуют замкнутый контур, по которому циркулирует чистая (дистиллированная) вода. Эта вода нагревается



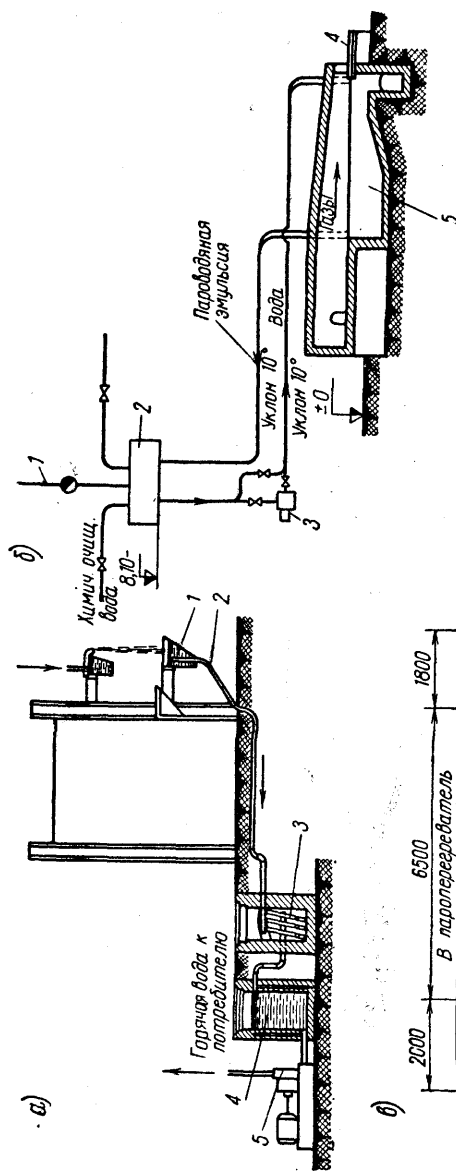
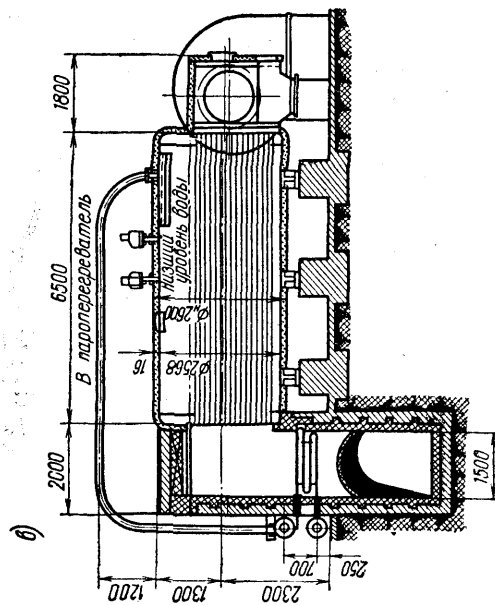


Рис. 131. Устройства для использования тепла:  
 а — водогрейная установка: 1 — воронка; 2 — водопровод; 3 — змеевик в борове; 4 — бак для горячей воды; 5 — насос для подачи горячей воды потребителю;  
 б — схема испарительного охлаждения глиссажных труб методической печи: 1 — свеча с клапаном; 2 — бак-сепаратор; 3 — насос; 4 — заготовки; 5 — глиссажные трубы;  
 в — газотрубный котел-утилизатор



теплом отходящих газов и в баке отдает свое тепло воде, поступающей затем к потребителю. Вторая схема является более надежной и гибкой.

Котлы-утилизаторы, применяемые для использования тепла отходящих газов, можно разделить на три типа: газотрубные, используемые при невысокой температуре отходящих газов ( $Q_{\text{газ}} = 500-850^\circ\text{C}$ ); водотрубные, применяемые при высокой температуре отходящих газов  $900^\circ\text{C}$  и выше, и змеевиковые, которые можно использовать при любой температуре отходящих газов.

В газотрубных котлах дымовые газы передвигаются внутри труб со значительными скоростями. В водотрубных котлах продукты горения омывают трубы снаружи; скорость их принимают меньшую. Змеевиковые котлы состоят из пучка трубок, установленных в дымоходе, и бака-сепаратора. Для них характерны циркуляционные насосы, которые способствуют циркуляции воды и пароводяной эмульсии по змеевикам. Установка котла-утилизатора требует обычно искусственной тяги.

Кроме котлов-утилизаторов, для использования тепла, отводимого водоохлаждаемыми элементами печей (водоохлаждаемыми рамами, заслонками, пятowymi балками, фурмами для горелок и т. д.), в настоящее время применяют так называемое испарительное охлаждение элементов. Каждый водоохлаждаемый элемент соединяют в этом случае двумя трубами с баком-сепаратором. По одной трубе, расположенной в верхней части водоохлаждаемого элемента, пароводяная эмульсия поступает в бак-сепаратор, где она сепарируется, пар направляется к потребителю, а вода по другой трубе опять направляется в водоохлаждаемый элемент. В бак-сепаратор непрерывно должна подаваться очищенная вода. В некоторых случаях систему испарительного охлаждения можно присоединять к баку-сепаратору змеевикового котла-утилизатора.

## ПЛАМЕННЫЕ ПЕЧИ ДЛЯ НАГРЕВА МЕТАЛЛА

### § 61. КЛАССИФИКАЦИЯ ПЕЧЕЙ

Нагревательные пламенные печи используют в прокатных и кузнечных цехах для нагрева металла перед обработкой давлением, а также для нагрева его под термообработку.

Типы и конструкции пламенных нагревательных печей очень разнообразны, поэтому их классифицируют по технологическим и конструктивным признакам.

По технологическому признаку печи можно разделить на печи для нагрева под прокатку, печи для нагрева под ковку и штамповку и печи для нагрева под термообработку. По температуре нагрева печи делят на низкотемпературные с  $t_{\text{нагр}} = 150—600^\circ\text{C}$ , среднетемпературные с  $t_{\text{нагр}} = 600—1000^\circ\text{C}$  и высокотемпературные с  $t_{\text{нагр}} > 1000^\circ\text{C}$ .

По конструктивным признакам печи можно разделить на печи с периодической загрузкой (камерные) и печи с непрерывной загрузкой (полуметодические, методические и различного типа проходные — механизированные). В первых металл в процессе нагрева остается неподвижным: загрузка и выдача продукции происходит обычно через одно и то же окно, во вторых металл в процессе нагрева передвигается от места загрузки к месту выдачи. Загрузка и выдача продукции происходит в разных местах и через разные окна.

По роду топлива пламенные печи делят на печи, работающие на твердом топливе (кусковом или пылевидном), печи, работающие на жидком топливе, и печи, работающие на газообразном топливе.

По способу использования тепла отходящих газов различают печи без использования тепла отходящих газов, рекуперативные и регенеративные печи (подогрев воздуха, поступающего для горения топлива), печи с использованием тепла от-

ходящих газов на цели, не связанные с работой самой печи (подогрев воды, получение пара, сушка влажного материала и т. д.), и печи с использованием тепла на подогрев нагреваемого материала.

По расположению топki относительно рабочего пространства печи бывают с верхней, нижней и боковой топками, с топкой, совмещенной с рабочей камерой, и муфельные печи (металл в муфеле или горение топлива в муфеле — печи с радиационными трубами).

В табл. 63—64 приведен перечень основных типов пламенных печей, применяемых в прокатных и кузнечных печах.

Основные требования, предъявляемые к нагревательным печам, следующие: 1) обеспечение высокой производительности при минимальном удельном расходе топлива; 2) возможность легкого и надежного регулирования производительности и температуры печи в необходимых пределах; 3) высокая стойкость кладки, каркаса, теплоиспользующих устройств и других частей печи; 4) возможность автоматизации управления тепловым режимом и всей работой печи.

### § 62. НАГРЕВАТЕЛЬНЫЕ ПЕЧИ ПРОКАТНЫХ И ТРУБОПРОКАТНЫХ ЦЕХОВ

#### 1. Нагревательные колодцы

Нагревательные колоды применяют для нагрева крупных слитков (толщиной более 400 мм) перед прокаткой на обжимных станах. Слитки загружают в печь сверху краном через отверстие, закрываемое откатывающейся в сторону крышкой.

Во время нагрева слитки находятся в вертикальном положении, что обеспечивает быстрый и равномерный нагрев без смещения усадочной раковины (если нагреваются слитки, не полностью затвердевшие после отливки).

Чтобы обеспечить высокую производительность и небольшой удельный расход топлива в колодцах, стремятся нагревать слитки, не остывшие после извлечения их из изложниц. Температура слитков горячего посада колеблется в пределах  $650—950^\circ\text{C}$ . Горячие слитки составляют 80—85% от общего количества нагреваемого металла, при хорошей организации работы — до 95%.

Нагревательные колодцы могут работать как с постоянным, так и переменным во времени тепловым и температурным режимом.

Таблица 63

## Печи прокатных и трубопрокатных цехов

Тип печи	Конструкция	Топливо	Назначение
Камерные печи с периодической загрузкой	Нагревательные колодцы (регенеративные и рекуперативные)	Газообразное и реже жидкое топливо	Нагрев слитков под прокатку на обжимных станах
	Печи с выдвижным подом	Газообразное и реже жидкое топливо	Нагрев слитков под прокатку (редко) и нагрев проката под термообработку
	Колпаковые печи	То же	Нагрев под термообработку листов, рулонов, мотков проволоки и т. п.
Печи с непрерывной загрузкой	Методические толкательные, двухзонные и трехзонные печи	Жидкое и газообразное, очень редко твердое топливо	Нагрев под прокатку слитков и заготовок
Печи с непрерывной загрузкой	Рольные печи	Жидкое и газообразное	Нагрев цилиндрических заготовок в трубопрокатных цехах
	Печи с вращающимся подом	То же	Нагрев под прокатку слитков и заготовок чаще в трубопрокатных и колесопрокатных цехах
	Секционные печи скоростного нагрева	Газообразное и жидкое топливо	Нагрев под редуцирование и термообработку труб в трубопрокатных цехах
	Печи с шагающим и с роликовым подом. Конвейерные печи	То же	Нагрев под обработку давлением и термообработку листового и реже сортового проката

Таблица 64

## Печи кузнечных цехов

Тип печи	Конструкция	Топливо	Назначение
Камерные с периодической загрузкой	Горны	Каменный уголь, кокс, древесный уголь	Нагрев мелких ( $d \leq 40$ мм) стальных заготовок под ковку и гибку
	Очковые печи	Жидкое и газообразное	Нагрев концов небольших ( $d \leq 60$ мм) заготовок под высадку
	Щелевые печи	То же	Нагрев небольших заготовок ( $d \leq 80$ мм) и концов длинных заготовок под ковку и штамповку
Камерные с периодической загрузкой	Камерные печи со стационарным подом	Жидкое, газообразное, твердое	Нагрев мелких, средних и крупных заготовок и слитков под ковку, штамповку и термообработку
	Печи с выдвижным подом	Жидкое и газообразное	Нагрев средних и крупных слитков и заготовок ( $d \geq 250-300$ мм) под ковку. Нагрев поковок под термообработку
	Печи безокислительного нагрева с двухкамерным сжиганием топлива и муфельные печи с защитной атмосферой	Высококалорийные газы	Безокислительный нагрев стальных заготовок под ковку и штамповку
Камерные механизированные с непрерывной загрузкой	Проходные толкательные печи	Жидкое и газообразное	Нагрев заготовок под ковку, штамповку, гибку. Нагрев поковок под термообработку
	Перекатные с наклонным подом	То же	Нагрев цилиндрических заготовок при перекачивании их под действием своего веса

Тип печи	Конструкция	Топливо	Назначение
	Карусельные печи тарельчатого типа	Жидкое и газообразное	Нагрев мелких и средних заготовок, различных по форме
	Печи с шагающим подом	То же	Нагрев листового, полосового и пруткового материала до 1100—1150°C
Камерные механизированные с непрерывной загрузкой	Конвейерные печи с наружным конвейером	»	Нагрев конца длинных заготовок под штамповку или высадку
	Конвейерные печи с подподовым конвейером	»	Нагрев заготовок под штамповку и термообработку до 1000—1100°C
	Печи скоростного нагрева	»	Нагрев под штамповку мелких заготовок
Полуметодические и методические печи с непрерывной загрузкой	Полуметодические толкательные печи	Жидкое и газообразное	Нагрев небольших и средних заготовок правильной формы под ковку и штамповку
	Методические двухзонные и трехзонные печи	Жидкое и газообразное, редко твердое	Нагрев под ковку и штамповку крупных заготовок и небольших слитков
	Печи с вращающимся подом	Жидкое и газообразное	Нагрев под ковку, штамповку и термообработку различных по форме заготовок и поковок
	Методические печи безокислительного нагрева	Высококалорийные газы	Безокислительный нагрев заготовок и небольших слитков
	Полуметодические печи с окончательным нагревом в расплавленном стекле	Мазут, высококалорийные газы	Безокислительный нагрев небольших заготовок

Постоянный температурный режим можно устанавливать в больших по размеру колодцах, когда на место выданного нагретого слитка ставят холодный. В этом случае слитки сразу попадают в атмосферу высокой температуры, что при нагреве холодных слитков допустимо только для низкоуглеродистой стали.

При работе с переменным режимом слитки загружают в коловец партиями (садками). Тепловой и температурный режимы камеры могут меняться во времени в соответствии с потребностью в тепле и с термофизическими свойствами стали. В этом случае обеспечивается нагрев более высокого качества. Для работы при таком режиме применяют обычно колодцы меньших размеров. Практически в большинстве случаев устанавливают этот режим.

Шлак можно удалять двумя способами. При форсированной работе колодца шлак удаляют в жидком виде. Он вытекает через летку, обогреваемую специальной горелкой.

При работе колодцев без сильной форсировки шлак удаляют в сухом виде. В этом случае на под насыпают кокс, который впитывает шлак. Этот кокс со шлаком периодически приходится удалять и заменять новым.

Шлакоудаление в жидком виде требует меньшей затраты труда, поэтому применяется чаще.

Производительность колодца характеризуется количеством его оборотов в год:

$$G = 0 \cdot E = \frac{8000}{\tau} \cdot E [T/\text{год}], \quad (409)$$

где  $0 = \frac{8000}{\tau}$  — число оборотов колодца в год;

$E$  — емкость колодца,  $T$ ;  
8000 — количество часов работы колодца в год;  
 $\tau$  — длительность оборота колодца, ч.

Длительность оборота колодца складывается из времени посадки слитков —  $\tau_1$ ; времени нагрева —  $\tau_2$  и ожидания выдачи —  $\tau_3$ ; времени выдачи садка —  $\tau_4$  и времени подготовки и ожидания посадки новой порции —  $\tau_5$ . Время  $\tau_3 + \tau_5$  обычно составляет 25—30% от общего времени.

Камера одного колодца называется ячейкой. Ячейки объединяют в группу, обслуживаемую одной дымовой трубой и общим щитом контрольно-измерительных и управляющих приборов.

В настоящее время известны следующие основные конструкции нагревательных колодцев: 1) регенеративные; 2) рекуперативные с отоплением из центра подины; 3) рекуперативные

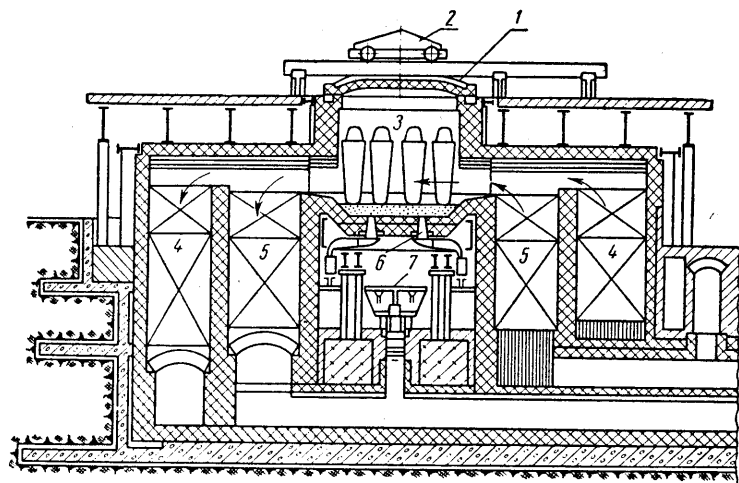


Рис. 132. Регенеративный нагревательный колодец:

1 — крышка; 2 — механизм для подъема и откатывания крышки; 3 — камера колодца; 4 — воздушный регенератор; 5 — газовый регенератор; 6 — отверстие для спуска шлака или чистки пода; 7 — шлаковня на тележке

с двумя верхними горелками; 4) рекуперативные с одной верхней горелкой; 5) круглые с тангенциальными нижними горелками; 6) электрические нагревательные колодцы.

Регенеративные колодцы (рис. 132) работают обычно на низкокалорийном газе (доменном или смешанном коксо-доменном) с подогревом в регенераторах и воздуха и газа. Это позволяет работать с применением форсированного режима и большой производительностью: 1700—1900 оборотов в год (до 300 000 т в год на группу емкостью 24 слитка и до 370 000 т в год на группу емкостью 32 слитка), при удалении шлака в жидком виде и с удельным расходом условного топлива  $37 \div 42 \text{ кг усл. топл/т}$  ( $\eta_{\text{терм}}=28\%$ ,  $\eta_{\text{эфф}}=45,5\%$ ). Однако регенеративные колодцы имеют ряд недостатков: 1) неравномерность нагрева (слитки, установленные ближе к регенераторам, перегреваются и оплавляются); 2) повышенный угар вследствие несовершенства горелочного устройства и работы с избытком воздуха (10—15%); 3) необходимость применения в оборудовании перекидных клапанов; 4) сложность автоматизации управления тепловым режимом. Вследствие этих недостатков регенеративные колодцы в СССР не строят.

Рекуперативные колодцы с отоплением из центра подины (рис. 133, а) работают обычно на смешанном (коксо-доменном) газе с теплотворностью  $5860\text{—}6700 \text{ кДж/м}^3$  при н. ф. у. Воздух

для горения подогревают до  $800\text{—}850^\circ \text{C}$  в керамических рекуператорах. Форма ячеек — квадратная со стороной около 5 м. Слитки устанавливают вдоль стен. Они находятся в одинаковых условиях относительно источника тепла. Это обеспечивает одинаковый нагрев всех слитков, хотя обычно имеется некоторая неравномерность нагрева по высоте (вверху температура на  $100\text{—}150^\circ \text{C}$  выше, чем внизу). Производительность на группу из двух колодцев с посадкой 20—24 слитков весом  $6\text{—}7 \text{ т}$  — 195 000 т в год, а на группу с посадкой 28—32 слитков весом  $6\text{—}7 \text{ т}$  — 300 000 т в год. Удельный расход условного топлива —  $34\text{—}42 \text{ кг усл. топл/т}$  ( $\eta_{\text{терм}}=31,9\text{—}35,8\%$ ;  $\eta_{\text{эфф}}=40,5\text{—}47,5\%$ ), тепловая мощность —  $5\text{—}7 \text{ млн. квт}$ . Колодцы этого типа работают с несколько меньшей производительностью, чем регенеративные, но зато не имеют перечисленных выше недостатков.

Стены колодцев обычно выполняют из диноса, подину — из шамота и хромомagnesита, а крышки футеруют шамотом класса А или каолиновым кирпичом.

Рекуперативные колодцы с двумя верхними горелками (рис. 133, б) могут работать на смешанном и высококалорийных газах, а также на жидком топливе. Горелки в них расположены по диагонали в верхней части камеры. Такое расположение горелок создает циркуляцию газов как в горизонтальной, так и в вертикальной плоскостях.

Преимущество этих колодцев по сравнению с колодцами, отапливаемыми из центра, заключается в возможности увеличить использование площади пода от 30 до 45% при установке слитков не только у стен, но и в середине камеры. В остальном их показатели аналогичны показателям колодцев, отапливаемых из центра.

Рекуперативные колодцы с одной верхней горелкой показаны на рис. 133, в. Эти колодцы приобретают в последнее время все большее значение, так как компоновка их в цехе обеспечивает наибольшую производительность на 1 м (или на  $1 \text{ м}^2$ ) отделения колодцев, что очень важно для станов производительностью  $4,5\text{—}5 \text{ млн. т}$  в год.

Эти колодцы можно отапливать средне- и высококалорийными газами, а также мазутом. Воздух подогревают в рекуператоре, расположенном с одной стороны от камеры. В камере, имеющей размеры  $9\div 10$  на  $2,5\text{—}3,0 \text{ м}$ , располагают  $16\text{—}18$  слитков в два ряда (коэффициент загрузки  $\sim 40\%$ ).

Необходимость равномерного обогрева одной горелкой такой длинной камеры требует применения длиннопламенных горелок специальной конструкции. В начале цикла при максимальном расходе топлива слитки, находящиеся у стенки противополож-

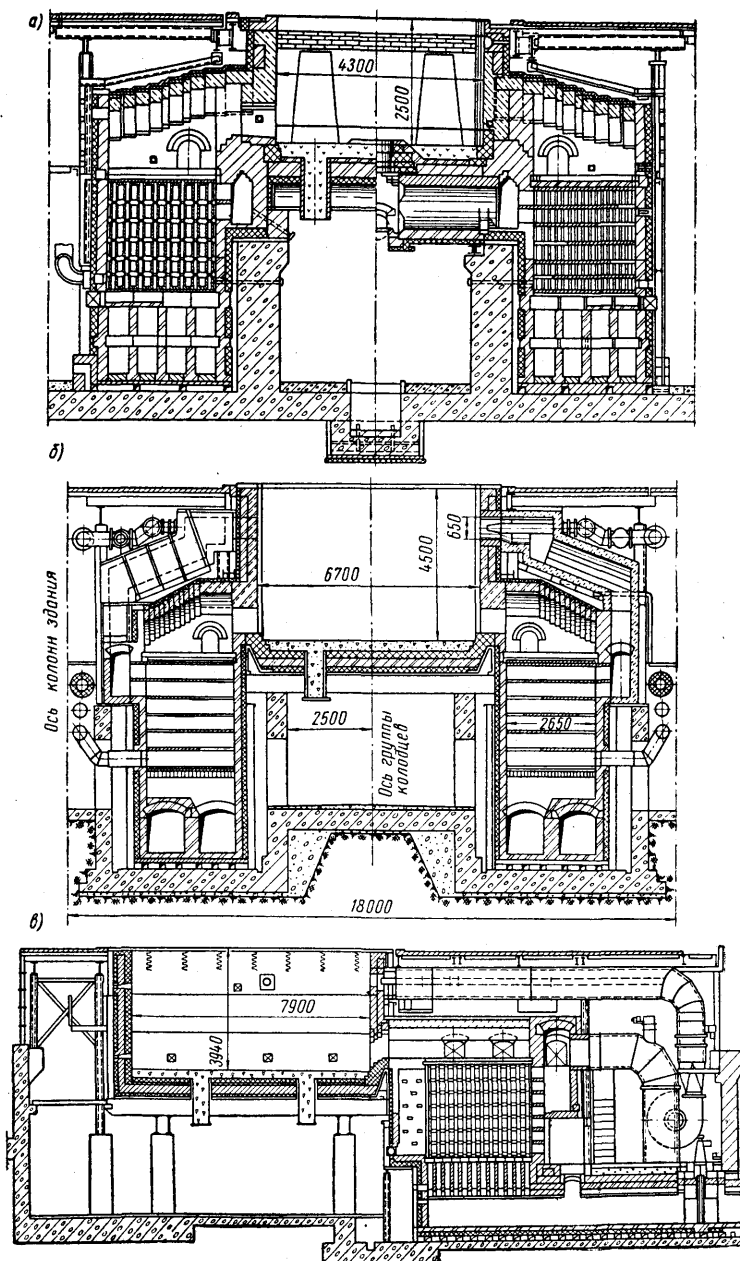


Рис. 133. Рекуперативные нагревательные колодцы:

а — с отоплением из центра подины; б — с отоплением с двух сторон сверху; в — с отоплением с одной стороны сверху

ной горелке, нагреваются быстрее. Затем по мере уменьшения расхода топлива поворот факела смещается ближе к горелкам и все слитки прогреваются более или менее равномерно. Колодцы работают обычно при сухом шлакоудалении. Иногда применяют комбинированные рекуператоры. Воздух, нагретый в керамическом рекуператоре, эжектируется горячим воздухом, нагретым в металлическом рекуператоре, установленном после керамического.

Круглые колодцы с тангенциальными нижними горелками в СССР не строили из-за опасности перегрева граней слитков, обращенных к горелкам, и трудности их компоновки в цехе.

## 2. Электрические нагревательные колодцы

В последнее время в странах, богатых электрической энергией (Швеция, Норвегия и др.), применяются электрические колодцы. Слитки в них нагреваются теплом, выделяющимся при прохождении электрического тока через нефтяной кокс, засыпаемый в карборундовые желоба. Такие колодцы особенно пригодны для нагрева высококачественных сталей. По литературным данным, расход энергии в них равен 58—70 кВт-ч/1000 кг. Расход нефтяного кокса — 0,5 кг/1000 кг. Угар металла в этих колодцах снижается до 0,2—0,3 против 2,0—2,5% — в обычных пламенных.

Камерные печи с неподвижным и выдвижным подом для нагрева слитков и заготовок под прокатку в настоящее время применяют редко. Конструкции их описаны ниже.

## 3. Методические толкательные печи

Печи этого типа, в которых продукты горения движутся навстречу нагреваемому металлу, очень широко применяют в прокатных цехах для нагрева под прокатку квадратных, прямоугольных и многогранных слитков и заготовок. По температурному режиму и передаче тепла методические печи делят на двухзонные и трехзонные, на печи с односторонним и двусторонним обогревом (см. главу VI).

В последнее время для увеличения производительности строят печи со сдвоенной сварочной зоной.

Методические печи могут работать на газообразном, жидком и твердом топливе. По способу выдачи нагретого металла их можно разделить на печи с боковой и печи с торцевой выдачей. Последние не требуют специального механизма для выталкивания нагретых слитков, но угар металла в них обычно несколько выше, вследствие подсоса воздуха через окно выдачи.

Слитки или заготовки проталкивают через печь обычно винтовые электрические толкатели по водоохлаждаемым или неохлаждаемым балкам (глиссажные шины — стеллюги).

Водоохлаждаемые глиссажные шины применяют при двустороннем обогреве металла. Это повышает производительность печи (напряженность пода), но приводит к значительным потерям тепла с охлаждающей водой (до 30% введенного в печь тепла). Печи с односторонним обогревом работают с напряженностью пода 200—300 кг/м<sup>2</sup>·ч и удельным расходом тепла топлива 1674—2092 кдж/кг печи с двусторонним обогревом — с напряженностью пода 400—500 кг/м<sup>2</sup>·ч и выше и удельным расходом тепла 2092—2720% кдж/кг. В целях экономии топлива необходимо теплоизолировать водоохлаждаемые глиссажные шины и поддерживающие их балки, а также применять испарительное охлаждение (см. рис. 131, б).

При нагреве металла до температур ниже 1200°С окалина получается сухая, которую легко удалять с пода. При нагреве металла до температур выше 1200°С окалина сваривается с подом, под около окна выдачи начинает расти и его периодически приходится чистить (сбивать окалину), что является очень трудоемкой работой.

Методические печи, работающие на низкокалорийном топливе — доменном, смешанном (коксо-доменном) и генераторном газе ( $Q_H^P = 3766—8368$  кдж/м<sup>3</sup> при н. ф. у.) показаны на рис. 134, а.

Для получения необходимой температуры и производительности печи работают с подогревом воздуха до температур 500—600°С, а при использовании газа с теплотворной способностью  $Q_H^P \leq 6694$  кдж/кг и газа — до 300—500°С.

Воздух обычно подогревают в керамических рекуператорах, а газ — в металлических (трубчатых). Газ сгорает в инжекторных горелках и горелках частичного смешения. Инжекторные горелки обеспечивают вполне удовлетворительные результаты работы печи при низких калориметрических температурах ( $t_K \leq 1750$ ), тогда как горелки частичного смешения требуют температуры  $t_K = 1850—1900^\circ\text{C}$ .

Методические печи, работающие на высококалорийных газах и жидком топливе показаны на рис. 134, б и в.

При работе печей на этих видах топлива подогрев воздуха для получения необходимой температуры не обязателен, но в целях повышения использования тепла и улучшения условий горения следует рекомендовать подогрев воздуха в рекуператорах до 250—400°С. В дальнейшем тепло отходящих газов следует использовать в котлах-утилизаторах. Сжигание газа в

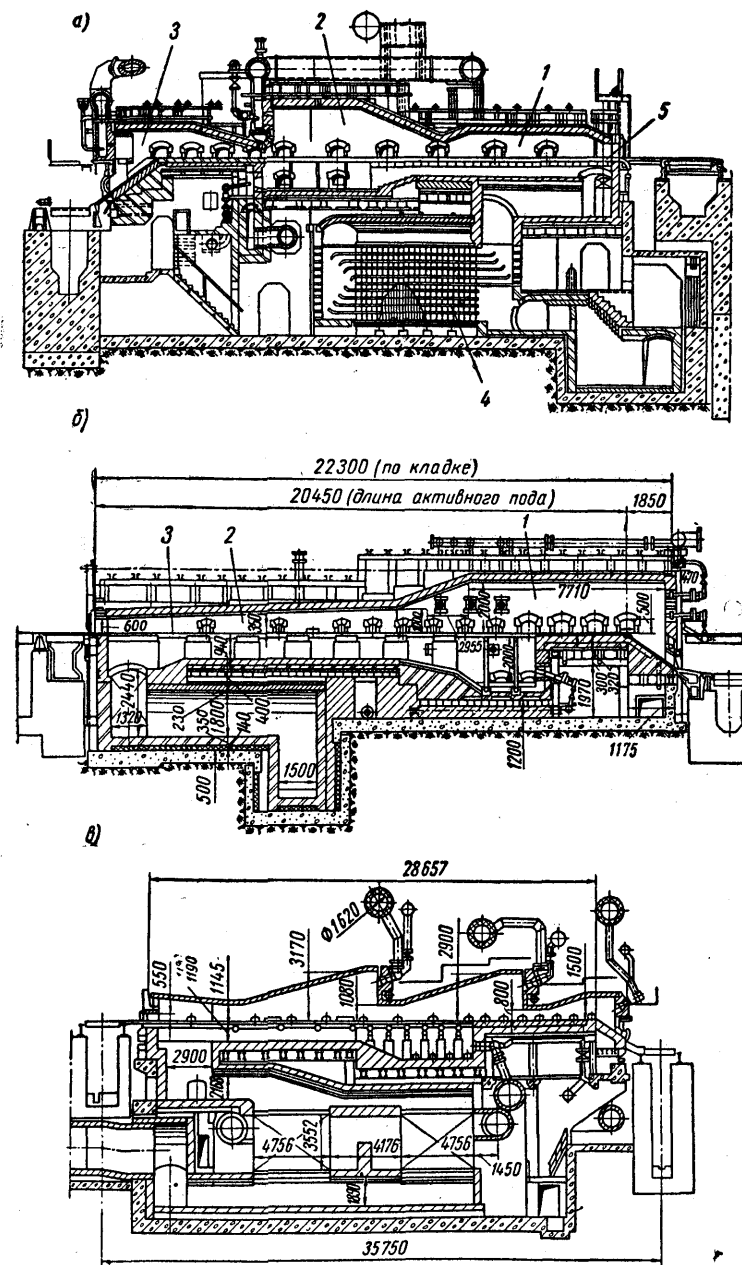


Рис. 134. Методические нагревательные печи:

- а — трехзонная рекуперативная печь, работающая на смешанном газе ( $Q_H^P = 8400$  кдж/м<sup>3</sup>): 1 — зона подогрева; 2 — сварочная зона; 3 — томильная зона; 4 — керамический рекуператор; 5 — глиссажные трубы;  
 б — двухзонная печь, работающая на высококалорийном топливе: 1 — сварочная зона; 2 — зона подогрева; 3 — глиссажные трубы;  
 в — печь, работающая на высококалорийном газе, со сложной сварочной зоной и двумя керамическими рекуператорами

таких печах чаще всего происходит в горелках частичного смешения, турбулентных, щелевых и др.

Сжигание мазута в методических печах осуществляется с помощью форсунок высокого и среднего, реже низкого давления.

В настоящее время разрабатывают конструкции методических печей безокислительного нагрева при неполном горении высококалорийного газа с воздухом, подогретым до высоких температур в томильной и сварочной зонах и последующим дожиганием его в зоне подогрева.

#### 4. Ролевые печи

Ролевые печи относятся к методическим печам, предназначенным для нагрева цилиндрических слитков и заготовок, в которых происходит перекачивание слитков или заготовок по наклонному поду от окна загрузки к окну выдачи.

Печи этого типа широко применяли в трубопрокатных (и колесопрокатных) цехах для нагрева заготовок под прошивку и другие операции. Они требуют большой затраты ручного труда и работают с повышенным угаром (до 3—4%) по сравнению с обычными методическими печами вследствие нарушения слоя окалины при кантовках.

В настоящее время печи этого типа заменяют другими — механизированными, например печами с вращающимся подом.

#### 5. Кольцевые печи с вращающимся подом

В печах этого типа удобно транспортировать слитки и заготовки любой формы от места загрузки к месту выдачи. В настоящее время печи такого типа широко применяют в трубопрокатных и колесопрокатных цехах. Размеры их следующие: наружный диаметр до 30 м и более, а ширина вращающегося пода — 4—6 м. Эти печи работают обычно на газообразном или жидком топливах при использовании тепла отходящих газов в рекуператорах, установленных в дымоходах отдельно от печи.

Горелки и форсунки располагают на наружных и внутренних кольцевых стенах, устанавливая их в соответствии с требуемым температурным режимом. В трубопрокатных и колесопрокатных цехах печи работают обычно по методическому ре-

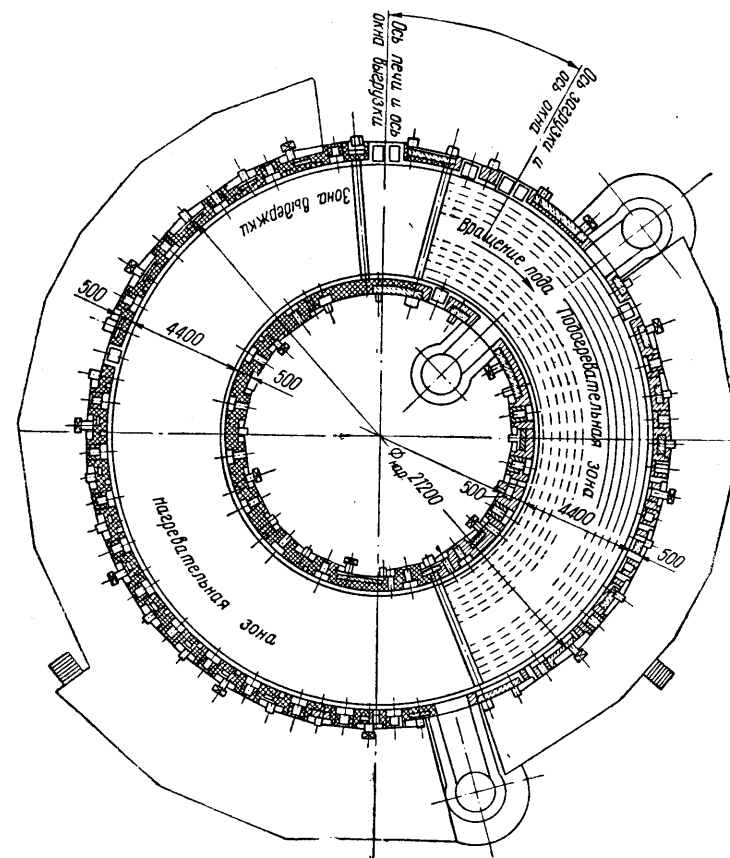
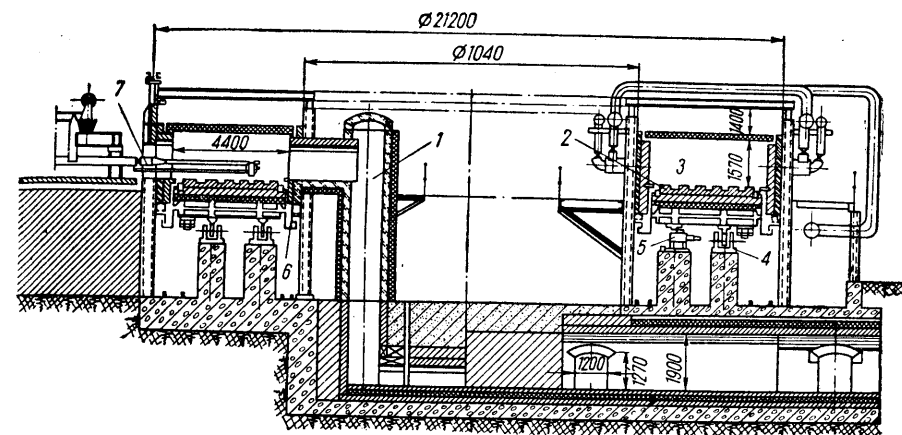


Рис. 135. Методическая печь с вращающимся кольцевым подом:  
1 — канал для отвода дымовых газов; 2 — вращающийся под; 3 — рабочее пространство, перекрытое плоским подвесным сводом; 4 — опорный ролик; 5 — упорный ролик; 6 — песочный затвор; 7 — загрузочная машина



жиму: газы движутся навстречу вращающемуся поду и металл вместе с подом попадает из зоны подогрева в зону высоких температур (сварочную), а затем в тоильную (рис. 135). Загрузку и выдачу нагреваемых слитков и заготовок выполняют специальные машины через окна в наружной кольцевой стене печи. Места загрузки и выдачи разделяют подвесной стенкой (перегородкой). Однако печи этого типа могут работать и как проходные с постоянной температурой камеры и с загрузкой на открытый сектор вращающегося пода.

Подины кольцевых печей выкладывают из высококачественных огнеупоров, хорошо противостоящих воздействию окислительной среды (высокоглинозистые, хромомagneзитовые и др.). Своды устраивают арочные и подвесные (при ширине пода более 3,5—4 м) из шамота класса А.

Кольцевые печи, работающие по методическому режиму, характеризуются напряженностью пода 200—400 кг/м<sup>2</sup>·ч и удельным расходом тепла 1674—2510 кДж/кг, а также несколько пониженным по сравнению с обычными методическими печами угаром.

## 6. Секционные печи скоростного нагрева

Печи этого типа (рис. 136) применяют для нагрева круглых заготовок (диаметром до 150÷200 мм) под прокатку и для нагрева труб разных диаметров под термообработку.

Такие печи можно встроить в производственный поток. Они состоят из ряда секций с установленными между ними водоохлаждаемыми роликами. Ролики располагают под небольшим углом (6—8°) к направлению движения нагреваемой заготовки. Вследствие этого заготовки или трубы получают вместе с поступательным вращательное движение вокруг своей оси. Секция представляет собой небольшую камеру с высокой тепловой нагрузкой. Печи этого типа работают обычно на газообразном топливе. На каждую секцию устанавливают 4÷6 горелок, располагаемых над и под нагреваемым металлом.

Воздух, а в большинстве случаев и газ, подогревают в рекуператорах: воздух до 200—600°С, а газ до 200—350°С.

Рекуператоры типа термоблок трубчатые и радиационные можно размещать сверху — над секцией или внизу — под секцией. Для эффективной работы печи температура в камере секции должна быть в пределах 1450—1500°С.

Скорость движения заготовок определяют по формуле

$$w = \frac{L}{60n} \text{ [м/мин]}, \quad (410)$$

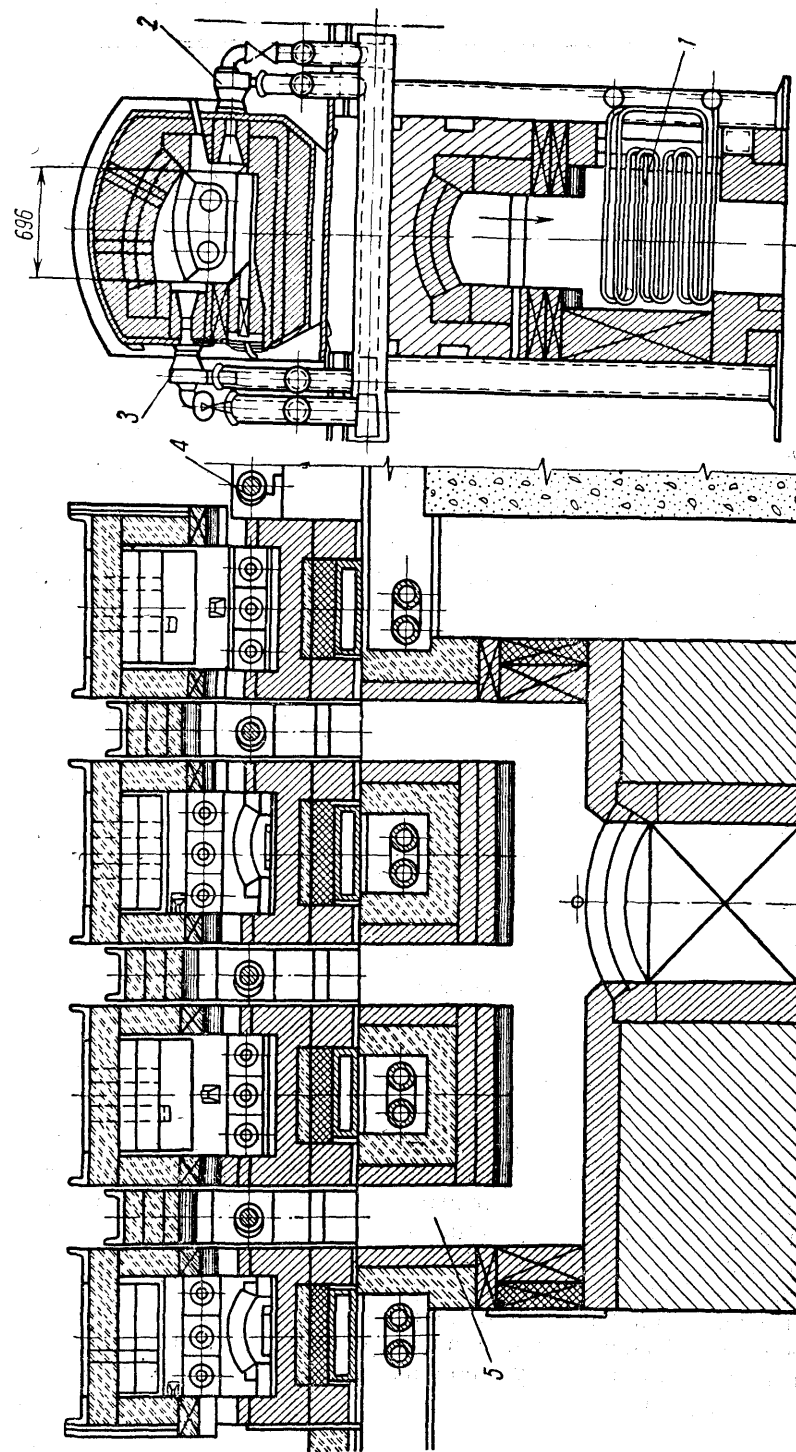


Рис. 136. Секционная печь с нижним расположением рекуператоров для непрерывного скоростного нагрева круглых заготовок и труб: 1 — трубчатый рекуператор; 2 — нижняя двухпроводная газовая горелка; 3 — верхняя горелка; 4 — ролик для перемещения заготовок и труб; 5 — канал для отвода продуктов горения



## 2. Очковые печи

Печи этого типа выполняют в виде камеры, в стенках которой имеются круглые или прямоугольные отверстия для загрузки нагреваемых заготовок. Печи могут быть стационарные и поворотные. В стационарных печах рабочая камера имеет обычно прямоугольную форму. С одной стороны в ней устанавливают горелку, а три остальные стенки служат для загрузки материала. Во вращающихся печах (рис. 137, б) рабочую камеру выполняют круглой или многоугольной. Горелку или форсунку ставят снизу или сверху. Продукты горения отводят под зонт. Печи этого типа применяют для нагрева концов небольших заготовок под высадку или штамповку (чаще всего в производстве болтов, заклепок, гаек и подобных деталей). Производительность печей высокая, но к. п. д. низкий ( $\leq 10\%$ ).

## 3. Щелевые печи

Щелевые печи (рис. 138, а) выполняют в сварных кожухах. Они имеют прямоугольную форму. В одной из длинных сторон (редко в обеих) устраивают невысокое окно без крышки (щель) для загрузки нагреваемого материала. Печи могут работать на газообразном и жидком топливах. Горелки или форсунки устанавливают с одной или с двух сторон параллельно стенке со щелью. Продукты горения отводят по каналам в кладке или через рабочую щель и пространство между стенкой печи и водоохлаждаемым защитным щитом под зонт. Иногда над каналами для отвода дымовых газов устанавливают рекуператоры типа термоблок или трубчатые для небольшого подогрева воздуха.

Печи этого типа служат для нагрева под высадку концов длинных прутков и штанг, а также под штамповку небольших и средних заготовок. Они удобны тем, что их можно краном переносить с места на место. Их к. п. д. обычно невысок (5—12%).

## 4. Камерные печи со стационарным подом

Печи этого типа можно разделить на малые, средние и крупные. Они работают на газообразном, жидком и реже твердом топливе.

Малые печи с площадью пода от 0,3 до 1,5 м<sup>2</sup> служат для нагрева под ковку и штамповку заготовок весом до 1,5—2 кг. По конструкции они аналогичны щелевым печам, только имеют окно, закрываемое крышкой.

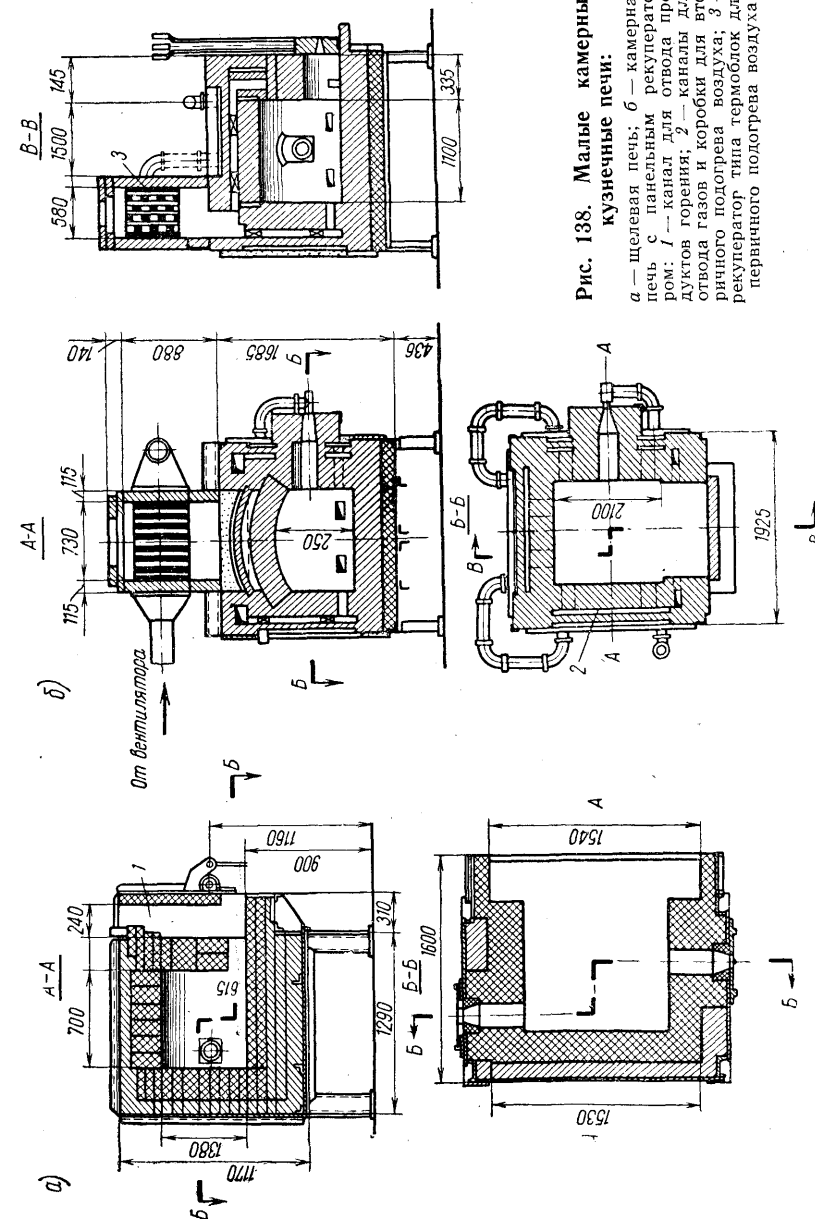


Рис. 138. Малые камерные кузнечные печи:  
а — щелевая печь; б — камерная печь с панельным рекуператором; 1 — канал для отвода продуктов горения; 2 — каналы для отвода газов и короби для вторичного подогрева воздуха; 3 — рекуператор типа термоблок для первичного подогрева воздуха

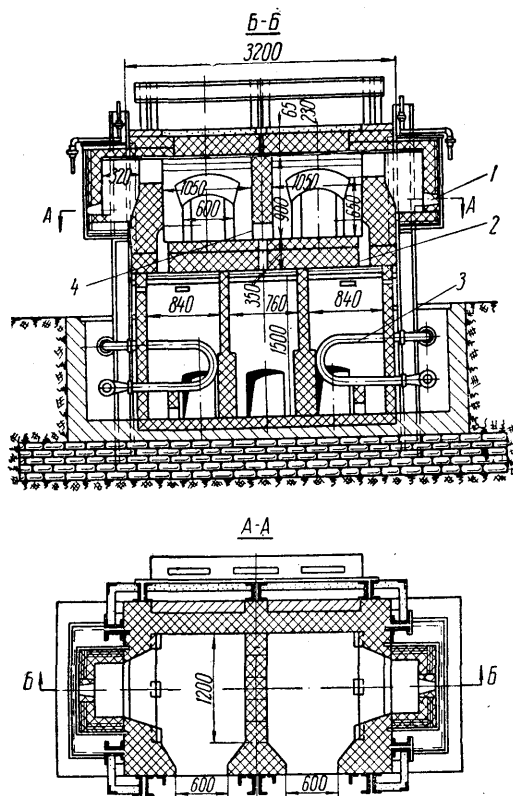


Рис. 139. Двухкамерная нагревательная печь:  
1 — ось форсунки; 2 — канал для отвода продуктов горения; 3 — трубчатый воздухоподогреватель; 4 — канал, соединяющий камеры

Печи этого типа работают часто садками, что приводит к простоям пресса или молота, обслуживаемого печью, из-за ожидания нагрева садки.

В целях уменьшения простоев и улучшения использования тепла топлива рационально печи этого типа делать двухкамерными, причем можно отапливать одну камеру, а вторая, использующая тепло отходящих газов первой, будет подогревательной. Материал загружают сначала в подогревательную камеру. После выработки садки из нагревательной камеры переносят в нее подогретый до определенной температуры материал. Время прогрева садки, а значит и простоя машины-орудия, сильно сокращается.

На рис. 138, б, показана небольшая печь, оборудованная рекуператором типа термоблок и панельным рекуператором (в виде металлических коробок, заделанных в кладку). Такая конструкция обеспечивает подогрев воздуха до 350—400°С и довольно высокий к. п. д. (до 25—30%).

Средние камерные печи имеют площадь пода в пределах 1,5—5 м<sup>2</sup>. Они предназначены для нагрева заготовок массой от 1,5—2,0 до 12—15 кг. Кладку таких печей выполняют чаще в жестких или подвижных каркасах и реже в кожухах. Они могут иметь одно, два или несколько окон. Дымовые газы можно отводить как под зонт, так и в дымовую трубу, обслуживающую обычно группу печей.

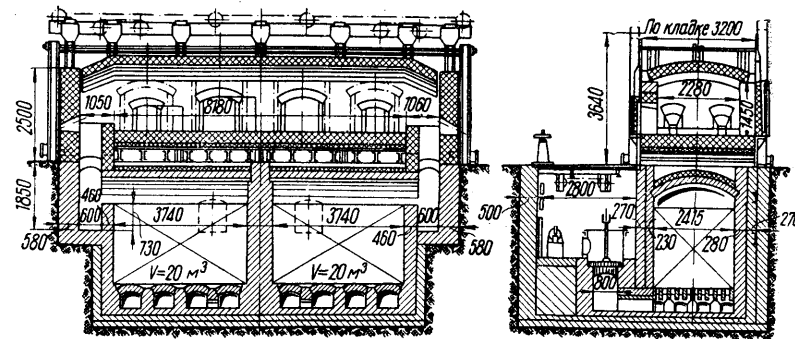


Рис. 140. Большая камерная регенеративная печь для нагрева под ковку слитков и крупных заготовок (к прессу усилием 1500 Т)

Горелками или форсунками можно также оборудовать обе камеры. Они будут работать попеременно. В этом случае материал из камеры в камеру переносить не придется, но печь должна быть снабжена устройством для переключения отвода продуктов горения, воздуха и топливосжигающих устройств. На рис. 139 показана печь подобной конструкции.

Большие камерные печи применяют для нагрева крупных заготовок и слитков под ковку. Сооружают их в жестких или подвижных каркасах на массовых фундаментах. Продукты горения отводят в большинстве случаев через дымовые трубы. Печь обычно имеет несколько окон больших размеров, оборудованных иногда водоохлаждаемыми рамами и футерованными водоохлаждаемыми заслонками. Подъем и опускание заслонок механизированы обычно с помощью пневматических или гидравлических цилиндров, реже устраивают электрический привод.

Тепло отходящих газов в таких печах часто используют в регенераторах, хотя в настоящее время считают более рациональным применять рекуператоры для подогрева воздуха. На рис. 140 показана мазутная регенеративная печь, предназначенная для нагрева слитков и подогрева заготовок на переходахковки, обслуживающая ковочный гидравлический пресс мощностью 1500 Т.

## 5. Камерные печи с выдвижным подом

Такие печи широко применяют в кузнечных цехах для нагрева слитков и крупных заготовок под ковку, а также для термообработки (отжига и нормализации с отпуском) поковок.

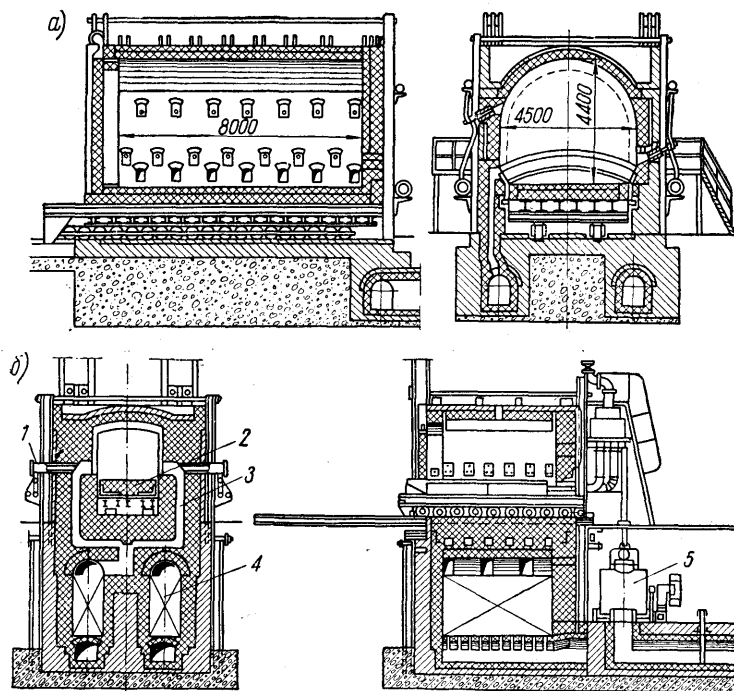


Рис. 141. Печи с выдвижным подом:

*a* — для нагрева слитков весом до 250 т на генераторном газе с рекуператором (конструкция ЦНИИТМАШ); *б* — регенеративная печь с выдвижным подом (конструкция Б. Ф. Зобнина): 1 — труба для подачи газа; 2 — выдвижной под; 3 — каналы для отвода газов и подачи воздуха; 4 — регенератор; 5 — перекидной клапан

Кроме того, их используют и для термообработки проката в прокатных печах.

Печи этого типа могут работать на газообразном, жидком и твердом топливах.

Преимуществом их является удобство загрузки и разгрузки материала на выдвинутую из рабочей камеры печи подину с помощью цеховых кранов.

Подину печи можно выдвигать на колесах по рельсам или на чугунных шарах по специальным корытообразным балкам. Для того, чтобы в печь не было подсоса воздуха или дымовые газы не поступали к колесам или шарам, печи снабжают оди-нарными или двойными песочными затворами.

По расположению пода печи могут быть тупиковые, когда под выдвигается только в одну сторону, или проходные, когда под можно выдвигать в обе стороны. Для увеличения произ-

водительности и улучшения использования топлива в последнем случае к одной печи можно устраивать два выдвижных пода (пока один под находится в печи, другой подготавливают: разгружают и загружают).

Печи с выдвижным подом в большинстве случаев работают с отводом продуктов горения в дымовую трубу и редко под зонт. Тепло отходящих газов используют в рекуператорах и значительно реже — в регенераторах.

На рис. 141 показаны две печи с выдвижным подом: рекуперативная печь для нагрева крупных слитков весом до 250 т и регенеративная печь Уралмашзавода, выполненная по схеме Б. Ф. Зобнина. В последней при переключении регенераторов с каждой стороны выключается часть горелок (через одну), а другая часть включается.

Таким образом, нагреваемые слитки все время обогриваются с двух сторон, что обеспечивает более быстрый и равномерный нагрев, чем в обычных регенеративных печах (см. рис. 140).

## 6. Механизированные камерные печи

В целях уменьшения трудоемкости процесса и обеспечения определенного режима работы машин-орудий в кузнечно-прессовых цехах широко применяют камерные печи, в которых материал перемещается от места загрузки к месту подачи различными способами: перекачиванием цилиндрических заготовок по сильно наклонному поду, с помощью толкателей, шагающих балок, роликового пода, конвейеров различного типа и вращающегося пода, вращающихся стенок печи и т. д. Механизированные печи отапливают газообразным или жидким топливом.

Толкательные камерные печи применяют для нагрева квадратных и прямоугольных заготовок. Если последние имеют небольшую толщину (полосовой и листовой материал), то для успешного их проталкивания на поду печи (при температурах нагрева до 1000—1100°С) устраивают жароупорные балки с роликами, по которым движется нагреваемый материал или устанавливают корытообразные балки с движущимися по ним крестовинами (бабурками).

Печи с наклонным подом (рис. 142, *a*) применяют для нагрева цилиндрических заготовок диаметром 40 мм и более и длиной до 500—600 мм под штамповку. Заготовки извлекает специальный механизм, который опускает стержень, задерживающий лежащий на поду ряд заготовок на время, необходимое, чтобы скатилась одна заготовка, а затем возвращает его в первоначальное положение.

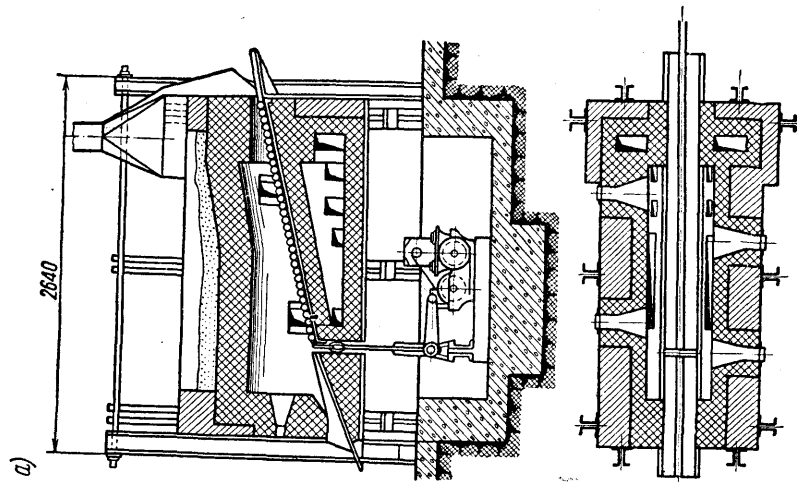


Рис. 142. Небольшие механизи-  
рованные печи

а — печь с наклонным  
подом и специальным  
механизмом для вы-  
дачи цилиндрических  
заготовок по одной;  
б — карусельная печь  
с тарельчатым подом;  
1 — рекуператор; 2 —  
тарельчатый под; 3 —  
водяной затвор; 4 —  
механизм для враще-  
ния пода; 5 — каналы  
для отвода дымовых  
газов; 7 — окно для  
загрузки и выдачи за-  
готовок; 8 — горелки

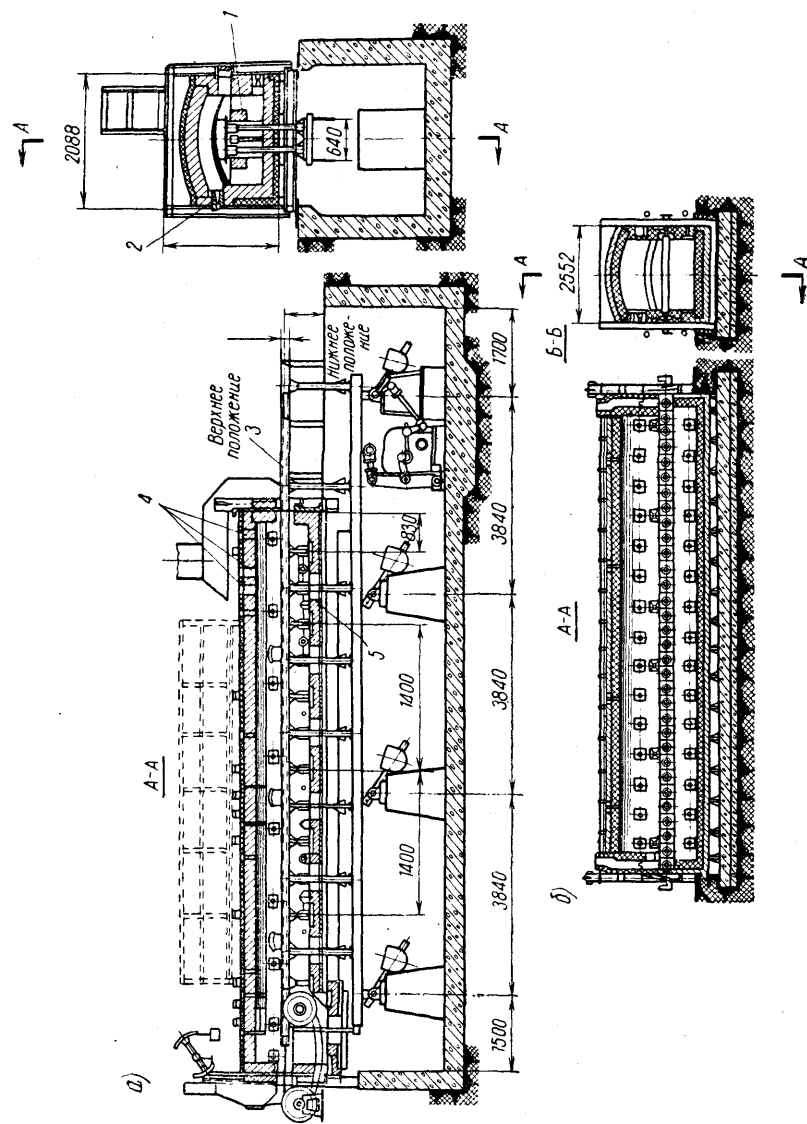


Рис. 143. Механизированные печи для нагрева листового материала:

а — печь с шагающим подом; 1 — под печи; 2 — неподвижная балка; 3 — шагающая балка; 4 — каналы для отвода продуктов горения; 5 — пазы для шагающих балок; б — печь с роликовым подом

Печи с шагающими балками применяют для нагрева листового, полосового и длинного сортового материала до температур 1000—1150°С, т. е. до температур, позволяющих работать с сухой окалиной, иначе движение шагающих балок становится невозможным, так как шлак затекает в зазоры между балками и неподвижной частью пода.

Печи с роликовым подом (рис. 143, б) применяют для нагрева листового и полосового материала под штамповку, гибку, раскатку и другие операции до температуры 1150—1200°С при массовом производстве. Ролики вращаются от мотора, через специальный привод, располагаемый сбоку вне печи. Ролики выполняют из жароупорной стали или из обычной стали с водяным охлаждением и иногда с керамической оболочкой. Горелки можно располагать по всей длине камеры над и под роликами, что обеспечивает равномерный нагрев и высокую производительность печи.

На рис. 144 показаны различные конвейерные печи. Печи с боковым конвейером позволяют нагревать конец заготовки под штамповку или высадку до 1200—1250°С. В печах с подподовым конвейером нагревают заготовки до температуры 1100—1150°С, чтобы работать на сухой окалине, а печи с подовым конвейером применяют для нагрева главным образом тонких заготовок до 900—950°С.

• Камерные печи с вращающимся подом (тарельчатые) (см. рис. 142, б) позволяют нагревать под ковку и штамповку небольшие заготовки самой различной формы.

Печи с вращающимися стенками используют для нагрева концов заготовок под ковку и штамповку.

↓ Разновидностью механизированных камерных печей являются печи скоростного нагрева. Они работают со значительной разностью температуры печи и конечной температуры нагрева металла (см. гл. VI). Нагрев при этом происходит быстро, что обеспечивает компактность конструкции печи.

В таких печах нагреваются заготовки с небольшим сечением (цилиндр диаметром до 100 мм или квадрат размером до 100×100 мм), иначе получается очень большая разница температур между поверхностью и центром. Время нагрева должно быть строго регламентировано во избежание перегрева поверхности, поэтому печи скоростного нагрева всегда механизированы и нагретые заготовки выдаются через определенные промежутки времени.

Такие печи применяют в условиях массового производства, когда не часто приходится переналаживать печь в связи с изменением профиля и размеров заготовки.

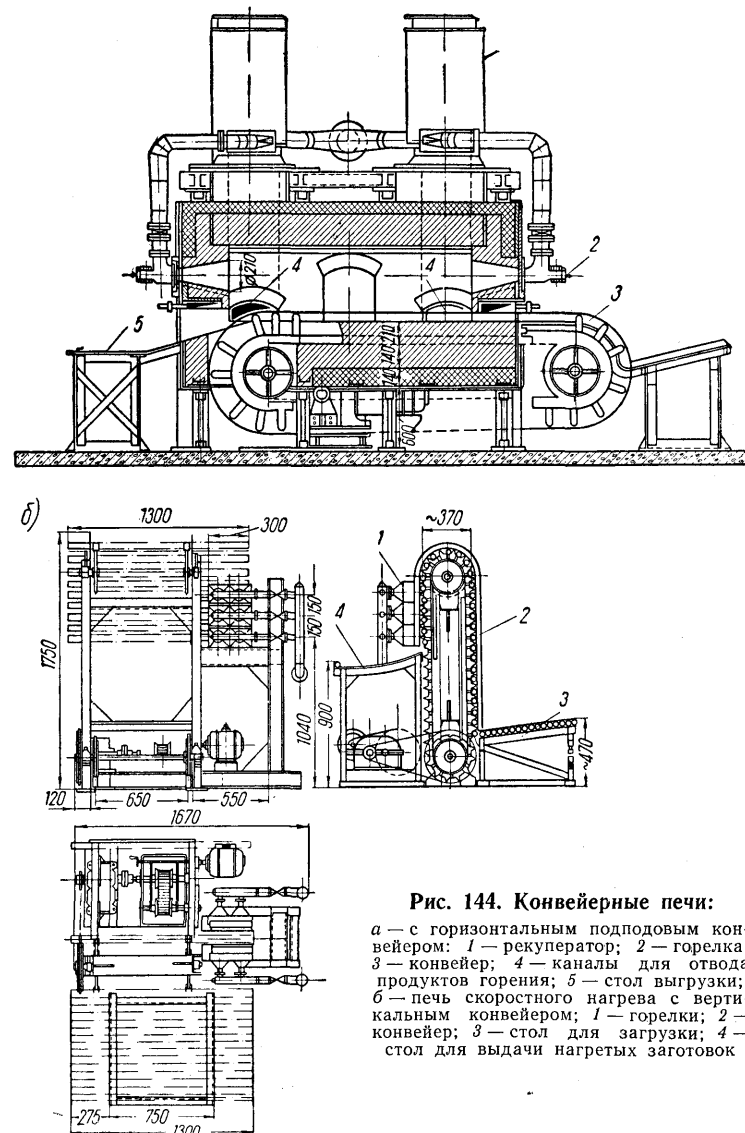


Рис. 144. Конвейерные печи:

а — с горизонтальным подподовым конвейером: 1 — рекуператор; 2 — горелка; 3 — конвейер; 4 — каналы для отвода продуктов горения; 5 — стол выгрузки; б — печь скоростного нагрева с вертикальным конвейером: 1 — горелки; 2 — конвейер; 3 — стол для загрузки; 4 — стол для выдачи нагретых заготовок

Угар металла в печах скоростного нагрева в 1,5—2 раза меньше, чем в обычных.

На рис. 144, б и 145 показано несколько конструкций печей скоростного нагрева. Продукты горения от печей скоростного нагрева и механизированных печей отводят чаще под зонт и



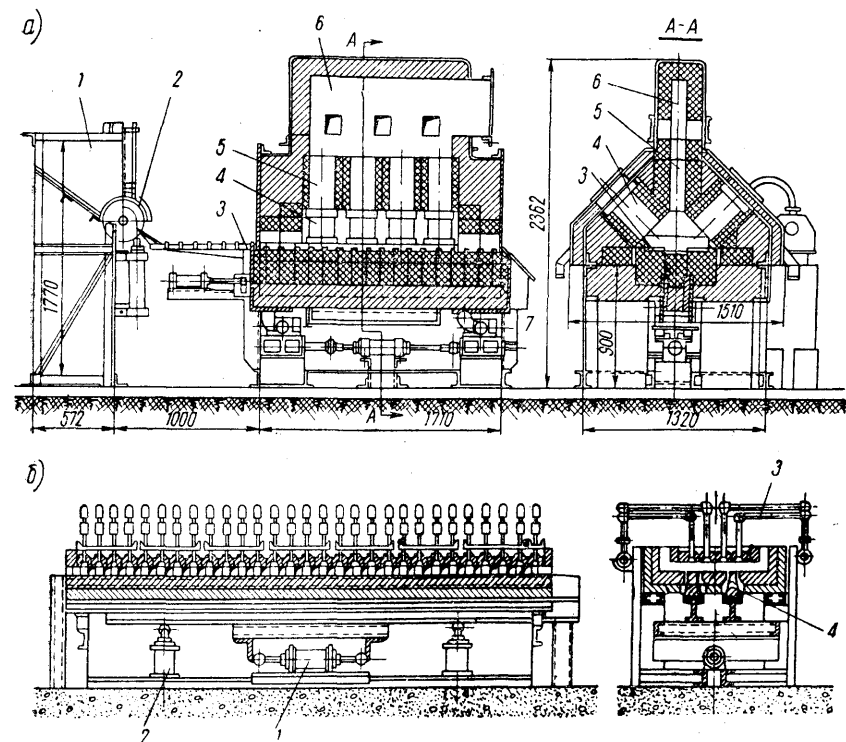


Рис. 145. Печи скоростного нагрева заготовок под штамповку:

а — печь с шагающими балками конструкции «Гипроавтопрома»: 1 — бункер для заготовок; 2 — барабанный питатель; 3 — транспортирующая балка; 4 — керамические горелки; 5 — каналы для отвода продуктов горения; 6 — коллектор для сбора продуктов горения;  
 б — печь с панельными горелками: 1 — цилиндр для горизонтального перемещения балок; 2 — цилиндр для вертикального перемещения балок; 3 — панельные горелки; 4 — транспортирующие балки

реже через дымовые трубы. Тепло отходящих газов используют в рекуператорах.

Особенно необходимо использовать тепло отходящих газов печей скоростного нагрева, так как температура их очень высокая ( $1350\text{--}1450^\circ\text{C}$ ) и удельный расход тепла получается большой (порядка  $3347\text{--}5020\text{ кДж/кг}$  и выше).

## 7. Полуметодические, методические и кольцевые печи с вращающимся подом

В целях экономии топлива при массовом и крупносерийном производстве в кузнечно-прессовых цехах часто используют полуметодические и методические печи, а в последнее время — и

кольцевые печи с вращающимся подом. В этих печах материал движется навстречу продуктам горения и температура отходящих газов значительно ниже, чем в камерных.

В полуметодических и методических печах нагревают под ковку и штамповку до  $1200\text{--}1250^\circ\text{C}$  заготовки правильной квадратной, прямоугольной, а иногда и цилиндрической формы, передвигаемые от места загрузки к месту выдачи толкателями. В кольцевых печах с вращающимся подом можно нагревать до тех же температур заготовки любой формы.

На рис. 146, а показана полуметодическая печь для нагрева небольших заготовок, которую можно снабжать магазинной загрузкой и тогда обслуживание несколько облегчается.

На рис. 146, б приведена методическая трехзонная печь для нагрева под ковку слитков и заготовок легированной стали. Устройство двух боровов для отвода продуктов горения позволяет в широких пределах регулировать температуру в зоне посадки слитков, что очень важно при нагреве легированных сталей.

Кольцевая печь с вращающимся подом для нагрева слитков специальной формы при производстве колесных центров показана на рис. 147. Эта печь, заменившая ролевую печь, обеспечила большое снижение трудоемкости и значительную экономию топлива.

Печи последних трех типов имеют удельный расход топлива значительно ниже, чем камерные. Применение же в них теплоиспользующих устройств еще больше улучшает использование топлива. Поэтому при массовом и крупносерийном производстве эти печи следует применять в первую очередь.

## 8. Печи безокислительного нагрева

В целях ликвидации потерь металла от окисления при нагреве под ковку и штамповку применяют печи безокислительного нагрева с двухкамерным сжиганием топлива. В первой камере, где происходит нагрев металла, топливо сжигается с коэффициентом расхода воздуха  $0,4\text{--}0,55$ , затем продукты неполного горения направляются во вторую камеру, где подводится воздух и происходит их дожигание. После дожигания продукты горения направляются в теплоиспользующее устройство.

По такому принципу печи могут работать только на высококалорийных газах (природный, нефтяной, коксовальный) при подогреве воздуха от  $800$  до  $1100^\circ\text{C}$ . Проблема высокого подогрева воздуха не является до конца решенной, поэтому печи этого типа еще не нашли широкого распространения. Кроме того, их к. п. д. сравнительно невелик.



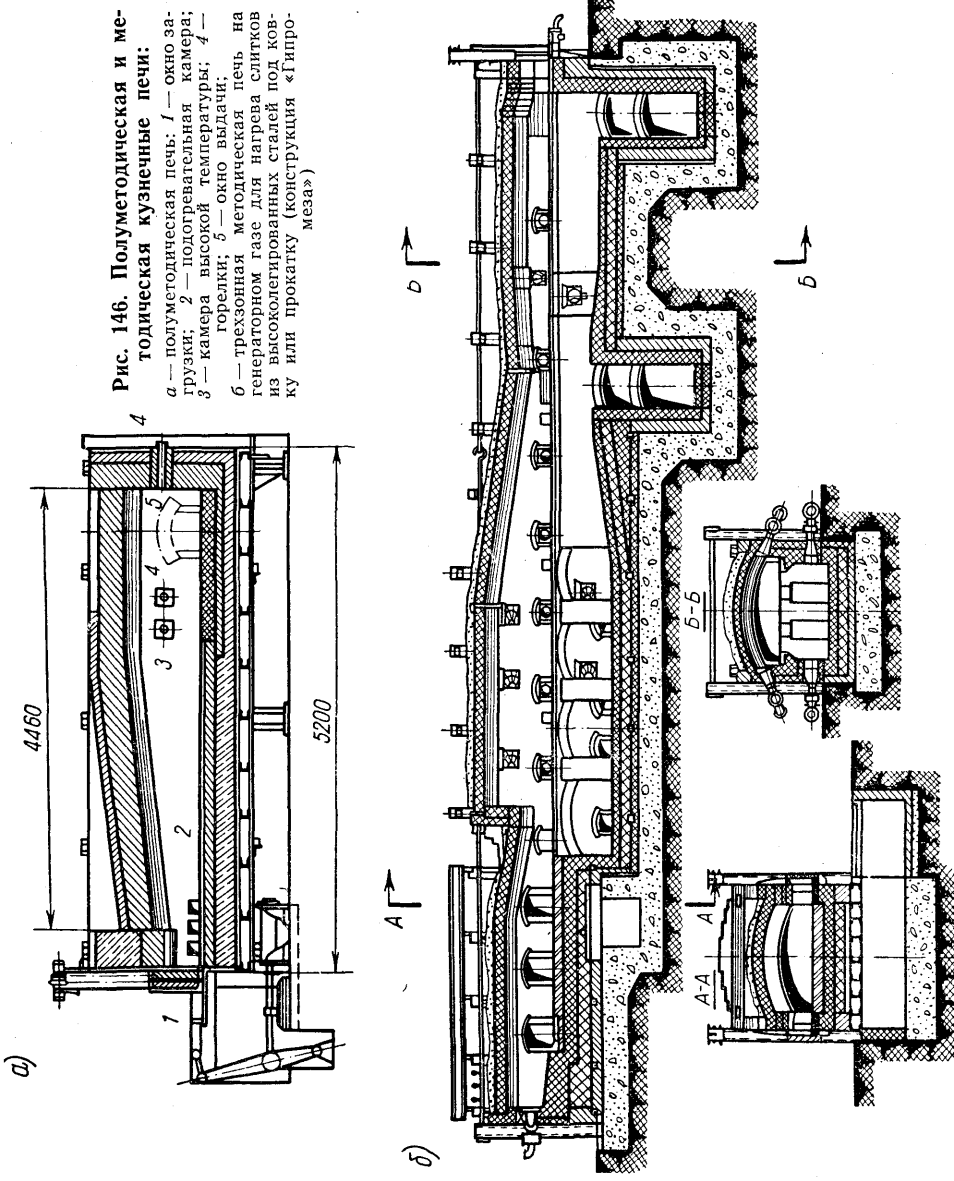


Рис. 146. Полуметодическая и методическая кузнечные печи:

а — полуметодическая печь; 1 — окно загрузки; 2 — подогревательная камера; 3 — камера высокой температуры; 4 — горелки; 5 — окно выдачи; б — трехзонная методическая печь на генераторном газе для нагрева слитков из высоколегированных сталей под ковку или прокатку (конструкция «Гипромеза»)

A-A

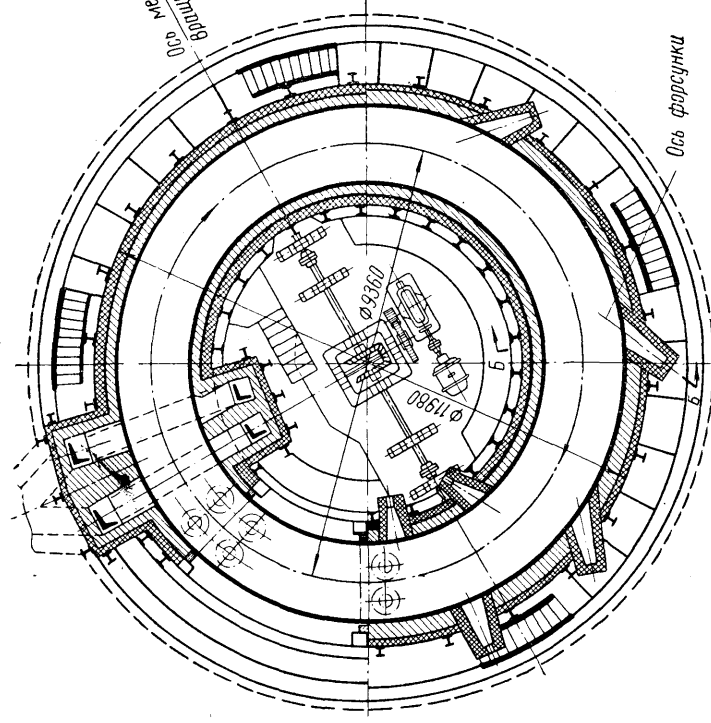


Рис. 147. Методическая печь с вращающимся подом для нагрева под штамповку:

1 — наставки из жароупорной стали; 2 — бортовые угольники; 3 — кожух; 4 — песочный затвор; 5, 12 — стойки опор кладки кольцевых стен; 6 — кольцевые рельсы; 7 — опорный ролик; 8 — зубчатый ролик; 9 — литые секторы пола; 10 — упорный угольник; 11 — упорный ролик; 12 — нож песочного затвора; 13 — опорные плиты внешней и внутренней кольцевых стен, 14 — форкамера

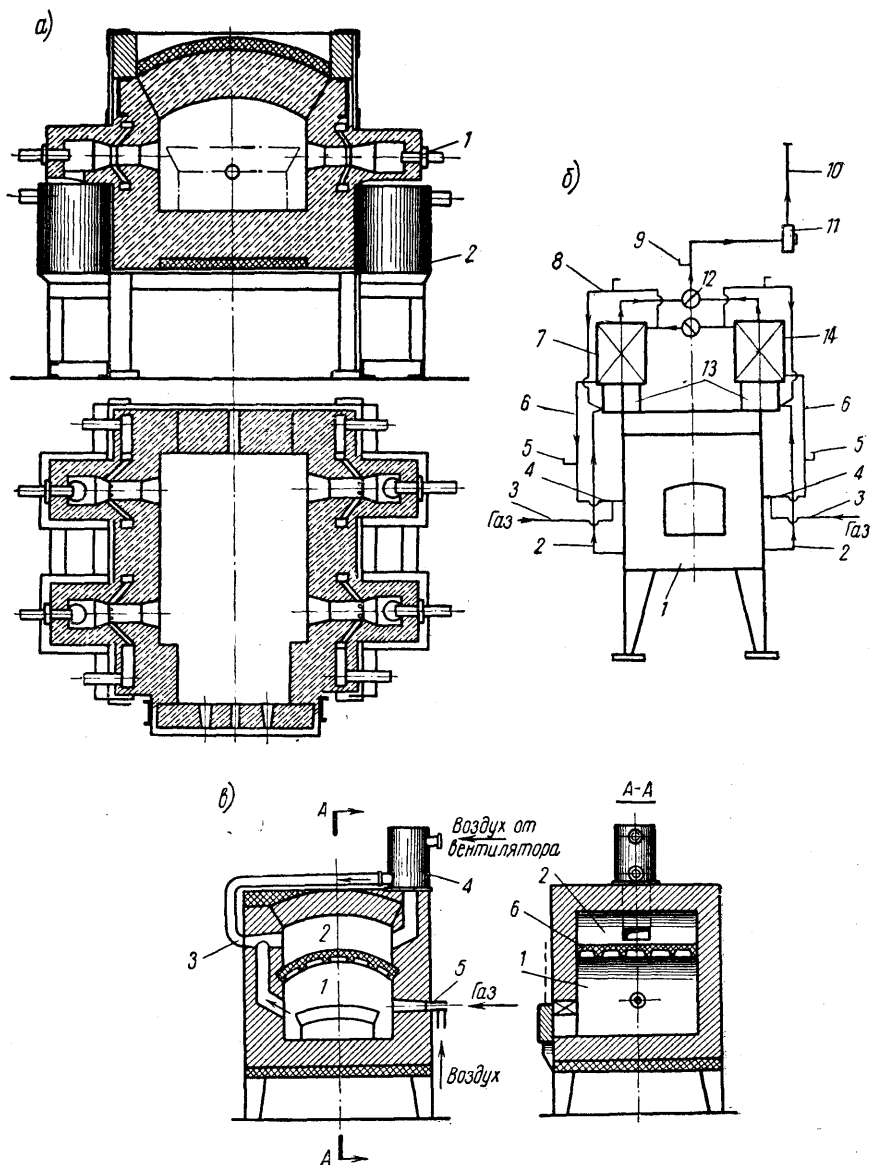


Рис. 148. Камерные печи для безокислительного нагрева стали открытым пламенем:

а — регенеративная печь конструкции ЦНИИТМАШ; 1 — горелки для газа; 2 — регенератор;  
 б — схема регенеративной печи безокислительного нагрева: 1 — печь; 2 — каналы для отвода продуктов неполного горения; 3 — камера дожигания; 4 — горелки; 5 — регулирование подачи воздуха к горелке; 6 — каналы для подачи нагретого воздуха к горелкам; 7 и 14 регенераторы; 8 — подача воздуха в камеру дожигания; 9 — воздушный клапан; 10 — труба для удаления дымовых газов; 11 — дымосос; 12 — клапан дымового тракта; 13 — подача газа;  
 в — recuperative печь с излучающим сводом: 1 — рабочая камера; 2 — камера дожигания; 3 — подача вторичного воздуха; 4 — регенератор; 5 — газовая горелка; 6 — карбо-рундный свод

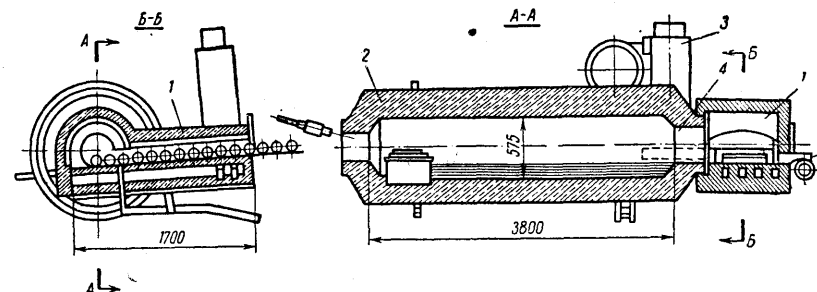


Рис. 149. Печь для нагрева заготовок в расплавленном стекле:  
 1 — подогревательная камера; 2 — футерованный барабан; 3 — регенератор; 4 — загрузочное отверстие; 5 — толкатель;

На рис. 148 показана регенеративная печь с излучающим сводом и регенеративная печь конструкции ЦНИИТМАШ с компактными регенераторами (насадка из стальных шариков  $d=7,0-7,5$  мм) и частым автоматическим переключением регенераторов (через  $\sim 35$  сек).

Вместо подогрева воздуха до высоких температур в печах безокислительного нагрева можно применять воздух, обогащенный кислородом, нагретый до сравнительно невысоких температур —  $800-600^\circ\text{C}$  и ниже (в зависимости от количества кислорода). В настоящее время разрабатывают конструкции печей безокислительного нагрева, в которых продукты горения будут дожигаться не в специальной камере, а в верхней части камеры безокислительного нагрева.

● Для скоростного безокислительного нагрева применяют печи с ваннами расплавленного стекла или расплавленной соли. Для нагрева заготовки погружают в расплав. Теплопередача от жидкости происходит интенсивнее, чем от газа, и заготовки быстро нагреваются.

Вынутые нагретые заготовки покрыты тонкой пленкой расплавленного стекла или соли, которая предохраняет их от окисления при транспортировке от печей к ковочным агрегатам. Печи с расплавленными ваннами могут быть механизированными и немеханизированными.

На рис. 149 показана газовая барабанная печь с нагревом в расплавленном стекле. В целях использования тепла отходящих газов заготовки подогревают в специальной камере до температуры, при которой поверхность не окисляется (до  $500-600^\circ\text{C}$ ).

В табл. 65 приведены некоторые данные, характеризующие производительность и тепловую экономичность кузнечных печей.

Таблица 65

## Технические характеристики кузнечных печей

Название и конструкция печи	Напряженность пода, кг/м <sup>2</sup> ·ч	Удельный расход		К. п. д. печи
		тепла, кдж/кг	условного топлива, %	
Камерные щелевые . . . . .	200—500	8368	28,5	10,0
Камерные малые (без использования тепла) . . . . .	150—350	7531	26,0	12,0
Камерные большие . . . . .	200—400	5439	18,5	16,0
Камерная регенеративная или рекуперативная с выдвижным подом . . . . .	200—350	3766	13,0	23,0
Роликовая для нагрева листов . . . . .	150—300	4184	14,3	21,0
Полуметодическая толкательная . . . . .	200—500	3096	10,5	28,0
Методическая толкательная с одним верхним обогревом . . . . .	200—400	2929	10,0	30,0
Карусельная с кольцевым подом . . . . .	250—300	2510	8,6	35,0
Печи скоростного нагрева . . . . .	400—800	3347	8,7	37,0

## § 64. ТЕРМИЧЕСКИЕ ПЕЧИ ПРОКАТНЫХ И КУЗНЕЧНЫХ ЦЕХОВ

В прокатных цехах распространенными операциями термообработки являются: нормализация, черный и светлый отжиг; редко применяют закалку с высоким или низким отпуском. В кузнечных цехах термические печи применяют главным образом для отжига поковок и нормализации их с высоким отпуском.

Термические печи работают при температурах нагрева металла 600—1000° С (кроме печей для низкого отпуска).

В отношении равномерности нагрева к термическим печам предъявляют большие требования, чем к нагревательным. Это заставляет работать с более продолжительными выдержками. Поэтому термические печи работают с более низкой напряженностью пода. Кроме того, требования равномерного нагрева влияют на конструкцию печей. Термические печи, работающие на мазуте и высококалорийных газах, строят обычно с отдельными топками, чаще всего нижними. Количество горелок или форсунок в термических печах ставят большее, чтобы рассредоточить выделяющееся тепло.

Для нагрева под термообработку широко используют печи косвенного нагрева, в которых нагреваемый материал не сопри-

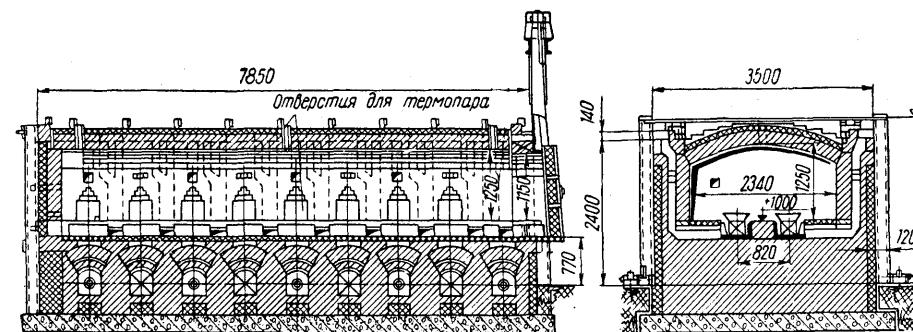


Рис. 150. Печь с внешней механизацией для отжига мелкого сортового проката

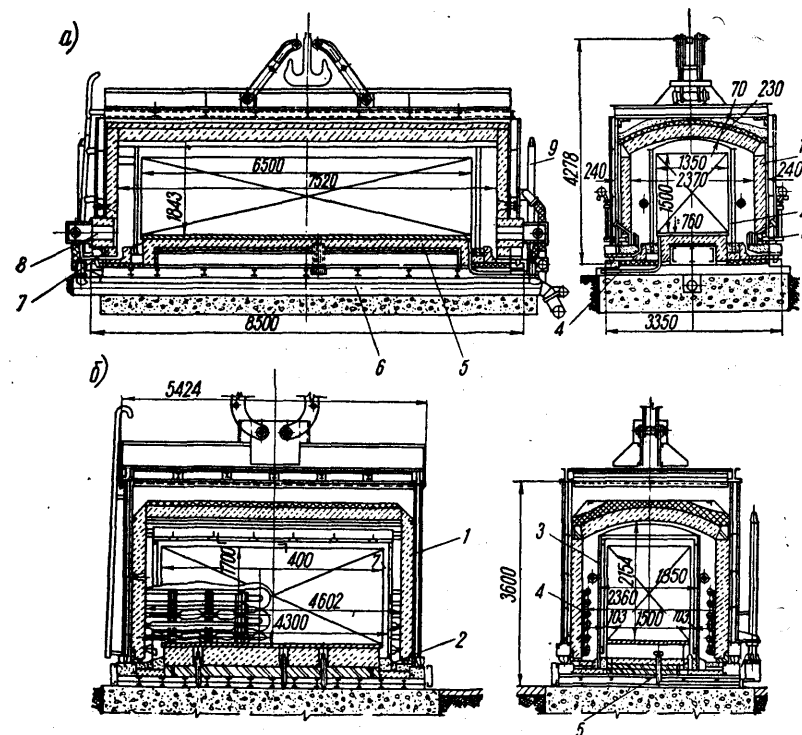


Рис. 151. Колпаковые печи:

а — печь с муфелированием изделий для светлого отжига холоднкатанных листов: 1 — наружный колпак; 2 — внутренний колпак-муфель; 3 — газовые горелки; 4 — подача защитного газа; 5 — стенд; 6 — дымоотводная труба; 7 — песочный затвор; 8 — каналы для отвода дымовых газов; 9 — направляющий штырь;  
б — печь с радиационными (излучающими) трубами: 1 — наружный колпак; 2 — песочный затвор; 3 — внутренний колпак; 4 — радиационные излучающие трубы; 5 — патрубков для подачи защитного газа

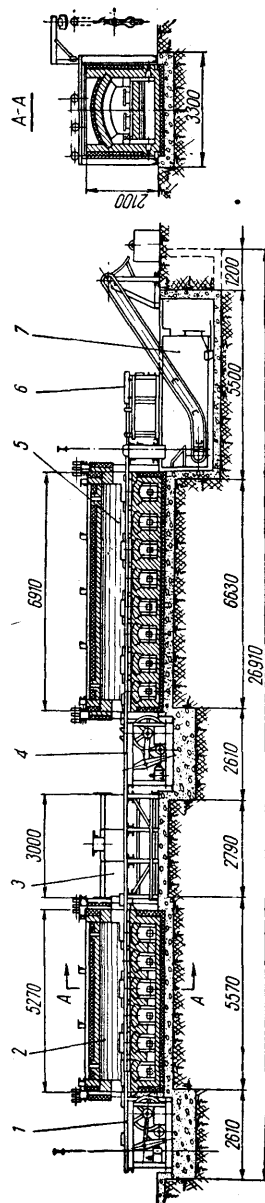


Рис. 152. Нормализационно-отпускной агрегат:

1 — толкатель нормализационной печи; 2 — нормализационная печь; 3 — камера охлаждения; 4 — толкатель отпускной печи; 5 — отпускная печь; 6 — выталкиватель; 7 — бак с конвейером для охлаждения

касается с продуктами горения (муфельные печи, печи с излучающими трубами, соляными ваннами и др.).

В прокатных цехах для термообработки сортового проката применяют камерные печи с внешней механизацией (рис. 150), камерные с выдвижным подом, а также конвейерные и механизированные печи других типов. Для термообработки листов используют печи с шагающим подом, конвейерные и роликовые печи, а также колпаковые печи для светлого отжига листов в пачках и холоднокатаной ленты в рулонах.

Рассмотрим только колпаковые печи, так как печи других типов описаны выше.

На рис. 151 показаны колпаковые печи с садкой в муфеле и с горением топлива в жароупорных трубах. В процесс работы этих печей входит загрузка стопы листов или рулонов ленты на стенд, установка внутреннего муфеля и продувка защитным газом (в печах с излучающими трубами установка муфеля не требуется), установка колпака самой печи и нагрев садки до 650—750°С в защитной атмосфере, охлаждение садки под муфелем до 150—200°С, дальнейшее охлаждение на воздухе и разгрузка стенда. Время, затрачиваемое на охлаждение садки, значительно больше, чем на нагрев, поэтому один колпак обслуживает несколько стендов (чаще всего три).

Колпаковые печи чаще всего отапливают низкокалорийными газами (доменным, смешанным, генераторным и др.), но применяют колпаковые печи и с электрообогревом. Продукты горения отводят эжекторами или дымососами.

В целях форсирования нагрева применяют искусственную циркуляцию атмосферы, а рулоны размещают с прокладками между ними. Для ускорения охлаждения применяют обдувку снаружи муфеля вентиляторным воздухом.

В кузнечных цехах для термообработки мелких и средних поковок при небольшом объеме производства используют камерные печи, при крупносерийном и массовом производстве — толкательные и конвейерные печи (реже с вращающимся подом и др.). В толкательных печах поковки передвигают на поддонах, возвращение которых к загрузочному концу печи механизуют с помощью рольгангов или конвейеров. На рис. 152 показан агрегат для нормализации и отпуска мелких и средних поковок.

Печи этого типа отапливают мазутом или газообразным топливом с отводом продуктов горения в дымовую трубу или под зонт.

Для термообработки крупных поковок применяют печи с выдвижным подом. Данные, характеризующие производительность и тепловую экономичность термических печей, приведены в табл. 66.

Таблица 66

Технические характеристики термических печей

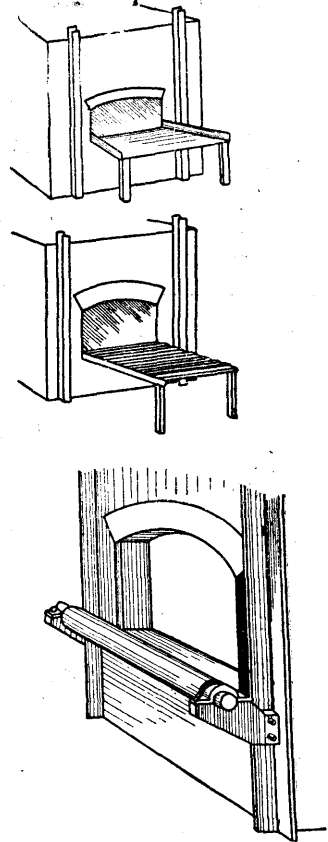
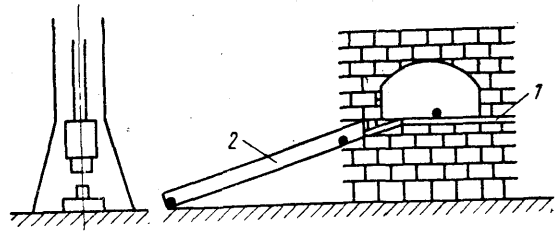
Название операций и тип печи	Напряжен- ность пода (по полной площади), кг/м <sup>2</sup> .ч	Удельный расход		К.п.д. печи
		тепла, кДж/кг	условного топлива, %	
<b>Отжиг</b>				
Камерные . . . . .	40—80	3766	13,0	15,0
Печи с выдвижным подом . . . . .	30—70	2929	10,0	20,0
<b>Нормализация</b>				
Камерные . . . . .	100—150	2929	10,0	20,0
Толкательные . . . . .	150—200	1967	6,7	30,0
Конвейерные . . . . .	130—180	2301	8,0	25,0
Карусельные . . . . .	180—200	1674	5,7	35,0
Секционные печи скоростного на- грева . . . . .	300—450	2510	8,6	20,0

## Технические характеристики

Тип и название	Особенности устройства и принцип работы	Назначение
Загрузочный стол	Устанавливают перед рабочим окном небольших камерных печей	Для облегчения загрузки и выгрузки заготовок
Загрузочный стол с рольгангом	На раме стола в верхней части устанавливают вращающиеся ролики, образующие небольшой рольганг	То же
Стол с одним большим роликом	На раме стола укрепляют один ролик. Применяют для средних и больших печей	Для облегчения загрузки длинных заготовок и слитков на вилке
Загрузочный стол с лотком	В конструкции приспособления имеется стол 1 и наклонный лоток 2 для подачи нагретых заготовок к молоту или прессу	Для обслуживания малых и средних камерных печей

Таблица 67

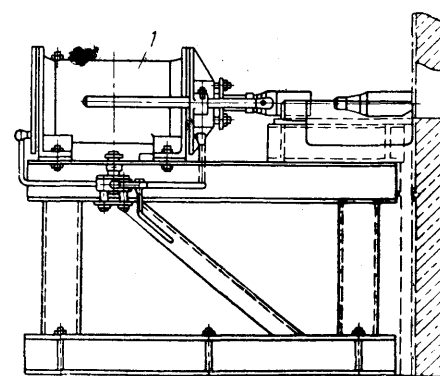
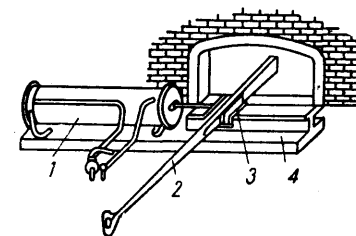
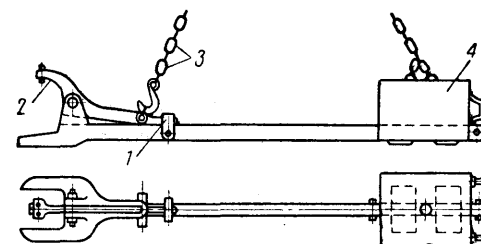
## механизмов и приспособлений

Схема или эскиз



Тип и название	Особенности устройства и принцип работы	Назначение
Клещи и вилки	Клещи 2 и вилки 1 подвешивают к крану цепью 3. Слиток или заготовка уравниваются противовесом 4.	Для посадки и выдачи тяжелых заготовок в камерных печах
Кантователь	Конструкция имеет станину 1, цилиндр 2, тиски 3, брусок 4	Для кантовки крупных заготовок при нагреве в камерных печах
Толкатели	Применяют электрические (винтовые и рычажные), пневматические и гидравлические толкатели 1	Применяют для передвижения материала в полуметодических и камерных печах

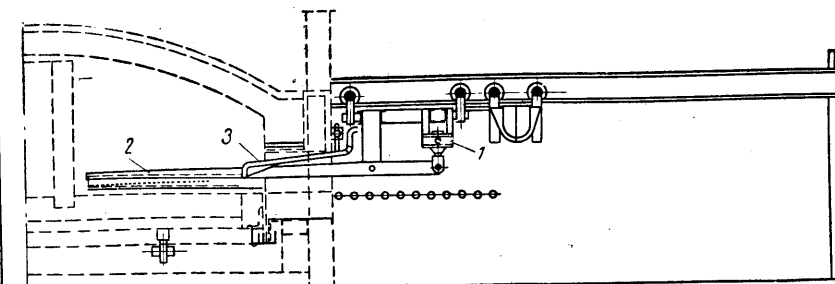
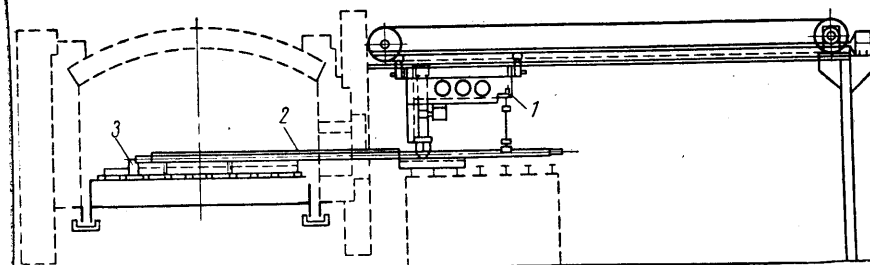
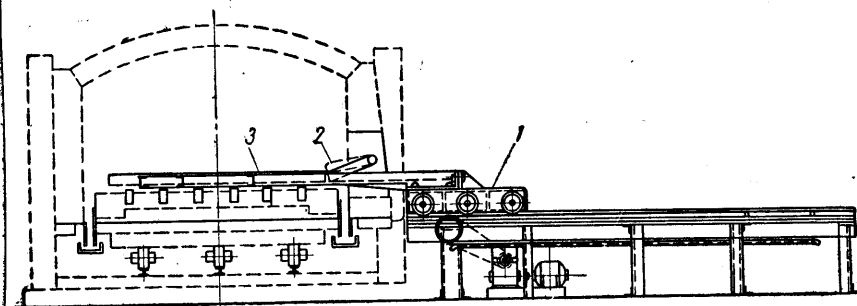
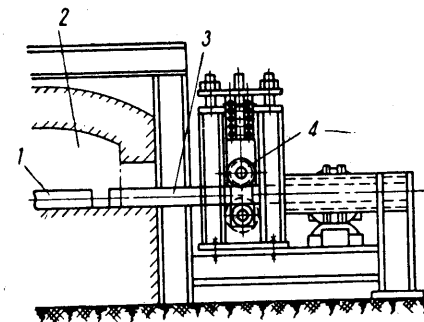
Продолжение табл. 67

Схема или эскиз



Тип и название	Особенности устройства и принцип работы	Назначение
Выталкиватели	Заготовка 1 выталкивается из печи 2 водоохлаждаемой или неохлаждаемой штангой 3. Возвратно - поступательное движение штанги осуществляет привод 4.	Для выталкивания нагретых слитков и заготовок в методических и полуметодических печах с боковой выдачей
Приспособление для загрузки мерных заготовок	Приспособление состоит из тележки 1 с укрепленной на ней корытообразной балкой и рычага-упора 2, укрепленного на каркасе 3. Тележка с балкой совершает возвратно-поступательное движение от электромотора. При обратном ходе тележки рычаг упирается в заготовки и сдвигает их с корытообразной балки на под печи	Для загрузки заготовок в карусельные и другие механизированные печи
Приспособление для загрузки и выдачи длинных заготовок	Приспособление имеет: длинный хобот 1 с пневматическими клешнями 2, перемещающийся с помощью тележки 3 в печь и из печи	Для загрузки и выгрузки длинных цилиндрических и квадратных заготовок на под механизированных печей
Приспособление для загрузки и выгрузки плоских заготовок	Приспособление состоит из тележки 1 с вилкой 2 и охлаждаемым упором 3, шарнирно подвешенным к каркасу печи	Для загрузки и выгрузки плоских заготовок в камерных и механизированных печах

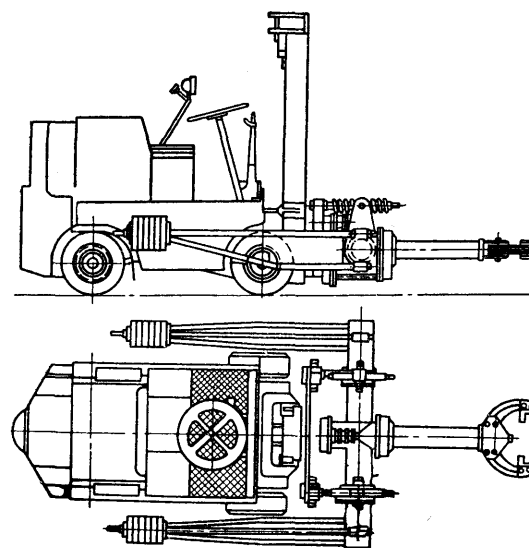
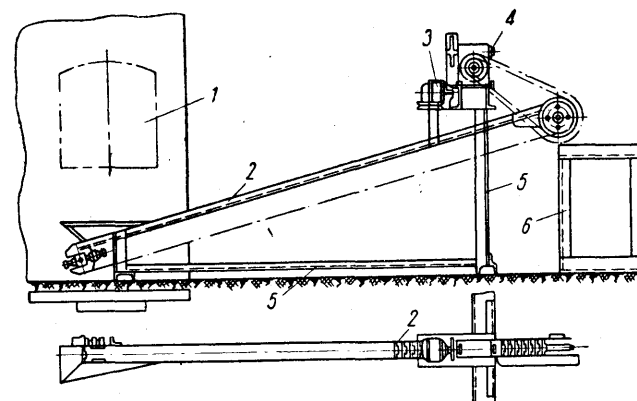
Схема или эскиз



Тип и название	Особенности устройства и принцип работы	Назначение
Пластиначный транспортер	Пластиначный транспортер включает металлический каркас 5, ленту из штампованных звеньев 2 и редуктор с электромотором 3 (скорость ленты — 0,1—1,0 м/сек). 1—окно печи; 6—стол у молота или прессы	Для подачи нагретых заготовок от печей к молотам и прессам
Ленточные цепные и скребковые транспортеры	Конвейеры разной конструкции	Для подачи заготовок к печам и от печей к машинам-орудиям
Манипуляторы и шаржир-машины	Машины разных конструкций	Для загрузки и выгрузки крупных слитков и заготовок в камерных печах

Продолжение табл. 67

Схема или эскиз





## § 65. МЕХАНИЗМЫ И ПРИСПОСОБЛЕНИЯ ДЛЯ ЗАГРУЗКИ И ВЫГРУЗКИ МАТЕРИАЛА

При эксплуатации нагревательных и термических печей в настоящее время широко используют различные механизмы и приспособления для облегчения труда обслуживающего персонала по загрузке и разгрузке печей, а в некоторых случаях и для полной автоматизации этих процессов.

В табл. 67 приведены данные о наиболее часто встречающихся механизмах и приспособлениях.

Использование механизированных печей и приспособлений для загрузки и выдачи материала позволяет создать автоматизированные поточные линии. Наиболее удобными для включения в поточные линии являются конвейерные, роликовые, толкательные, карусельные печи, а также печи скоростного нагрева. Печи обязательно снабжают автоматическим регулированием температуры, поэтому они работают с высокой производительностью и высоким к. п. д.

На рис. 153 показана схема автоматической линии дляковки и термообработки вагонных осей.

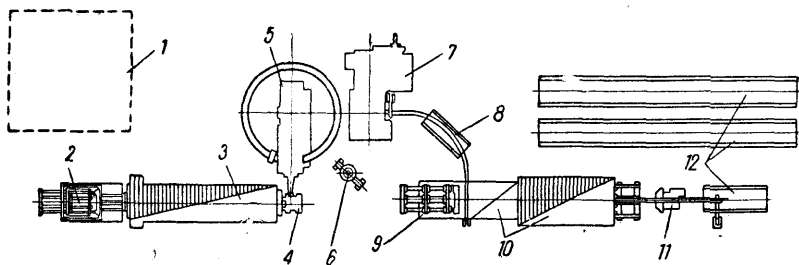


Рис. 153. Схема поточной линии дляковки и термообработки вагонных осей:

1 — склад блюмсов; 2 — толкатель печи; 3 — методическая печь; 4 — стол для нагретых блюмсов; 5 — манипулятор; 6 — поворотный стол; 7 — ковочный пресс; 8 — стеллаж для откованных осей; 9 — толкатель нормализационной печи; 10 — нормализационная печь; 11 — пресс для правки осей; 12 — стеллаж

## § 66. ОСНОВЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ПЕЧЕЙ

Проект печи включает расчетную и графическую часть. Его выполняют на основании технического задания, в которое входят следующие данные: 1) технологический процесс, для которого предназначается печь; 2) производительность печи и ее колебания; 3) температура нагрева и допустимые пределы ее отклоне-

ния; 4) вид топлива; 5) система отвода дымовых газов, степень механизации и пр.

Проектирование начинают с выбора типа печи, если он не задан. Следует учитывать особенности технологического процесса, серийность производства, расположение печи в цехе относительно машин-орудий и т. д. Во всех случаях предпочтительны печи с непрерывной загрузкой (методические, полуметодические, камерные, механизированные); если нельзя применять печь непрерывного действия, выбирают камерную печь с периодической загрузкой.

Далее рассчитывают горение топлива с определением температур горения и температуры подогрева воздуха, если температура горения недостаточна высока.

Следующим этапом расчета является определение размеров пода рабочей камеры печи. Для этого определяют количество заготовок, которые должны одновременно находиться на нем, исходя из производительности печи и времени нагрева (см. главу VI). Определив размер пода и зная тип печи, вычерчивают расчетный эскиз, выбирая на основании данных, приведенных в главе X, толщину и конструкцию кладки стен, свода и пода.

Имея расчетный эскиз, составляют тепловой баланс печи и определяют из него расход топлива.

После этого делают расчет теплоиспользующего устройства и определяют его размеры, а затем рассчитывают движение газов и определяют размеры каналов и дымоходов, отводящих продукты горения, а также сумму сопротивлений при движении по ним дымовых газов.

Зная систему отвода дымовых газов, устанавливают высоту дымовой трубы или высоту вертикальных каналов (при отводе газов под зонт) или, наконец, подбирают дымосос в случае применения искусственной тяги.

Затем подбирают горелки или форсунки или, задаваясь их типом, рассчитывают выходные сечения для топлива и воздуха.

В заключении делают расчет механизмов для транспортировки материала по печи, для подъема заслонок и других механизмов с выбором необходимого мотора и определением диаметров пневматических или гидравлических цилиндров.

Графическая часть технического проекта включает чертеж общего вида печи с необходимыми разрезами, а также общий вид теплоиспользующего устройства и механизмов транспортировки и подъема заслонок. При рабочем проектировании выполняют рабочие чертежи всех узлов и деталей. В технический проект включают также схему теплового контроля и автоматического регулирования температуры печи (в целом или по зонам).

## § 67. СВЕДЕНИЯ О ТЕХНИКЕ БЕЗОПАСНОСТИ

В отличие от капиталистических стран в СССР созданы все условия для высокопроизводительного и безопасного труда.

Травматизм на производстве неуклонно снижается. Это связано с затратой огромных средств на мероприятия по технике безопасности и охране труда, с широко поставленным производственным обучением, инструктажем всех работающих на их рабочих местах.

В процессе эксплуатации нагревательных печей существует опасность: 1) отравления газообразным топливом и продуктами горения, а также продуктами, получающимися при работе соляных ванн; 2) взрывов смеси воздуха с газообразными продуктами; 3) ожогов от излучения печного пространства, от раскаленного металла, брызг расплавленных солей и т. п.; 4) при падении тяжелых предметов и от неогражденных движущихся частей.

Отравление обычно происходит вследствие нарушения плотности газопроводов и их арматуры, неисправности вентиляционных систем и т. п. Предупреждение отравления связано со своевременным обнаруживанием опасной концентрации газа (табл. 68).

Таблица 68

Допустимые и токсические концентрации некоторых ядовитых газов в воздухе

Название газа	Предельно-допустимая концентрация, мг/л	Токсичная концентрация, мг/л	Наименьшая концентрация, при которой ощущается запах, мг/л
Оксид углерода (CO) . . . . .	0,03	0,2	—
Углекислый газ (CO <sub>2</sub> ) . . . . .	1,0—1,5	120	—
Метан (CH <sub>4</sub> ) . . . . .	1,6—1,8	—	—
Сернистый газ (SO <sub>2</sub> ) . . . . .	0,02	0,2	0,007
Сероводород (H <sub>2</sub> S) . . . . .	0,01	0,01	0,0014
Аммиак (NH <sub>3</sub> ) . . . . .	0,02	0,2	0,007
Фенол (C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> OH) . . . . .	0,005	0,50	0,004
Цианистый водород (HCN) . . . .	0,0003	0,15	—
Оксиды азота в пересчете на N <sub>2</sub> O <sub>5</sub> . . . . .	0,005	0,4	—

Чтобы обнаружить утечки ядовитых газов, не имеющих запаха, в газ добавляют небольшое количество метилмеркоптана, запах которого ощущается уже при содержании его в воздухе 0,000002 мг/м<sup>3</sup>.

Для обнаружения опасных концентраций вредных газов пользуются также индикаторами. Например, для определения со-

держания в воздухе окиси углерода пользуются бумажкой, пропитанной однопроцентным раствором хлористого палладия и обработанной затем пятипроцентным раствором уксуснокислого натрия. При содержании в атмосфере окиси углерода 0,0076 мг/л бумажка чернеет через 20 мин, при содержании 0,076 мг/л — через 1 мин, а при содержании 0,76 мг/л — немедленно.

Взрывы происходят в тех случаях, когда в полости печи или в каком-либо другом пространстве образуется смесь горючего газа с воздухом определенной концентрации (см. гл. II), и эта смесь поджигается искрой или открытым пламенем.

Особенно часто взрывы происходят в газо- и воздухопроводах, а также при розжиге печей (главным образом газовых). Для предупреждения попадания воздуха в газопровод и газа в воздухопровод принимают следующие меры. Перед пуском газопровод продувают, и газ можно подавать в горелку только тогда, когда взятая проба показывает отсутствие в нем кислорода. Устраняют блокировку: при падении давления газа и воздуха ниже определенного предела срабатывает отсекающий клапан, и газ в горелку не поступает.

При розжиге печи крышки окон должны быть подняты и шибер открыт полностью, чтобы быстрый подъем давления при взрыве не разрушил свода и стен печи. Если при пуске в печь газ не воспламенился, то новый пуск делают только через несколько минут после некоторой вентиляции полости печи.

При розжиге мазутных печей взрыв может произойти при подаче излишнего количества мазута, который, испаряясь, образует гремучую смесь. Взрывы в боровых и дымоходах могут происходить в результате подсоса воздуха к продуктам горения при работе печи с большой неполнотой горения. Чтобы избежать взрыва, необходимо строго придерживаться инструкций о пуске и эксплуатации печей, газопроводов, мазутопроводов и вентиляционных систем.

Интенсивное излучение раскаленного металла из отверстий печей может вызвать ожоги незащищенной поверхности тела обслуживающего персонала. Ожоги могут быть также при попадании на кожу кусочков окалины, брызг расплавленных солей и т. д.

Для борьбы с тепловыделением окон печей перед ними устраивают водяные завесы (рис. 154). Применяют также различные экраны и душирующие охлаждающие устройства.

Работать у печей разрешается в специальной одежде, головном уборе и рукавицах.

Несчастные случаи могут происходить в результате падения

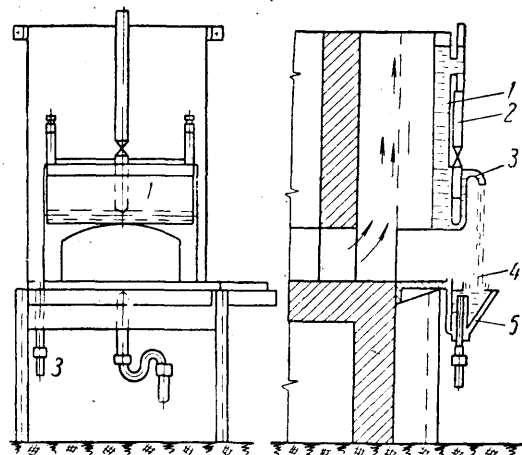


Рис. 154. Водяная завеса у окна щелевой печи:

1 — коробка; 2 — труба; 3 — водослив; 4 — прозрачная пелена; 5 — сборное корыто

неогороженных противовесов, плохо закрепленных подшипников, блоков и других деталей.

Для предупреждения подобных случаев движущиеся части, различные противовесы и контргрузы должны быть тщательно огорожены. Все находящиеся на высоте детали должны быть хорошо закреплены и за их креплением организовано постоянное наблюдение.

## ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ НАГРЕВАТЕЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА

### § 68. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Применение электрической энергии для нагревания и плавления тел началось с 1803 г., когда была опубликована работа русского акад. В. В. Петрова «О расплавлении и сжигании металлов и многих других горючих тел, а также о превращении некоторых оксидов в металлы посредством гальвани-вольтовой жидкости».

Следующим этапом в применении электроэнергии для термических процессов было установление в 1843 г. русским акад. Э. Х. Ленцем и английским ученым Джоулем эквивалента между тепловой и электрической энергиями:

$$Q = 0,24I^2R\tau = 0,24IE\tau \cdot 10^{-3} [\text{дж}], \quad (412)$$

где  $Q$  — количество тепла, выделенное в проводнике, дж;

$I$  — сила тока, а;

$R$  — сопротивление проводника, ом;

$E$  — напряжение, в;

$\tau$  — время, сек.

Эквивалент для перехода от электрической энергии к тепловой в технических единицах равен 860 ккал/квт·ч.

Еще до первой мировой войны 1914—1918 гг. русские инженеры создали ряд промышленных электропечей (А. Н. Лодыгин, В. М. Ижевский, Стабинский, Штейнбер, Грамолин и др.). Однако в условиях царской России при совершенно незначительной выработке электроэнергии не было возможностей для широкого промышленного развития различных методов электронагрева.

Только после Великой Октябрьской социалистической революции электрификация и индустриализация нашей страны соз-

дали предпосылки для широкого внедрения различных электротермических процессов в промышленность.

Быстрое развитие этой новой области техники было обеспечено работами ряда ученых и инженеров. Так, акад. В. Т. Вологдин создал советскую школу в области нагрева токами повышенной и высокой частоты, доктор физических наук Н. М. Радыгин и инж. В. А. Лапшин разработали теорию контактного электронагрева и создали конструкции нагревательных установок.

Большие работы в области развития теории электротермических и электронагревательных установок провели С. Н. Тельный, М. С. Максименко, М. Г. Лозинский, Н. В. Огороков, А. Д. Свенчанский и др.

В настоящее время наша промышленность располагает самыми разнообразными электротермическими устройствами, использующимися в различных отраслях техники, единичной мощностью от нескольких ватт до десятков тысяч киловатт.

Чтобы разбираться в разнообразии конструкций электропечей и различных методов электронагрева, остановимся на их классификации.

По способу превращения электроэнергии в тепловую все электротермические установки можно разделить на две группы: 1) электропечи сопротивления; 2) дуговые электропечи. В установках первой группы электроэнергия превращается в тепловую в результате сопротивления, оказываемого телом при прохождении через него электрического тока. В установках второй группы превращение электроэнергии в тепловую совершается в электрической дуге.

Так как для нагрева дуговые печи в настоящее время не применяют, а используют только как плавильные, то рассмотрим подробнее электропечи первой группы.

Электропечи сопротивления можно разделить на три вида:

1. Печи прямого нагрева (контактный электронагрев). В устройствах этого типа нагреваемое тело является частью электрической цепи и в нем выделяется тепло по закону Джоуля — Ленца.

2. Электропечи косвенного нагрева. В таких печах электрическая энергия превращается в тепловую в специальных элементах сопротивления (резисторах), которые могут быть металлическими, керамическими или жидкими, в виде расплавленной соли. От элементов сопротивления тепло передается нагреваемому материалу излучением и конвекцией.

3. Индукционные электропечи и нагревательные устройства. В установках этого типа нагреваемый металл попадает в переменное электромагнитное поле и в нем индуцируется электри-

ческий ток такой силы, что металл нагревается или даже плавится.

Применение электронагревательных устройств всех этих видов в нашей промышленности расширяется. Их используют как для нагрева заготовок под ковку, штамповку и прокатку, так и для нагрева заготовок и деталей под термообработку. Это обусловлено преимуществами электронагрева по сравнению с пламенным нагревом, к которым относятся: 1) сокращение продолжительности нагрева и уменьшение в связи с этим угара металла; 2) улучшение качества (равномерности) нагрева; 3) для контактных и индукционных установок годность к действию в любой момент (отсутствие затрат энергии на разогрев печи); 4) возможность простого и точного регулирования температуры (простота автоматического регулирования температуры); 5) меньшие габариты по сравнению с пламенными печами; 6) улучшение условий труда обслуживающего персонала; 7) удобство включения нагревательного устройства в автоматическую линию.

Таблица 69

Себестоимость нагрева 1 т кузнечных заготовок в электрических и пламенных печах, руб.

Статьи расходов	Индукционный электронагрев	Контактный электронагрев	Пламенный нагрев		Безокислительный газовый нагрев
			мазутом	природным газом	
Электроэнергия для нагрева . . . . .	2,23	1,625	—	—	—
Газ . . . . .	—	—	—	0,57	0,57
Мазут . . . . .	—	—	1,35	—	—
Охлажденная вода . . . . .	0,45	0,072	—	—	0,27
Сжатый воздух . . . . .	—	—	0,066	0,075	—
Электроэнергия для двигателей . . . . .	—	—	0,003	0,003	0,042
Заработная плата . . . . .	0,90	0,9	1,40	1,40	0,9
Угар металла . . . . .	0,80	0,8	2,00	2,0	0,8
Амортизация . . . . .	0,60	0,4	0,16	0,16	0,174
Текущий ремонт . . . . .	0,13	0,165	0,47	0,47	0,611
Итого . . . . .	5,13	3,962	5,449	4,678	3,124
Стоимость штампов . . . . .	8,5	20,6	10,00	10,0	8,5
Всего с учетом стоимости штампов . . . . .	13,63	23,362	15,449	14,678	11,624

Однако электронагревательные установки имеют и отрицательные характеристики по сравнению с пламенными печами, которые заставляют иногда отказываться от применения электронагрева: 1) более высокие капитальные затраты на изготовление установок; 2) высокая стоимость электроэнергии по сравнению с жидким и особенно газообразным топливом; 3) потребность в больших электрических мощностях.

Экономические расчеты по применению электронагрева подковку, штамповку, приведенные в литературе, очень разноречивы. В табл. 69 приведен пример подсчета себестоимости нагрева 1 т кузнечных заготовок в электрических и пламенных печах (в ценах 1962 г.).

Из данных табл. 69 следует, что без учета стоимости штампов наиболее экономичным является безокислительный газовый нагрев, затем контактный, индукционный электронагрев и, наконец, нагрев в газовых и мазутных пламенных печах.

В литературе имеются и другие данные, согласно которым стоимость индукционного электронагрева значительно выше стоимости нагрева в пламенных газовых и мазутных печах. Поэтому при решении вопроса об экономичности применения электронагрева необходимо сделать расчет себестоимости нагрева различными способами с учетом всех местных особенностей, а также правильно учесть экономию или перерасход на инструменте и вспомогательных материалах.

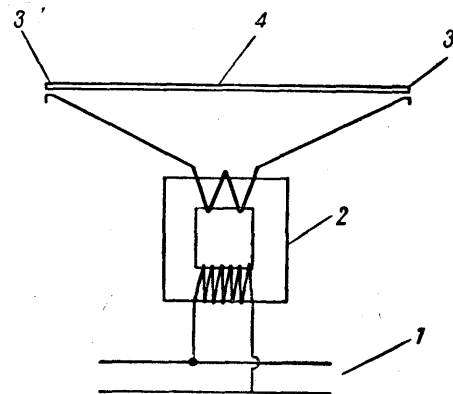


Рис. 155. Схема установки контактного нагрева:

1 — электрическая сеть; 2 — трансформатор;  
3 — зажимы-контакты; 4 — нагреваемая заготовка

Положительными качествами такого способа электронагрева являются быстрый и равномерный нагрев, так как тепло выделяется по всему сечению заготовки, низкий удельный расход

## § 69. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПЕЧИ ПРЯМОГО НАГРЕВА

К электронагревательным устройствам этого типа относятся прежде всего установки контактного нагрева. Нагреваемую заготовку включают во вторичную цепь трансформатора, через которую проходит ток большой силы, поэтому она быстро нагревается (рис. 155).

энергии (высокий к. п. д.) и очень небольшой угар металла. Однако этот способ электронагрева имеет и отрицательные стороны: заготовка должна быть одинакового сечения по длине, иначе места с меньшим сечением будут нагреваться значительно быстрее, чем другие места заготовок. Сечение заготовки должно быть не очень велико ( $d \leq 60-70$  мм), иначе намного увеличивается время нагрева, а значит потери в окружающее пространство и к. п. д. резко снижаются. Необходим очень хороший контакт концов заготовки с зажимами, подающими ток. Если контакт слабый, то в этом месте увеличивается сопротивление и происходит перегрев. Если же контакт слишком сильный, то часть тепла от заготовки отводится контактом и температура заготовки под контактом будет ниже, чем остальной части заготовки.

### 1. Расчет установок контактного нагрева

Если пренебречь потерями тепла в окружающее пространство и считать, что вся энергия, выделяющаяся в проводнике, расходуется на его нагрев, то этот процесс можно выразить следующим дифференциальным уравнением:

$$\frac{E^2}{R} d\tau = g \cdot c \cdot dt, \quad (413)$$

где  $E$  — напряжение, подводимое к концам нагреваемой заготовки, в;

$R$  — сопротивление заготовки, ом;

$\tau$  — время, сек;

$g$  — масса заготовки, кг;

$c$  — средняя теплоемкость материала заготовки, дж/кг·град;

$t$  — температура, °С.

Интегрируя это выражение по времени в пределах от 0 до  $\tau_{\text{нагр}}$  и по температуре в пределах  $t_1 - t_2$  °С, получим

$$\tau_{\text{нагр}} = \frac{g c R}{E^2} (t_2 - t_1) [\text{сек}]. \quad (414)$$

Если выразить массу заготовки через объем и плотность, а электрическое сопротивление — через удельное сопротивление и размеры заготовки, то получим следующее выражение:

$$g = l q \gamma [\text{кг}] \quad \text{и} \quad R = \frac{\rho l}{q} [\text{ом}], \quad (415)$$

где  $l$  — длина заготовки, м;

$q$  — площадь сечения заготовки, м<sup>2</sup>;

$\gamma$  — плотность материала заготовки,  $\text{кг/м}^3$ ;

$\rho$  — удельное электрическое сопротивление,  $\text{ом} \cdot \text{м}$ .

Подставив эти значения в уравнение (414), получим

$$\tau_{\text{нагр}} = \frac{l^2 \gamma \rho}{E^2} (t_2 - t_1) [\text{сек}], \quad (414a)$$

т. е. время нагрева пропорционально квадрату длины заготовки, ее объемной теплоемкости, удельному сопротивлению и разности конечной и начальной температур и обратно пропорционально квадрату напряжения на концах нагреваемой заготовки.

В действительности, однако, процесс нагрева протекает значительно сложнее, так как удельное электрическое сопротивление и теплоемкость металлов зависят от температуры.

Если в первом приближении принять эту зависимость линейной:

$$R_t = R_0 (1 + \alpha t) [\text{ом}] \text{ и } c_t = c_0 (1 + \beta t) \text{ дж/кг} \cdot \text{град}, \quad (416)$$

то дифференциальное уравнение (413) примет следующий вид:

$$\frac{E^2}{R_0 (1 + \alpha t)} \cdot d\tau = gc_0 (1 + \beta t) dt. \quad (413a)$$

Интегрируя это уравнение, получим

$$\tau_{\text{нагр}} = \frac{gc_0 R_0}{E^2} \left[ (t_2 - t_1) + \frac{\alpha + \beta}{2} (t_2^2 - t_1^2) + \frac{\alpha \cdot \beta}{3} (t_2^3 - t_1^3) \right] [\text{сек}]. \quad (417)$$

Решая это уравнение относительно  $E$ , будем иметь

$$E = \sqrt{\frac{gc_0 R_0}{\tau_{\text{нагр}}} \left[ (t_2 - t_1) + \frac{\alpha + \beta}{2} (t_2^2 - t_1^2) + \frac{\alpha \cdot \beta}{3} (t_2^3 - t_1^3) \right]} [\text{в}]. \quad (418)$$

Из последнего выражения, зная необходимую продолжительность нагрева заготовки, можем определить напряжение, которое надо подвести к ее концам, если не учитывать потерь тепла в окружающее пространство. В действительности это напряжение должно быть несколько больше (для компенсации потерь в окружающее пространство).

Потери тепла заготовкой в окружающее пространство определяют по законам теплопередачи конвекцией и лучеиспусканием:

$$Q_{\text{конв}} = \alpha_{\text{конв}} s (t_{\text{средн}} - t_{\text{возд}}) \cdot \frac{\tau_{\text{нагр}}}{1000} [\text{кдж}], \quad (419)$$

$$Q_{\text{луч}} = cs \left[ \left( \frac{t_{\text{средн}} + 273}{100} \right)^4 - \left( \frac{t_{\text{возд}} + 273}{100} \right)^4 \right] \cdot \frac{\tau_{\text{нагр}}}{1000} [\text{кдж}], \quad (420)$$

где  $\alpha_{\text{конв}}$  — коэффициент теплоотдачи конвекцией,  $\text{вт/м}^2 \cdot \text{град}$ ;

$c$  — коэффициент излучения поверхности заготовки,  $\text{вт/м}^2 \cdot ^\circ \text{K}^4$ ;

$s$  — боковая поверхность заготовки,  $\text{м}^2$ ;

$t_{\text{средн}}$  — средняя температура поверхности заготовки,  $^\circ \text{C}$ ,

$$t_{\text{средн}} = 0,65 (t_{\text{кон}} - t_{\text{нач}}) + t_{\text{нач}}, [^\circ \text{C}];$$

$t_{\text{возд}}$  — температура окружающего воздуха,  $^\circ \text{C}$ .

Количество энергии, необходимое для нагрева одной заготовки, определяют по формуле

$$W_1 = \frac{E^2}{R_{\text{сред}} \cdot 1000} \cdot \tau_{\text{нагр}} [\text{кдж}]. \quad (421)$$

Количество электроэнергии, теряемое в окружающее пространство:

$$W_2 = Q_{\text{конв}} + Q_{\text{луч}} [\text{кдж}]. \quad (422)$$

Полное напряжение, которое надо подвести к заготовке с учетом потерь в окружающее пространство

$$\frac{E_{\text{полн}}^2}{R_{\text{сп}} \cdot 1000} \tau_{\text{нагр}} = W_1 + W_2. \quad (423)$$

Из отношения выражений (423) и (421) получают:

$$\frac{E_{\text{полн}}^2}{E^2} = \frac{W_1 + W_2}{W_1} \text{ и } E_{\text{полн}} = E \sqrt{\frac{W_1 + W_2}{W_1}} [\text{в}]. \quad (424)$$

## 2. Конструкция установок

Конструкции промышленных установок контактного нагрева для нагрева заготовок под гибку, ковку и штамповку наиболее тщательно были разработаны на Горьковском автозаводе инженерами В. А. Лапшиным и Е. И. Натанзоном.

На рис. 156 показана схема одной из таких установок типа К-13, а на рис. 157 — общий вид установки АК-1.

Зажим заготовок осуществляют пневматическими цилиндрами, причем если на установке К-13 сила давления на контакты равна 1800  $\text{кГ}$ , то на установке АК-1 — 3000  $\text{кГ}$ . Заготовку можно зажимать и при помощи пружинного устройства с педалью.

Технические данные установки АК-1 следующие: мощность 150  $\text{кВА}$ ; первичное напряжение — 380  $\text{В}$ ; вторичное напряже-

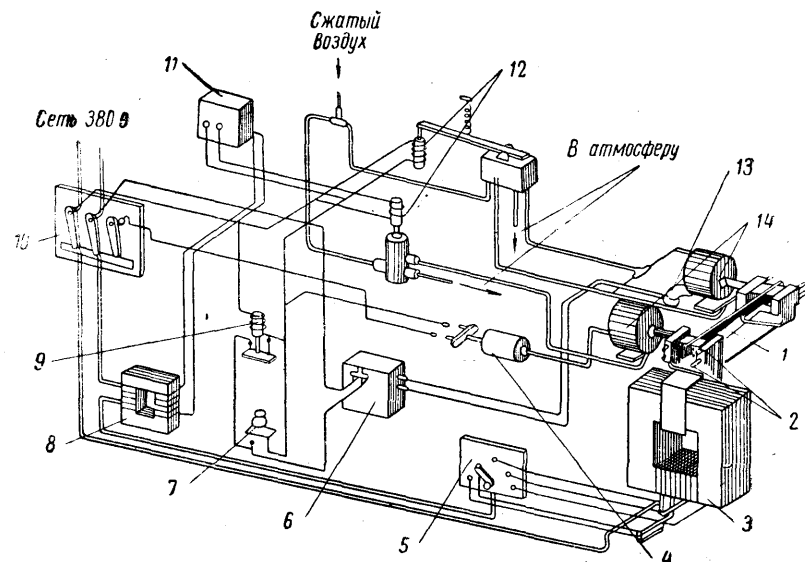


Рис. 156. Схема работы электронагревательной установки К-13:

1 — нагреваемая деталь; 2 — каналы водяного охлаждения; 3 — силовой трансформатор; 4 — пневмоэлектронный клапан; 5 — переключатель ступеней напряжения; 6 — фотопирометр; 7 — кнопка «Пуск»; 8 — трансформатор тока; 9 — реле блокировки; 10 — контактор; 11 — реле тока; 12 — электропневматический клапан; 13 — фотоэлемент; 14 — цилиндры зажимных головок

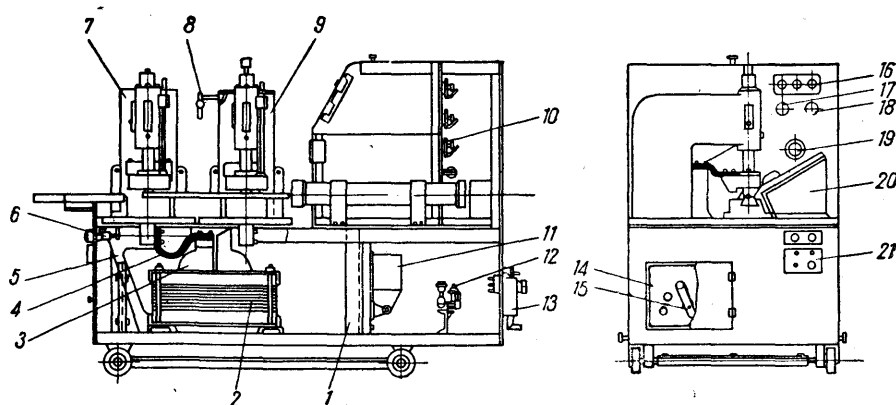


Рис. 157. Общий вид установки контактного нагрева АК-1:

1 — каркас; 2 — трансформатор; 3 — витки вторичной обмотки; 4 — гибкие медные шины; 5 — кронштейн передней головки; 6 — пружинные упоры; 7 и 9 — передняя и задняя контактные головки; 8 — головка фотопирометра; 10 — панель с электрической аппаратурой; 11 — контактор; 12 — электропневматические пластины; 13 — сливная воронка; 14 — переключатель ступеней напряжения; 15 — перемычка переключателя; 16 — сигнальные лампы; 17 — электросчетчик; 18 — манометр; 19 — амперметр; 20 — механизм загрузки заготовок; 21 — кнопочная панель

ние — 8,1—13,6 в; диаметр нагреваемых заготовок — 20—42 мм; длина — 400—650 мм; производительность 60—80 шт/ч; сила, действующая на контакты ~3000 кГ; к. п. д. установки — 74,5%. Габариты установки АК-1; длина 2150 мм; ширина 1100 мм; высота 1650 мм; вес — 2500 кг.

Так как время нагрева (заготовок) очень незначительно, то во избежание перегрева заготовок применяют автоматический регулятор на базе фотопирометра, выключающего ток при достижении на поверхности заготовки определенной температуры.

Применяемая продолжительность нагрева в зависимости от диаметра заготовки следующая:

d, мм . . . .	20	25	30	35	40	45	50	60	70
τ, сек . . . .	10	16	22	30	38	47	57	86	120

Примечание: τ — время нагрева при скорости выделения энергии 20,9 кДж/сек на 0,1 м длины заготовки.

Удельный расход электроэнергии при нагреве заготовок до 1200°С ~ 325 квт·ч на 1 т нагретого металла, что соответствует к. п. д. ~ 75%.

Другим типом электропечей прямого нагрева являются установки для нагрева конца заготовки в электролите. Схема такой установки показана на рис. 158. К сосуду с электролитом (раствором поташа или едкого калия), выполняющему роль анода, подводят постоянный ток. Заготовку, которая является катодом, соединяют с отрицательным полюсом. При опускании заготовки в электролит и при пропускании тока начинается электролиз и на катоде выделяется из раствора газ. Ток, пробивая оболочку газа, выделяет тепло, и конец заготовки, опущенный в электролит, быстро нагревается.

Установки такого типа нагревают небольшие заготовки диаметром до 35—40 мм, к. п. д. невысок. Они могут работать и на переменном токе, но к. п. д. их в этом случае еще ниже.

Физико-технический институт Белорусской Академии наук выпускает автоматы электрического нагрева, ко-

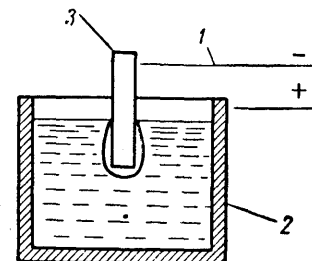


Рис. 158. Схема установки электролитного нагрева:

1 — электрическая сеть; 2 — сосуд с электролитом; 3 — нагреваемая заготовка

торые могут быть использованы при обработке металлов давлением.

Краткая характеристика такого автомата следующая: размеры нагреваемых заготовок под объемную штамповку и выдавливание —  $d=10-36$  мм;  $l=10-60$  мм; под высадку —  $d=5-12$  мм,  $l_{\text{нагр}}=5-60$  мм.

Контролируемый диапазон температур —  $800-1500^{\circ}\text{C}$ . Напряжение рабочего тока: постоянного — регулируемое от 65 до 300 в; переменного — не менее 200 в. К. п. д. нагрева — не выше 0,38 для постоянного тока и 0,14 — для переменного. Габаритные размеры: длина 1050 мм, ширина 920 мм, высота 2050 мм.

## § 70. ЭЛЕКТРОПЕЧИ КОСВЕННОГО НАГРЕВА

Электропечи этого типа в настоящее время очень широко распространены не только при обработке металлов давлением и термообработке, но также в других отраслях производства: в химической и пищевой промышленности, при производстве строительных материалов и стекла, в быту и т. д.

Основные преимущества электропечей этого типа следующие:

1) возможность равномерного нагрева при соответствующем расположении нагревателей, применении нагрева в солях и устройстве циркуляции печной атмосферы; 2) удобство и простота как ручного, так и автоматического регулирования температуры; 3) компактность, чистота и создание культурных условий для обслуживающего персонала; 4) возможность и удобство применения защитных атмосфер и вакуума.

Однако печи этого типа имеют недостатки: 1) необходимость затраты энергии на разогрев печи, на доведение рабочего пространства до требуемой температуры; 2) обычно более низкий к. п. д., чем к. п. д. установок контактного или индукционного нагрева (кроме установок электролитного нагрева); 3) необходимость периодической смены нагревателей (элементов сопротивления) и др.

В металлообрабатывающей промышленности электропечи косвенного нагрева применяют для сушки небольших по размерам, но выполненных с большой точностью стержней при производстве стального, чугунного и цветного литья, для термообработки мелких и средних деталей, для нагрева цветных металлов и сплавов под обработку давлением, для плавления цветных сплавов на алюминиевой и магниевой основе, для нагрева под термообработку и обработку давлением в вакууме и в защитных атмосферах.

Так как типы и конструкции печей с элементами сопротивления многочисленны и разнообразны, то разделим их на группы по температуре нагрева: низкотемпературные ( $t_{\text{нагр}} \leq 600-650^{\circ}\text{C}$ ); среднетемпературные ( $t_{\text{нагр}} = 600-650-1100-1150^{\circ}\text{C}$ ) и высокотемпературные ( $t_{\text{нагр}} > 1150^{\circ}\text{C}$ ).

Каждая из этих групп печей в свою очередь может быть разделена на печи с периодической загрузкой (камерные, шахтные и др.) и печи с непрерывной загрузкой (проходные — толкательные, конвейерные и др.).

В низкотемпературных печах преобладает теплопередача конвекцией, поэтому их оборудуют обычно искусственной циркуляцией атмосферы печи. Иногда нагревательные элементы сосредоточивают в специальной камере (так называемые калориферные печи).

На рис. 159 показана камерная калориферная печь, а на рис. 160 — конвейерная печь непрерывного действия.

В среднетемпературных, так же как и высокотемпературных печах теплопередача происходит главным образом излучением, поэтому их устраивают обычно без искусственной циркуляции. Среднетемпературные печи выполняют с металлическими элементами сопротивления, в большинстве случаев в виде проводочных спиралей или ленты.

Печи этого типа наиболее многочисленны. Они бывают камерные, шахтные, колпаковые, проходные — толкательные, конвейерные, с вращающимся подом, барабанные, протяжные для термообработки прсволоки и ленты и т. д. На рис. 161 показана камерная, а на рис. 162 — толкательная электропечь с гидравлическими толкателем и вытаскивателем. Печи этих типов можно использовать для нагрева слитков и заготовок из цветных сплавов под обработку давлением.

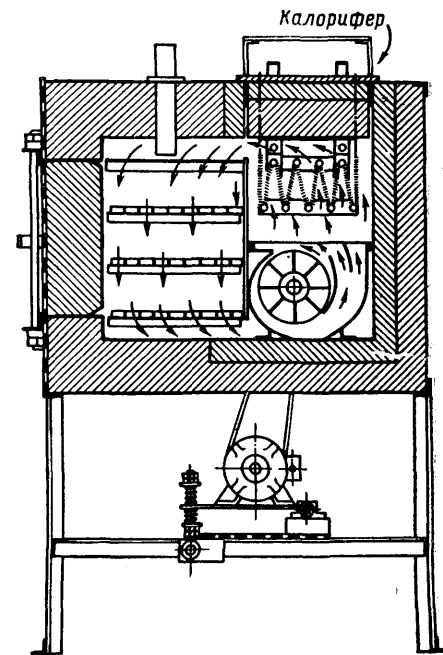


Рис. 159. Камерная электрическая печь с принудительной циркуляцией воздуха и калорифером



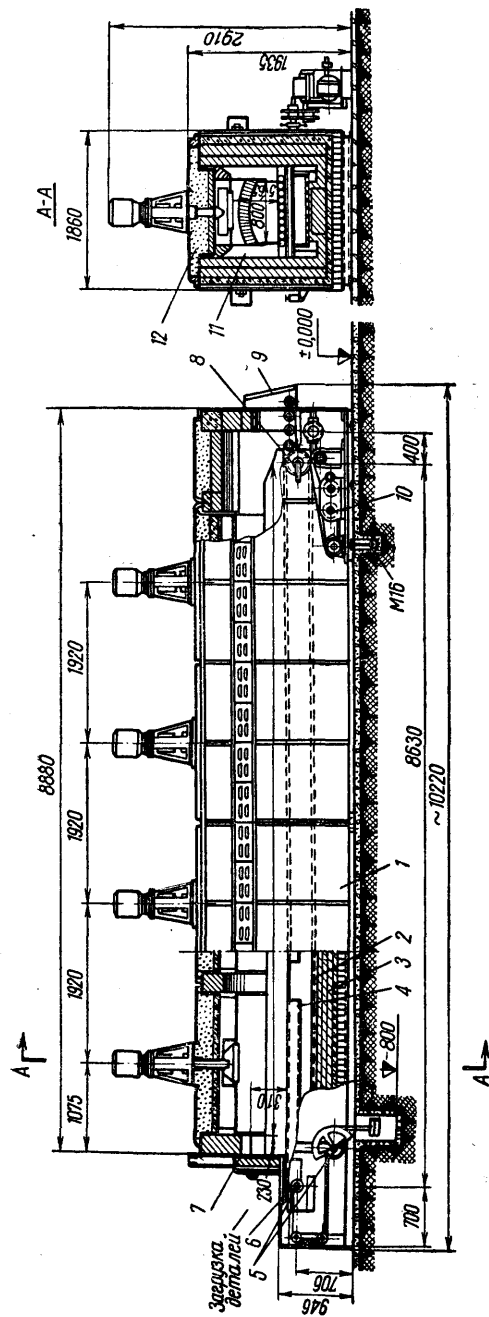


Рис. 160. Низкотемпературная конвейерная электрическая печь:

1 — кожух; 2 — лента конвейера; 3 — футеровка; 4 — подовый настил; 5 — натяжная станция; 6 — ведомый вал; 7 и 9 — загрузочная и разгрузочная дверцы; 8 — ведущий вал; 10 — привод; 11 — нагревательные элементы; 12 — крышка вентилятора

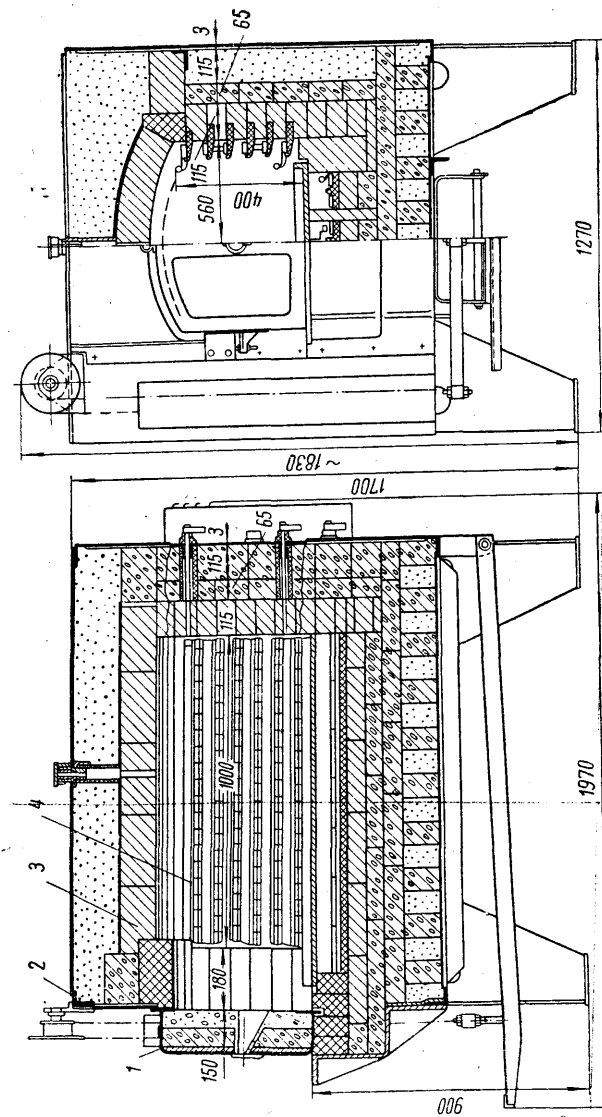


Рис. 161. Камерная печь с ленточными нагревателями на керамических полочках;

1 — дверца; 2 — кожух печи; 3 — футеровка; 4 — нагреватели

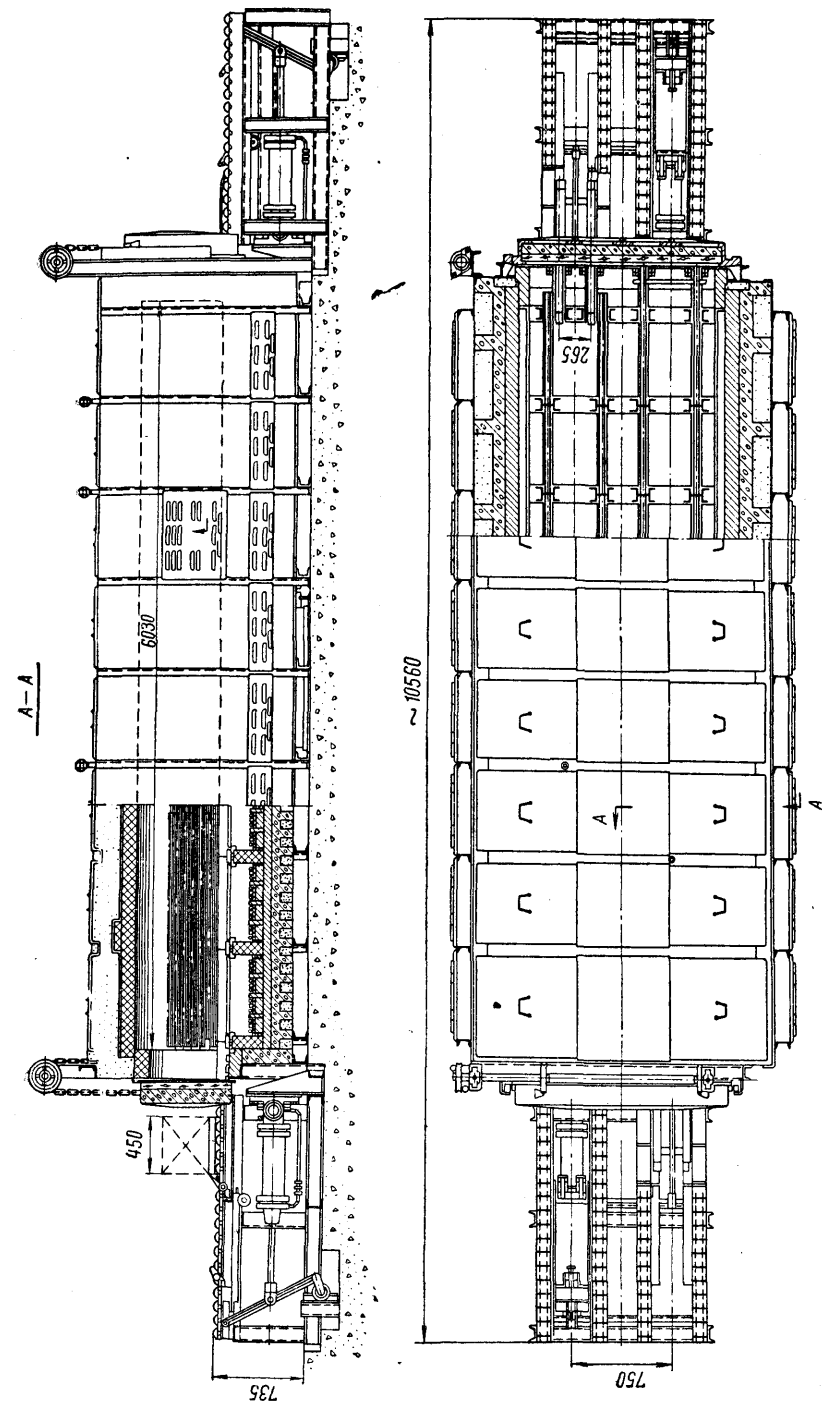


Рис. 162. Толкательная электрическая печь с гидравлическими толкателем и вытаскивателем

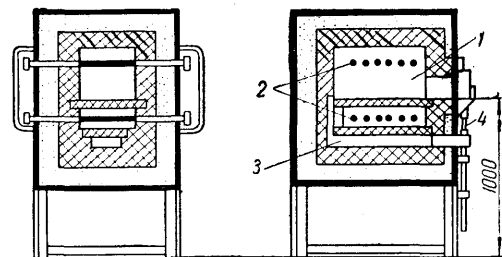


Рис. 163. Электрическая печь с силитовыми нагревателями для нагрева стальных заготовок под ковку и штамповку в защитной атмосфере:

1 — рабочая камера; 2 — силитовые нагреватели; 3 — камера для создания защитной атмосферы путем крекинга нефтепродуктов; 4 — подвод нефтепродуктов

Высокотемпературные печи выполняют с нагревателями в виде керамических, графитовых, силитовых и глобаровых стержней и трубок или с металлическими элементами из тугоплавких металлов (платина, молибден, вольфрам). Последние применяют обычно в лабораторных печах. На рис. 163 показана электропечь с силитовыми нагревателями для нагрева мелких и средних стальных заготовок под ковку и штамповку. Печь может работать и с защитной атмосферой, которая создается путем крекинга нефтепродуктов (керосин, соляровое масло и др.) в нижнем канале печи.

Высокотемпературные печи могут быть непрерывного действия, чаще всего проходные — толкательные. Кроме указанных типов печей, для всех температур, начиная от 300 до 1300° С, можно применять электропечи с соляными ваннами. Ванны могут быть с наружным обогревом элементами сопротивления и так называемые электродные, когда в расплавленную соль опущены металлические электроды, к которым подведен ток, а жидкая соль между электродами служит элементом сопротивления. Расплавленная соль энергично циркулирует и температура во всей ванне достаточно равномерна. На рис. 164 приведена конструкция такой печи. Электродные печи имеют к. п. д. выше, чем ванны с наружным обогревом. Недостатком их является трудность разогрева, так как соль в твердом состоянии имеет другое удельное электрическое сопротивление, чем в жидком. Внешним источником необходимо создать между электродами небольшое количество жидкой соли для дальнейшей нормализации разогрева.

Соляные ванны могут быть как с периодической, так и с непрерывной загрузкой.

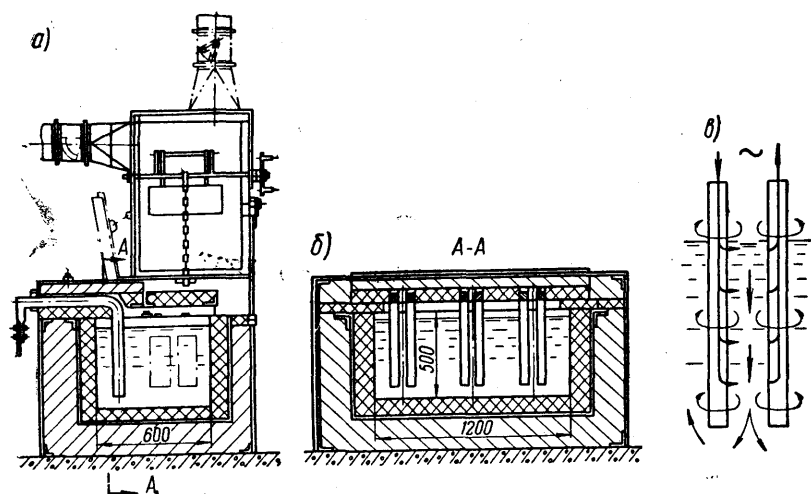


Рис. 164. Соляная шестиэлектродная ванна:

а — поперечный разрез; б — план ванны и схема соединения электродов; в — схема электромагнитного перемешивания

Расчет печей с элементами сопротивления складывается из определения размеров пода печи, расчета необходимой мощности и расчета размеров элементов сопротивления.

Размеры пода определяют, исходя из штучной производительности, времени нагрева и коэффициента загрузки пода (см. гл. VI). Мощность печи вычисляют путем составления теплового баланса.

Для нагревательной электропечи, работающей непрерывно, уравнение теплового баланса упрощается:

$$Q_{\text{расх}} = Q_1 + Q_5 [\text{вт}], \quad (425)$$

где  $Q_1$  — тепло, израсходованное на нагрев металла с учетом расхода тепла на нагрев поддонов, конвейера и других транспортных устройств;

$Q_5$  — потери тепла в окружающее пространство (см. гл. VIII).

Так как тепло вводится в печь только за счет электроэнергии, то мощность печи определяют по формуле

$$N = \frac{Q_{\text{расх}}}{1000} [\text{квт}]. \quad (426)$$

Печи косвенного нагрева требуют определенного времени на разогрев, поэтому после определения мощности, необходимой при

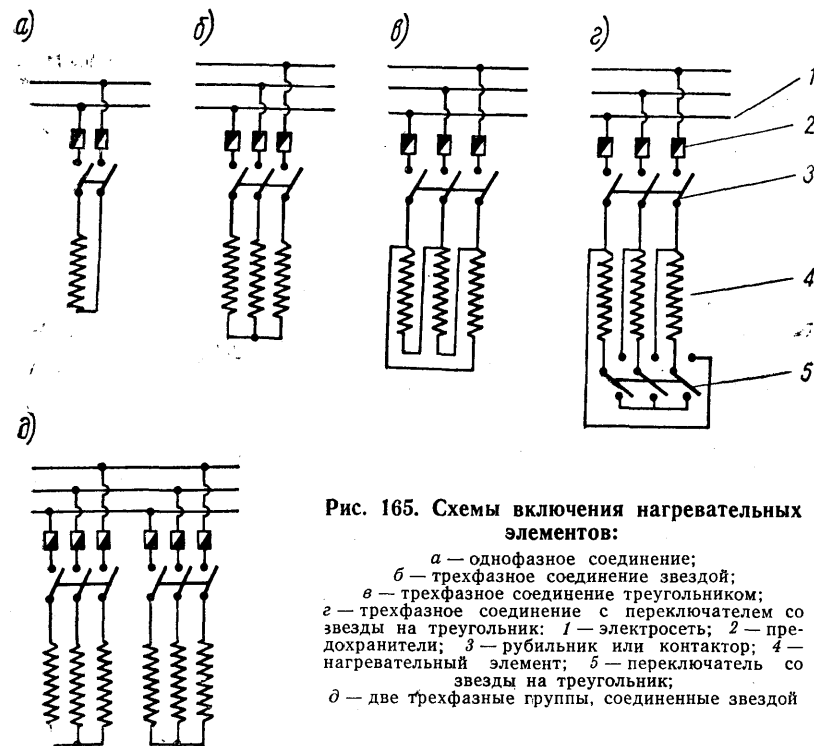


Рис. 165. Схемы включения нагревательных элементов:

а — однофазное соединение;  
б — трехфазное соединение звездой;  
в — трехфазное соединение треугольником;  
г — трехфазное соединение с переключателем со звезды на треугольник: 1 — электросеть; 2 — предохранители; 3 — рубильник или контактор; 4 — нагревательный элемент; 5 — переключатель со звезды на треугольник;  
д — две трехфазные группы, соединенные звездой

установившемся тепловом состоянии, определяют продолжительность разогрева

$$\tau_{\text{разогр}} = \frac{Q_{\text{разогр}}}{N} [\text{сек}], \quad (427)$$

где  $Q_{\text{разогр}}$  — количество тепла, требуемое на разогрев, т. е. доведение печи до рабочей температуры, кдж.

Если время  $\tau_{\text{разогр}}$  получается велико, то мощность печи может быть определена из последнего выражения при заданном необходимом  $\tau_{\text{разогр}}$ . В этом случае после доведения печи до рабочей температуры мощность должна снижаться тем или другим способом.

Расчетную мощность электрической печи, полученную по формулам (426) или (427), обычно увеличивают на 20—40% для создания дополнительного запаса мощности.

Расчет элементов сопротивления является основной частью расчета электропечи косвенного нагрева.

Прежде всего выбирают схему включения нагревателей, количество фаз и групп элементов. На рис. 165 показаны некоторые

возможные схемы включения нагревателей. Более сложные схемы применяют при больших мощностях и необходимости регулирования мощности в широких пределах.

Мощность, приходящаяся на один элемент:

$$N_{эл} = \frac{N}{nm} \text{ [квт]}, \quad (428)$$

где  $n$  — количество фаз;

$m$  — количество параллельных групп элементов.

Размеры нагревателей (сечения и длины) определяют из следующих соотношений:

$$N_{эл} = \frac{E^2}{R \cdot 10^3} \text{ [квт]}; \quad R = \frac{\rho l}{q} \text{ [ом]} \text{ и } W = \frac{N_{эл} \cdot 10^3}{F_{эл}} \text{ [вт/см}^2\text{]}, \quad (429)$$

где  $F_{эл}$  — боковая поверхность нагревателя (элемента сопротивления),  $\text{см}^2$ ;

$W$  — удельная поверхностная мощность (количество энергии, которое может быть передано с  $1 \text{ см}^2$  поверхности нагревателя в сек),  $\text{вт/см}^2$ .

Остальные обозначения те же, что в формулах (413) и (415).

Из уравнений (429) получаем:

для круглого (проволочного) нагревателя

$$d = \sqrt[3]{\frac{4 \cdot 10^5 \cdot N_{эл} \rho}{\pi^2 E^2 W}} \text{ [мм]}, \quad (430)$$

$$l = \sqrt[3]{\frac{10 N_{эл} E^2}{4 \pi \rho W^2}} \text{ [м]}, \quad (431)$$

где  $d$  — диаметр, мм;

$l$  — длина, м;

для прямоугольного сечения (лента) при заданном отношении большей стороны сечения к меньшей  $b/a = m$

$$a = \sqrt[3]{\frac{10^5 N_{эл}^2 \rho}{2m(1+m)E^2 W}} \text{ [мм]}, \quad (430a)$$

$$l = \sqrt[3]{\frac{10 N_{эл} E^2 m}{4(1+m)^2 \rho W^2}} \text{ [м]}, \quad (431a)$$

где  $a$  — толщина ленты, мм.

При расчете размеров нагревателей по этим формулам величиной  $W$  приходится задаваться. Величина  $W$  связана с разностью температур поверхности нагревателя и печи, а также с конструкцией и расположением элементов в печи. Если принять,

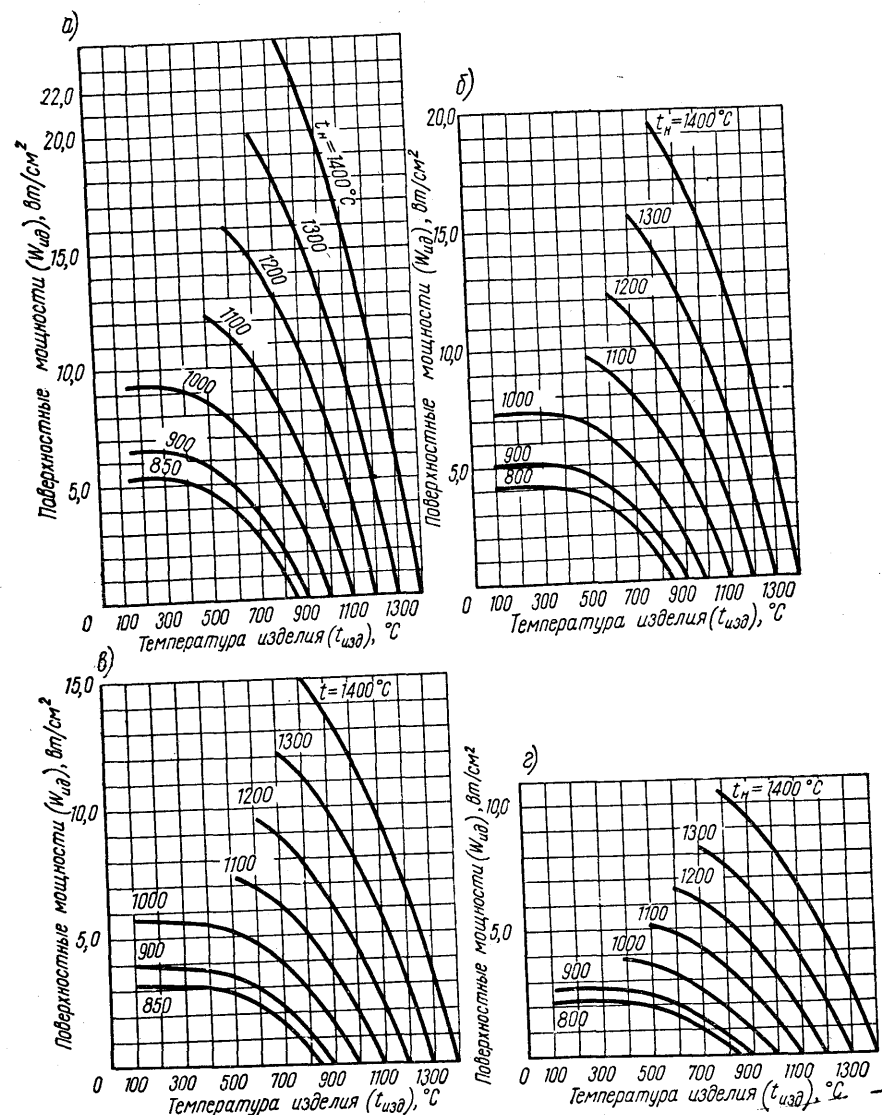


Рис. 166. Графики допустимых удельных поверхностных мощностей для идеальных нагревателей:

а — при нагреве стали; б — при нагреве латуни; в — при нагреве стали в защитной атмосфере; г — при нагреве алюминия

что поверхность нагревателя равномерно излучает тепло в печь и на нагреваемый металл, то, зная температуру нагрева металла, температуру поверхности нагревателя и соответствующие коэффициенты излучения, можно по законам излучения рассчитать количество энергии, передаваемое с единицы поверхности нагревателя  $W_{ид}$  в  $вт/см^2$ . Однако в действительности не вся поверхность элемента равномерно отдает тепло в печь. В зависимости от конструкции и расположения элемента часть излучения попадает с его поверхности только на стенки печи, а часть — на другие поверхности этого же элемента. Таким образом, действительное количество энергии, передаваемое в печь, будет меньше  $W_{ид}$ .

На графиках рис. 166 приведены значения  $W_{ид}$  в зависимости от температуры нагрева изделия  $t_{изд}$  и температуры поверхности нагревателя  $t_{пов}$  при нагреве разных металлов и сплавов, а в табл. 70 — рекомендуемые отношения  $W/W_{ид}$  в зависимости от конструкции и расположения нагревателей.

Таблица 70

Рекомендуемые отношения  $W/W_{ид}$  при потерях мощности через футеровку, равных 0,25 N

Тип нагревателя	Нагреваемый материал			
	Сталь A=0,8	Латунь A=0,6	Сталь в защитной атмосфере A=0,45	Алюминий A=0,3
Ленточный зигзагообразный нагреватель при $d/b=0,8$ . . . . .	0,46	0,48	0,51	0,54
Плоский ленточный зигзагообразный нагреватель при $d/b=0,2$ . . . . .	0,75	0,77	0,79	0,81
Проволочные спирали открытые и на трубках при $s/d=2$ и $s/D=2,0$ . . . . .	0,465	0,475	0,49	0,505
Ленточный зигзаг в пазу при $d/b=0,8$ ; $h/c=0,3$ ; $s/c=1,25$ . . . . .	0,44	0,46	0,495	0,535
Проволочная спираль в пазу при $s/d=2,0$ ; $s/D=2$ ; $h/c=1,5$ ; $s/c=1,5$ . . . . .	0,31	0,325	0,34	0,355
Ленточный зигзаг на керамической палочке при $d/b=0,8$ . . . . .	0,41	0,435	0,47	0,5
Проволочная спираль на керамической палочке при $s/d=2$ ; $s/D=2,0$ . . . . .	0,39	0,41	0,44	0,47

Конструкции нагревателей с обозначением размеров приведены на рис. 167.

Основные данные, характеризующие материалы, применяемые в качестве нагревателей, приведены в табл. 71.

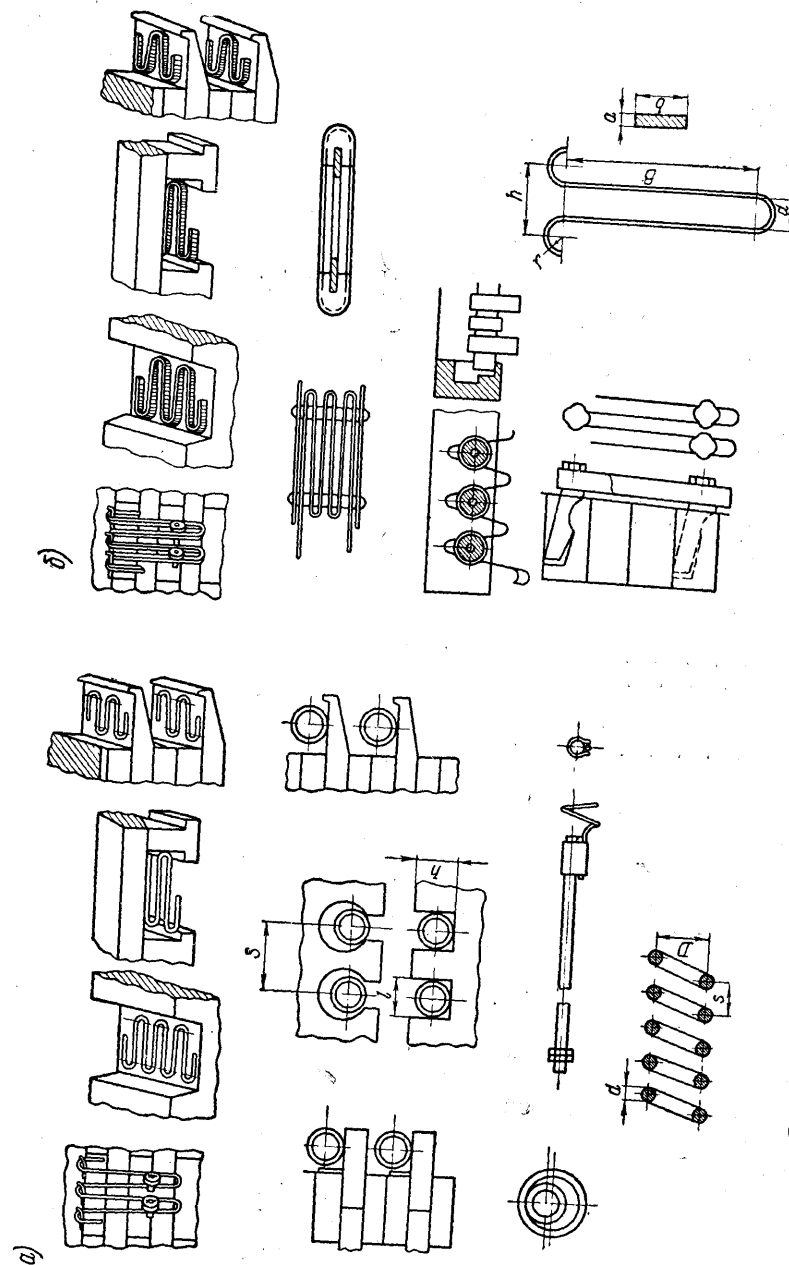


Рис. 167. Конструкции металлических элементов сопротивления и их крепление в печи:  
а — ленточные нагреватели; б — проволочные нагреватели

Таблица 71

## Характеристика материалов, применяемых для нагревательных элементов

Материал	Рекомендуемая температура, °С		Максимально допустимая температура, °С		Удельное электрическое сопротивление в зависимости от температуры ( $t$ ), $\rho \cdot 10^{-6} \cdot \text{ом} \cdot \text{м}$
	при непрерывном режиме работы	при прерывном режиме работы	при непрерывном режиме работы	при прерывном режиме работы	
Нихром Х20 Н80 . . . .	1050	1000	1150	1100	$(1,07 + 1,12) + 8,5 \cdot 10^{-5} t$
Нихром Х20 Н80 ТЗ . . .	1100	1050	1200	1150	$1,27 + 4 \cdot 10^{-5} t$
Нихром Х15 Н60 . . . .	950	900	1050	1100	$(1,09 + 1,12) + 14 \cdot 10^{-5} t$
Сталь Х23 Н18 (ЭИ 417) . . . . .	850	800	1000	950	$0,9 + 40 \cdot 10^{-5} t$
Сталь ЭИ 595 (модифицированная) . . . .	1050	1000	1200	1150	$1,4 + 5 \cdot 10^{-5} t$
Сталь ЭИ 626 (модифицированная) . . . .	1150	1100	1300	1250	$1,4 + 5 \cdot 10^{-5} t$
Фехраль Х13 Ю4 (ЭИ 60) . . . . .	750	650	900	800	$1,26 + 6 \cdot 10^{-5} t$
Платина . . . . .	1300	1200	1400	1300	$0,98 + 3,86 \cdot 10^{-5} t - 5,68 \cdot 10^{-5} t^2$
Вольфрам . . . . .	—	—	3000	—	$2,6 \cdot 10^{-3} t + 1,74 \cdot 10^{-5} t^2$ при $t$ от 500 до 3200°С
Глобар или силит . . .	1250	1200	1450	1400	800—1900

Примечание. При рабочей температуре нагреватель работает 12—15 тыс. ч. Максимально допустимая температура соответствует той, выше которой начинается интенсивное окисление или распыление материала нагревателя.

В расчет электродных соляных ванн, в которых расплавленная соль (табл. 72) является элементом сопротивления, входят не только определение размеров и мощности, которые рассчитывают так же, как для других электропечей косвенного нагрева, но и определение размеров сечения электродов.

Электродные электропечи питаются обычно током от понижающего трансформатора напряжением 8—30 в. Зная необходимую мощность печи, количество электродов и напряжение на них, определяют силу тока, приходящуюся на один электрод, а сечение его принимают такое, чтобы сила тока не превышала 1 а на 1 мм<sup>2</sup> сечения.

Таблица 72

## Характеристика солей, применяемых в ваннах

Название солей	Химическая формула	Температура плавления, °С	Область применения
Азотистокислый натрий Натриевая селитра Калиевая селитра	NaNO <sub>2</sub> NaNO <sub>3</sub> KNO <sub>3</sub>	213—271 308—330 327—353	Отпуск
Цианистый калий Цианистый натрий	KCN NaCN	555 560	Цементация
Хлористый калий Хлористый натрий Сода Поташ Хлористый барий	KCl NaCl Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> BaCl <sub>2</sub>	740—804 776—820 814—918 910 960	Закалка и нагрев под ковку и штамповку

## § 71. ИНДУКЦИОННЫЙ ЭЛЕКТРОНАГРЕВ

Если в переменное магнитное поле поместить кусок металла, то в нем индуцируется электродвижущая сила, под влиянием которой потечет переменный электрический ток и металл будет нагреваться. Электродвижущая сила и ток неодинаковы в сечении нагреваемого куска металла (заготовки). Они изменяются по экспоненциальному закону от поверхности к центру заготовки. Условно считают, что вся энергия выделяется в поверхностном слое определенной толщины, величина которого называется глубиной проникновения тока и определяется по формуле

$$\Delta = 5000 \cdot \sqrt{\frac{\rho_{эл}}{f\mu}} \text{ [см]}, \quad (432)$$

где  $f$  — частота тока, гц;

$\mu$  — магнитная проницаемость;

$\rho_{эл}$  — удельное электрическое сопротивление,  $10^{-6} \text{ ом} \cdot \text{м}$ .

Величины  $\rho$  и  $\mu$  изменяются при изменении температур. Удельное сопротивление  $\rho$  обычно при изменении температуры увеличивается, а магнитная проницаемость для ферромагнитных металлов и сплавов снижается от начального значения порядка десятков единиц до  $\mu=1$  (при точке Кюри). При нагреве диа-

магнитных и парамагнитных металлов магнитная проницаемость остается постоянной, увеличивается только удельное сопротивление. Вследствие этого величина глубины проникания тока может меняться с изменением температуры для разных металлов по-разному. Для углеродистых и низколегированных сталей —

$$-\Delta_{20^\circ\text{C}} = \frac{20}{\sqrt{f}} \text{ мм и } \Delta_{1000^\circ\text{C}} = \frac{600}{\sqrt{f}} \text{ мм. Для аустенитных сталей } -\Delta_{20^\circ\text{C}} = \frac{450}{\sqrt{f}} \text{ мм, а } \Delta_{1000^\circ\text{C}} = \frac{600}{\sqrt{f}} \text{ мм. Для меди } -\Delta_{40^\circ\text{C}} = \frac{70}{\sqrt{f}} \text{ мм.}$$

Для эффективного сквозного нагрева стальных заготовок под ковку, штамповку и прокатку (получения максимального к. п. д.) отношение глубины проникания  $\Delta$  к диаметру или толщине заготовки должно быть не более 3,5. В этом случае пределы целесообразного применения стандартных частот для нагрева стальных заготовок разного диаметра будут следующие:

Частота тока (f), гц . . .	50	500	1000	2500	8000
Диаметр заготовок (d), мм	150 и более	<del>70</del> × 160	50—120	30—80	15—40

В целях повышения производительности и к. п. д. индукционных установок иногда рационально использовать две частоты: в начальный период нагрева (до температуры магнитного превращения) — более низкую частоту (для заготовок диаметром более 50 мм — частоту 50 гц), а при более высоких температурах — повышенную частоту, выбранную в соответствии с вышеприведенными данными.

Продолжительность сквозного индукционного нагрева связана с рядом факторов. С точки зрения производительности и к. п. д. установки время нагрева должно быть как можно меньше. Однако при очень быстром нагреве получается значительная разность температур между поверхностью и центром заготовки.

На рис. 168 приведены кривые минимально допустимого времени нагрева для обработки давлением стальных заготовок диаметром до 120 мм, при конечной разности температур между поверхностью и центром 100° С. Некоторое увеличение продолжительности нагрева приводит к уменьшению конечной разности температур, но связано с некоторым снижением к. п. д. установок.

Для заготовок, имеющих форму, отличающуюся от формы сплошного цилиндра, частоту и продолжительность нагрева выбирают по тем же соотношениям, только вместо диаметра цилиндра принимают сторону сечения квадратной заготовки или меньшую сторону сечения для заготовки прямоугольного сечения.

При выборе частоты для индукционного нагрева полого цилиндра (трубы) необходимо соблюдать следующие условия:

$$f \geq \frac{3000000}{D_{\text{нар}}^2} \text{ и } 0,35\Delta_{\text{гор}} < a < 2,0\Delta_{\text{гор}}, \quad (433)$$

где  $D_{\text{нар}}$  — наружный диаметр цилиндра, мм;

$\Delta_{\text{гор}}$  — глубина проникания тока в горячий металл, мм;

$a$  — толщина стенки трубы, мм.

Для определения времени нагрева трубы можно пользоваться графиком на рис. 168, но считать толщину стенки трубы  $a$  как радиус сплошного цилиндра. Нагрев заготовок переменного сечения по длине или со сложным профилем сечения индукционным способом применяют редко, так как для этого требуются специальные индукторы.

Принципиальная схема индукционной установки для сплошного нагрева показана на рис. 169. Источником питания индукционного нагревательного устройства может быть ламповый генератор, если нагреву подвергаются заготовки диаметром меньше 20 мм, и машинный генератор или ионный преобразователь частоты, если нагреваются заготовки диаметром более 20 мм.

Практически чаще всего используют машинные генераторы. В схеме обязательно должны применяться конденсаторы, так как система индуктор — нагреваемый металл имеет низкий коэффициент мощности ( $\cos \varphi$ ).

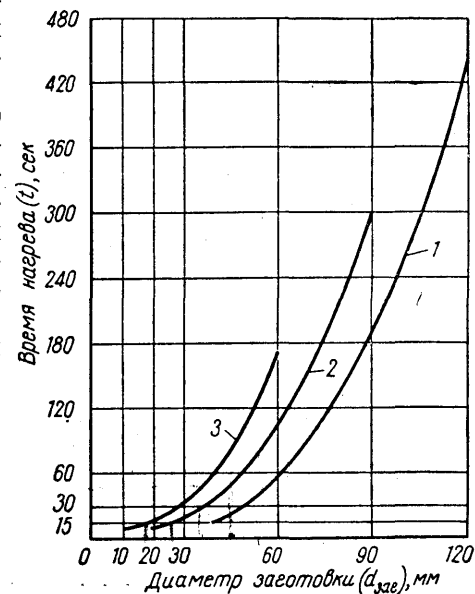


Рис. 168. Кривые зависимости минимально допустимого времени сквозного нагрева стальных заготовок от их диаметра при конечной разности температур между поверхностью и центром 100° С:

1 — при частоте тока 1000 гц; 2 — при частоте тока 2500 гц; 3 — при частоте тока 8000 гц

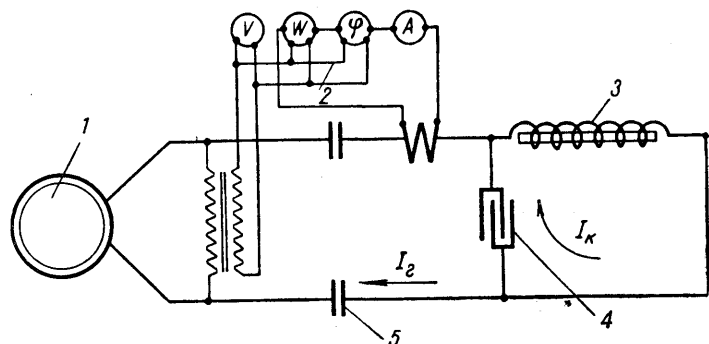


Рис. 169. Электрическая схема индукционного нагревательного устройства: 1 — генератор; 2 — комплект измерительных приборов; 3 — индуктор с помещенной в него заготовкой; 4 — конденсаторная батарея; 5 — контактор

Энергетические показатели установок сквозного нагрева стальных заготовок следующие:

Частота тока, $гц$ . . . . .	1000—8000	50
К. п. д. генератора . . . . .	0,8—0,88	—
К. п. д. индуктора . . . . .	0,7—0,75	0,55—0,7
Удельный расход электроэнергии, $кдж/кг$ металла . . . . .	1440—1800	1260—1620
Вес нагреваемого металла при установленной мощности питающей сети 100 $квт$ , $кг/ч$ . . . . .	до 250	до 280

Таким образом, установки для индукционного нагрева состоят из двух частей: генератора, преобразующего ток 50  $гц$  в ток повышенной частоты и находящегося обычно в специальном помещении, и нагревателя, предназначенного для нагрева заготовок и расположенного около машины-орудия, которую он обслуживает. Нагреватель состоит из индуктора, конденсаторов, регулирующих устройств и приспособлений для загрузки и выгрузки нагреваемых заготовок.

Конструкции нагревателей бывают самыми разнообразными в зависимости от размеров, формы и величины нагреваемой заготовки или ее части. При этом нагреватель может быть механически и электрически не связан с работой машины (орудия) и может быть встроен в нее и работать вместе с ней в едином автоматическом цикле. В первом случае нагреватели бывают периодического и непрерывного действия, во втором — только непрерывного действия.

Нагреватель периодического действия работает следующим образом: в индуктор вводят заготовку или нагреваемую ее часть

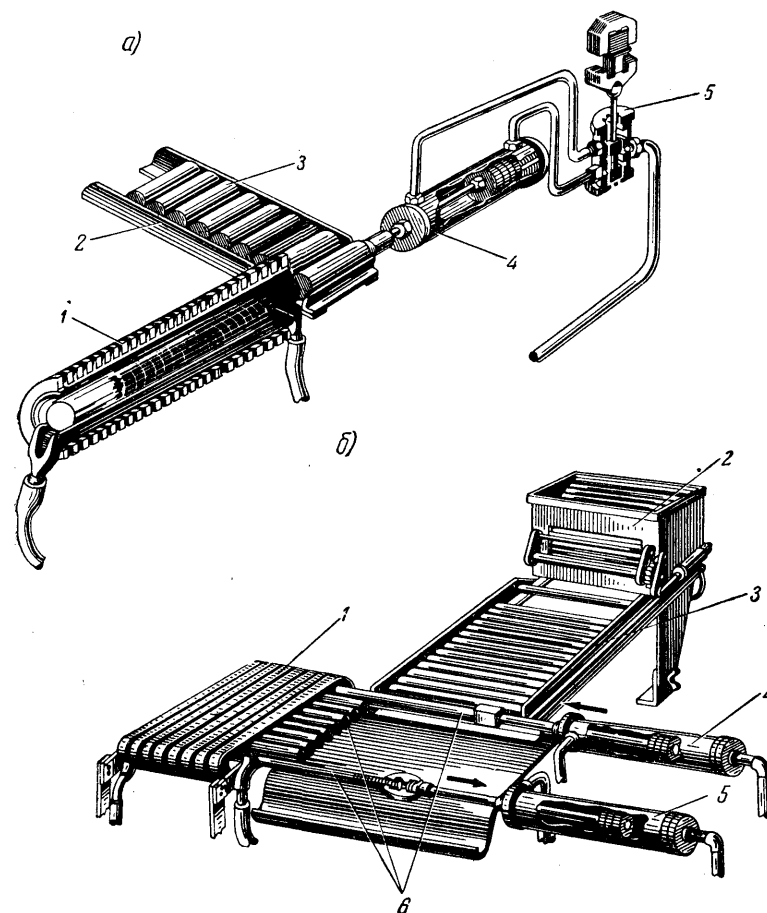


Рис. 170. Кинематические схемы индукционных нагревательных установок непрерывного действия:

а — установка методического действия для мерных заготовок: 1 — индуктор; 2 — загрузочное устройство; 3 — заготовка; 4 — толкатель; 5 — электропневматический кран; б — установка для нагрева концов мерных заготовок: 1 — индуктор; 2 — бункер; 3 — наклонная плоскость загрузочного устройства; 4 — пневматический толкатель; 5 — пневматический вытаскиватель; 6 — заготовки

и включают ток. Через определенный промежуток времени реле выключает ток и нагретая заготовка выталкивается из индуктора.

Нагреватели непрерывного действия, широко применяемые в настоящее время, работают с автоматической подачей и выдачей нагретой заготовки через определенные промежутки времени. Кинематические схемы таких нагревателей для нагрева всей заготовки и для нагрева конца заготовки приведены на рис. 170.



Расчет установок сквозного индукционного нагрева заключается в выборе частоты тока, определении времени нагрева, расчете размеров (диаметра и длины) индуктора, определении необходимой мощности генератора и конденсаторных батарей. Исходными данными являются материал и размеры нагреваемой заготовки, а также производительность установки или темп подачи заготовок к машине (орудию).

Принципиальная сущность расчета индукционного нагрева ясна из следующего примера.

**Пример.** Рассчитать основные параметры индукционной установки для нагрева заготовок из среднеуглеродистой стали. Размеры заготовок:  $d=45$  мм;  $l=80$  мм. Масса  $g=1,0$  кг. Производительность установки — 300 шт. в час.

Темп выдачи  $\frac{3600}{300} = 12$  сек;  $t_{\text{нагр}}=1200^\circ\text{C}$ .

Частоту тока выбираем в соответствии с приведенными выше данными — 2500 гц.

Время нагрева определяем по графику ( $\sim 50$  сек) и принимаем его для более равномерного нагрева несколько больше — 60 сек.

Количество одновременно нагреваемых заготовок

$$n = N \tau_{\text{нагр}} = 300 \frac{60}{3600} = 5 \text{ шт.}$$

Определяем размеры индуктора.

Внутренний диаметр катушки с учетом электрической и тепловой изоляции принимаем на 25÷50 мм больше диаметра заготовки

$$D_{\text{вн}} = 45 + 35 = 80 \text{ мм.}$$

Длину индуктора определяем по длине лежащих заготовок плюс 1÷2d (на расстояние от конца заготовки до конца индуктора, чтобы уменьшить потери тепла с торцевой поверхности заготовки):

$$L = n \cdot l + (1 + 2) d = 5 \cdot 80 + 2 \cdot 45 = 490 \text{ мм.}$$

Необходимая мощность для нагрева заготовок

$$N = \frac{c_0^{1200} t_{\text{нагр}} g n}{\tau_{\text{нагр}}} = \frac{0,704 \cdot 1200 \cdot 1,0 \cdot 5}{60} = 70 \text{ кВт,}$$

где  $c_0^{1200}$  — средняя теплоемкость стали — 0,704 кдж/кг·град.

Принимая к. п. д. индуктора равным 0,725, а к. п. д. генератора — 0,85, получим необходимую мощность индуктора:

$$N_{\text{инд}} = \frac{70}{0,725} = 97 \text{ кВт,}$$

$$\text{а генератора } N_{\text{ген}} = \frac{97}{0,85} = 115 \text{ кВт.}$$

Мощность конденсаторной батареи при  $\cos \varphi = 0,15-0,2$

$$N_c = \frac{N_{\text{инд}}}{\cos \varphi} = \frac{97}{0,15 \div 0,2} = 650 \div 485 \text{ кВа (реактивной мощности).}$$

При реактивной мощности одного конденсатора типа ЭМВ — 750—2,5, равной 125 кВа, количество банок конденсаторной батареи будет:

$$n_c = \frac{650 \div 485}{125} = 5 \div 4 \text{ шт.}$$

## ТЕПЛОТВОРНОСТЬ ГОРЮЧИХ ГАЗОВ

Название газа	Химическая формула	Теплотворность, кДж/м³ при н. ф. у.	
		высшая	низшая
Оксись углерода	CO	12 640	12 640
Водород	H <sub>2</sub>	12 770	10 780
Метан	CH <sub>4</sub>	39 800	35 800
Этилен	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	63 650	59 020
Этан	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	69 920	63 640
Пропилен	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub>	87 630	81 310
Пропан	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	99 230	91 270
Бутилен	C <sub>4</sub> H <sub>8</sub>	115 770	107 310
Бутан	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	128 530	118 490
Пентан	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	159 100	146 540
Сероводород	H <sub>2</sub> S	25 540	2 345

ПРИЛОЖЕНИЕ 2  
СРЕДНИЕ ТЕПЛОЕМКОСТИ ГАЗОВ ( $c_p'$ ), кДж/м³·град, при н. ф. у.

Температура, °C	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	CO	H <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	SO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	Воздух	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	H <sub>2</sub> S
0	1,3063	1,2937	1,2979	1,2770	1,5994	1,4947	1,7233	1,5491	1,2979	1,8255	1,5073
100	1,3188	1,2979	1,3021	1,2895	1,7082	1,5073	1,8129	1,6412	1,3021	2,0641	1,5324
200	1,3356	1,3021	1,3063	1,2979	1,7878	1,5240	1,8883	1,7585	1,3063	2,2818	1,5617
300	1,3565	1,3063	1,3147	1,3000	1,8631	1,5407	1,9552	1,8883	1,3147	2,4953	1,5952
400	1,3775	1,3147	1,3272	1,3021	1,9301	1,5659	2,0180	2,0139	1,3272	2,6879	1,6339
500	1,3984	1,3272	1,3440	1,3063	1,9887	1,5910	2,0683	2,1395	1,3440	2,8638	1,6705
600	1,4151	1,3398	1,3565	1,3105	2,0432	1,6161	2,1143	2,2609	1,3565	3,0271	1,7082
700	1,4361	1,3523	1,3733	1,3147	2,0850	1,6412	2,1520	2,3781	1,3691	3,1694	1,7459
800	1,4486	1,3649	1,3858	1,3188	2,1311	1,6664	2,1813	2,4953	1,3816	3,3076	1,7836
900	1,4654	1,3775	1,3984	1,3230	2,1688	1,6957	2,2148	2,6000	1,3984	3,4322	1,8171
1000	1,4779	1,3900	1,4151	1,3314	2,2023	1,7250	2,2358	2,7005	1,4110	3,5462	1,8506
1100	1,4905	1,4026	1,4235	1,3356	2,2358	1,7501	2,2609	2,7884	1,4235	3,6551	1,8841
1200	1,5031	1,4151	1,4361	1,3440	2,2651	1,7752	2,2776	2,8638	1,4319	3,7514	1,9092
1300	1,5114	1,4235	1,4486	1,3523	2,2902	1,8045	2,2986	2,8889	1,4445	3,7514	—
1400	1,5198	1,4361	1,4570	1,3606	2,3143	1,8296	2,3195	2,9601	1,4528	—	—
1500	1,5282	1,4445	1,4654	1,3691	2,3362	1,8548	2,3404	3,0312	1,4696	—	—

Темпе- ратура, °C	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	CO	H <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	SO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	Воздух	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	H <sub>2</sub> S
1600	1,5366	1,4528	1,4738	1,3733	2,3572	1,9357	2,3614	—	1,4779	—	—
1700	1,5449	1,4612	1,4831	1,3816	2,3739	1,9008	2,3823	—	1,4863	—	—
1800	1,5533	1,4696	1,4905	1,3900	2,3907	1,9217	—	—	1,4947	—	—
1900	1,5617	1,4738	1,4989	1,3984	2,4074	1,9427	—	—	1,4989	—	—
2000	1,5701	1,4831	1,5031	1,4068	2,4242	1,9636	—	—	1,5073	—	—
2100	1,5742	1,4905	1,5114	1,4151	2,4367	1,9845	—	—	1,5156	—	—
2200	1,5826	1,4922	1,5156	1,4235	2,4493	2,0013	—	—	1,5198	—	—
2300	1,5910	1,5031	1,5198	1,4319	2,4618	2,0180	—	—	1,5240	—	—
2400	1,5952	1,5073	1,5282	1,4361	2,4702	2,0348	—	—	1,5324	—	—
2500	1,6036	1,5114	1,5324	1,4445	2,4818	2,0515	—	—	1,5366	—	—
2600	1,6077	1,5198	1,5366	1,4528	2,5205	2,0683	—	—	1,5449	—	—
2700	1,6161	1,5282	1,5449	1,4612	2,5330	2,0850	—	—	1,5533	—	—
2800	1,6245	1,5366	1,5491	1,4654	2,5456	2,1018	—	—	1,5575	—	—
2900	1,6287	1,5449	1,5617	1,4738	2,5581	2,1143	—	—	1,5659	—	—
3000	1,6370	1,5491	1,5701	1,4831	2,5707	2,1269	—	—	1,5701	—	—

## П Р И Л О Ж Е Н И Е 3

## ИНТЕГРАЛ ОШИБОК ГАУССА ИЛИ ФУНКЦИЯ КРАМПА

$$\operatorname{erf}(z) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^z e^{-n^2} dn$$

z	erf(z)	z	erf(z)	z	erf(z)	z	erf(z)	z	erf(z)
0,00	0,0000	0,36	0,3893	0,71	0,6847	1,06	0,8661	1,41	0,9539
0,01	0,0113	0,37	0,3992	0,72	0,6914	1,07	0,8698	1,42	0,9554
0,02	0,0226	0,38	0,4090	0,73	0,6981	1,08	0,8733	1,43	0,9569
0,03	0,0338	0,39	0,4187	0,74	0,7047	1,09	0,8768	1,44	0,9583
0,04	0,0451	0,40	0,4284	0,75	0,7112	1,10	0,8802	1,45	0,9597
0,05	0,0564	0,41	0,4380	0,76	0,7175	1,11	0,8835	1,46	0,9611
0,06	0,0676	0,42	0,4475	0,77	0,7238	1,12	0,8869	1,47	0,9624
0,07	0,0789	0,43	0,4569	0,78	0,7300	1,13	0,8900	1,48	0,9637
0,08	0,0901	0,44	0,4662	0,79	0,7361	1,14	0,8931	1,49	0,9649
0,09	0,1013	0,45	0,4755	0,80	0,7421	1,15	0,8961	1,50	0,9661
0,10	0,1125	0,46	0,4847	0,81	0,7480	1,16	0,8991	1,60	0,9763
0,11	0,1236								

$z$	$\text{erf}(z)$	$z$	$\text{erf}(z)$	$z$	$\text{erf}(z)$	$z$	$\text{erf}(z)$	$z$	$\text{erf}(z)$
0,12	0,1348	0,47	0,4937	0,82	0,7538	1,17	0,9020	1,07	0,9838
0,13	0,1459	0,48	0,5027	0,83	0,7595	1,18	0,9048	1,80	0,9891
0,14	0,1569	0,49	0,5117	0,84	0,7651	1,19	0,9076	1,90	0,9928
0,15	0,1680	0,50	0,5265	0,85	0,7707	1,20	0,9103	2,00	0,9953
0,16	0,1790	0,51	0,5292	0,86	0,7761	1,21	0,9130	2,1	0,9970
0,17	0,1900	0,52	0,5379	0,87	0,7814	1,22	0,9155	2,2	0,9981
0,18	0,2008	0,53	0,5465	0,88	0,7867	1,23	0,9181	2,3	0,9989
0,19	0,2118	0,54	0,5549	0,89	0,7918	1,24	0,9205	2,4	0,9993
0,20	0,2227	0,55	0,5633	0,90	0,7969	1,25	0,9229	2,5	0,9996
0,21	0,2335	0,56	0,5716	0,91	0,8019	1,26	0,9252	2,6	0,9998
0,22	0,2443	0,57	0,5798	0,92	0,8068	1,27	0,9275	2,7	0,9999
0,23	0,2550	0,58	0,5879	0,93	0,8116	1,28	0,9297	—	—
0,24	0,2657	0,59	0,5959	0,94	0,8163	1,29	0,9319	—	—
0,25	0,2763	0,60	0,6039	0,95	0,8209	1,30	0,9340	—	—
0,26	0,2869	0,61	0,6117	0,96	0,8254	1,31	0,9361	—	—
0,27	0,2974	0,62	0,6194	0,97	0,8299	1,32	0,9381	—	—

$z$	$\text{erf}(z)$	$z$	$\text{erf}(z)$	$z$	$\text{erf}(z)$	$z$	$\text{erf}(z)$	$z$	$\text{erf}(z)$
0,28	0,3079	0,63	0,6270	0,98	0,8342	1,33	0,9400	—	—
0,29	0,3183	0,64	0,6346	0,99	0,8385	1,34	0,9419	—	—
0,30	0,3286	0,65	0,6420	1,00	0,8427	1,35	0,9438	—	—
0,31	0,3389	0,66	0,6494	1,01	0,8468	1,36	0,9456	—	—
0,32	0,3491	0,67	0,6566	1,02	0,8508	1,37	0,9473	—	—
0,33	0,3593	0,68	0,6638	1,03	0,8548	1,38	0,9490	—	—
0,34	0,3694	0,69	0,6708	1,04	0,8586	1,39	0,9507	—	—
0,35	0,3794	0,70	0,6774	1,05	0,8624	1,40	0,9523	—	—

## П Р И Л О Ж Е Н И Е 4

## ЗНАЧЕНИЯ

$$\left(\frac{T}{100}\right)^4 = \left(\frac{t+273}{100}\right)^4 \text{ в зависимости от температуры}$$

$t, ^\circ\text{C}$	$\left(\frac{T}{100}\right)^4 = \left(\frac{t+273}{100}\right)^4$	$t, ^\circ\text{C}$	$\left(\frac{t+273}{100}\right)^4$	$t, ^\circ\text{C}$	$\left(\frac{t+273}{100}\right)^4$
0	55,55	310	1155,3	620	6359,0
10	64,15	320	1236,5	630	6649,0
20	73,70	330	1322,1	640	6948,0
30	84,29	340	1412,0	650	7258,0
40	95,98	350	1506,5	660	7577,0
50	108,84	360	1605,5	670	7908,0
60	122,96	370	1709,4	680	8248,0
70	138,41	380	1818,2	690	8600,0
80	155,27	390	1392,2	700	8963,0
90	173,64	400	2052,0	710	9337,0
100	193,57	410	2176,0	720	9723,0
110	215,2	420	2306,0	730	10120,0
120	238,5	430	2443,0	740	10530,0
130	263,8	440	2584,0	750	10953,0
140	290,9	450	2733,0	760	11387,0
150	320,2	460	2887,0	770	11834,0
160	351,5	470	3048,0	780	12295,0
170	385,1	480	3215,0	790	12768,0
180	421,1	490	3389,0	800	13 256
190	459,5	500	3570,0	810	13 757
200	500,5	510	3759,0	820	14 272
210	544,3	520	3954,0	830	14 802
220	590,8	530	4158,0	840	15 347
230	640,2	540	4369,0	850	15 903
240	692,6	550	4588,0	860	16 479
250	748,2	560	4815,0	870	17 069
260	807,1	570	5050,0	880	17 673
270	869,4	580	5394,0	890	18 294
280	935,2	590	5547,0	900	18 933
290	1004,7	600	5808,0	910	19 585
300	1078,0	610	6079,0	920	20 256

## Продолжение приложения 4

$t, ^\circ\text{C}$	$\left(\frac{T}{100}\right)^4 = \left(\frac{t+273}{100}\right)^4$	$t, ^\circ\text{C}$	$\left(\frac{t+273}{100}\right)^4$	$t, ^\circ\text{C}$	$\left(\frac{t+273}{100}\right)^4$
930	20 945	1240	52 400	1560	112 890
940	21 650	1250	53 800	1570	115 380
950	22 373	1260	55 230	1580	117 900
960	23 112	1270	56 690	1590	120 460
970	23 872	1280	58 170	1600	123 070
980	24 649	1290	59 680	1610	125 730
990	25 445	1300	61 220	1620	128 410
1000	26 262	1310	62 790	1630	131 150
1010	27 097	1320	64 400	1640	133 940
1020	27 951	1330	66 030	1650	136 750
1030	28 824	1340	67 690	1660	139 610
1040	29 719	1350	69 390	1670	142 520
1050	30 637	1360	71 120	1680	145 480
1060	31 573	1370	72 870	1690	148 480
1070	32 533	1380	74 660	1700	151 540
1080	33 512	1390	76 480	1710	154 630
1090	34 515	1400	78 340	1720	157 780
1100	35 537	1410	80 230	1730	160 960
1110	36 583	1420	82 160	1740	164 200
1120	37 653	1430	84 110	1750	167 500
1130	38 747	1440	86 110	1760	170 830
1140	39 862	1450	88 140	1770	174 210
1150	41 005	1460	90 200	1780	177 650
1160	42 170	1470	92 300	1790	181 140
1170	43 359	1480	94 430	1800	184 670
1180	44 574	1490	96 610	—	—
1190	45 810	1500	98 820	—	—
1200	47 080	1510	101 060	—	—
1210	48 370	1520	103 350	—	—
1220	49 690	1530	105 680	—	—
1230	51 030	1540	108 040	—	—



## ТЕПЛОСОДЕРЖАНИЕ, СРЕДНЯЯ ТЕПЛОЕМКОСТЬ, ТЕМ

Металл	Теплосодержание в кДж/кг при темпе							
	20	100	300	500	700	800	900	1000
Висмут . . . . .	2,5372	12,7697	91,021	121,2074	151,855	—	—	—
Олово . . . . .	4,5971	24,2834	133,8522	184,9307	—	—	—	—
Кадмий . . . . .	4,6892	23,8648	74,1063	185,0563	243,336	—	—	—
Свинец . . . . .	2,4953	12,5604	37,9342	87,4203	114,635	128,242	—	—
Цинк . . . . .	7,8711	39,6071	123,2173	319,5867	426,216	479,598	—	—
Сурьма . . . . .	3,7681	20,3059	62,2995	106,3865	314,93	340,052	365,508	—
Магний . . . . .	19,9292	107,182	331,5843	768,2778	1244,734	1356,100	1484,220	—
Алюминий . . . . .	17,3846	94,203	311,4977	550,5905	1149,113	1256,710	1364,314	1471,911
Золото . . . . .	2,512	12,9791	41,8668	70,757	102,618	117,899	135,136	152,274
Серебро . . . . .	4,7739	24,0741	75,153	129,665	187,485	217,170	247,356	379,701
Медь . . . . .	7,6116	39,8583	126,6088	213,527	326,989	380,162	433,334	505,012
Никель . . . . .	9,1272	47,0177	150,725	264,805	385,395	447,150	509,468	571,498
Хром . . . . .	9,6296	49,3205	150,7688	255,814	371,369	432,496	496,973	564,380
Марганец . . . . .	—	—	—	—	—	—	—	—
Кобальт . . . . .	7,9549	43,9614	148,2127	274,235	407,376	539,260	629,695	761,997
Чистое железо . . . . .	9,0434	46,4734	153,237	280,516	419,098	504,928	584,059	675,331
Сталь (C=0,3%) . . . . .	—	46,8921	150,725	267,536	420,773	550,560	628,02	675,331
Сталь (C=0,8%) . . . . .	—	48,1482	154,4931	271,304	424,542	542,190	610,854	698,777
Сталь (C=1,6%) . . . . .	—	50,2416	157,0054	276,748	431,240	553,913	611,692	679,010
Чугун (C=3,7%, Si=1,5%, Mn=0,6%) . . . . .	—	—	147,794	258,328	421,611	532,980	608,761	675,331
Чугун (C=4,2%, Si=1,5%, Mn=0,7%) . . . . .	—	54,428	167,472	293,076	447,990	552,658	640,580	720,130

Таблица 2

## ПЕРАТУРА И СКРЫТАЯ ТЕПЛОТА ПЛАВЛЕНИЯ МЕТАЛЛОВ

ратуре, °C					Температура плавления (t <sub>пл</sub> ), °C	Средняя теплоемкость при температуре плавления с т.в. кДж/кг·град	Скрытая теплота плавления (q <sub>пл</sub> ), кДж/кг	Средняя теплоемкость жидкого металла (с <sub>жидк</sub> ), кДж/кг·град	Температура кипения (t <sub>кип</sub> ), °C
1100	1200	1300	1400	1500					
—	—	—	—	—	271	0,1298	50,24±2,1	0,1507	~1500
—	—	—	—	—	232	0,2512	58,20±2,51	0,2554	~2270
—	—	—	—	—	321	0,2470	53,59±1,67	0,2914	~765
—	—	—	—	—	327	0,1269	24,28±0,42	0,1361	~1750
—	—	—	—	—	419	0,4187	100,9	0,5338	~907
—	—	—	—	—	630	0,2177	160,18	0,2512	~1440
—	—	—	—	—	650	1,2812	372,63±4,19	1,1037	~1120
—	—	—	—	—	660	1,143	393,56±4,19	1,0760	~2320
234,545	248,361	—	—	—	1063	0,1524	67,45	0,1382	~2966
411,520	443,340	475,160	—	—	961	0,2763	101,71	0,3182	~2000
799,553	853,982	908,53	962,964	—	1083	0,5326	213,53±4,2	0,5443	~2360
634,718	698,191	761,998	880,613	1188,63	1455	0,5861	305,64±8,37	0,6699	~3000
636,394	713,850	792,561	879,646	969,66	1550	0,6448	132,93	0,5024	~2480
—	—	—	—	—	1242	0,5861	271,31	—	~2150
—	—	—	—	—	1490	—	280,51±4,18	0,8541	~3100
744,413	815,589	888,02	968,407	1050,7	1530	0,7034	314,01±20,93	0,9211	~3050
768,278	841,547	914,816	983,898	—	1510	0,7034	267,96	0,7955—0,8374	—
749,737	821,032	891,788	962,964	—	1485	0,6866	267,96	0,7955—0,8374	—
720,130	782,932	849,92	912,723	—	1420	0,6531	267,96	0,7955—0,8374	—
738,970	1046,7	1143,0	1239,3	—	1200	0,6741	230,27±20,93	0,963	—
803,866	1088,57	1180,404	1227,0	—	1150	0,7327	230,27±20,93	0,963	—

Таблица 3

**ЗАВИСИМОСТЬ ТЕПЛОСОДЕРЖАНИЯ СТАЛИ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ  
(СРЕДНИЕ ДАННЫЕ И ПРИБЛИЖЕННЫЕ)**

t, °C	i, кДж/кг				
	Высоколегированные стали с содержанием элементов, %				
	C = 1,2 Mn = 13	C = 0,28 Ni = 28	Cr = 19 Ni = 8 (X 18H9)	C = 0,13 Cr = 13	C = 0,7, Cr = 4 W = 18,5, V = 1,1
0	0	0	0	0	0
50	25,12	24,70	23,86	23,86	20,52
100	51,08	49,82	54,43	45,72	41,03
150	77,87	75,36	76,62	72,44	62,37
200	106,34	101,31	103,0	97,96	84,16
250	135,24	128,11	130,21	124,76	106,76
300	164,96	151,15	157,42	148,21	130,2
350	195,52	178,35	185,47	202,22	154,08
400	226,09	205,56	214,0	211,43	179,51
450	256,23	232,78	235,3	244,09	205,15
500	287,63	261,25	273	277,16	233,20
550	322,38	290,15	304,38	313,58	262,09
600	357,52	332,02	336,61	352,53	292,66
650	389,79	349,17	370,10	393,56	322,80
700	421,61	378,48	399,42	435,4	355,04
750	452,17	407,38	431,2	481,5	390,62
800	485,7	435,4	464,7	519,1	427,1
850	519,2	468,9	494	556,8	460,5
900	552,7	498,2	527,5	590,3	498,2
950	586,6	527,5	561	623,8	527,5
1000	619,6	556,8	596,5	657,3	556,8
1050	653,1	586,6	628	690,8	586,6
1100	686,6	619,6	661,5	720,1	619,6
1150	724,3	648,9	695	753,6	648,9
1200	757,8	678,3	728,5	787,1	678,3
1250	808,1	707,6	762	820,6	707,6

Таблица 4

**ПЛОТНОСТИ (ρ) УГЛЕРОДИСТЫХ И ЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ,  
А ТАКЖЕ НЕКОТОРЫХ СПЛАВОВ ЦВЕТНЫХ МЕТАЛЛОВ  
ПРИ ТЕМПЕРАТУРЕ 15—20° С, кг/м³**

Марка стали или сплава	ρ, кг/м³	Марка стали или сплава	ρ, кг/м³	Марка стали или сплава	ρ, кг/м³
Чистое железо	7880	12ХНЗ, 20ХНЗ	7880	МН19 (мельхиор)	8900
Сталь 20	7823	25ХНВ	7900	Магниево-цинковые сплавы:	
Сталь 30	7817	Ш9, Ш15	7800	МА-1 и МА-2	1780
Сталь 40	7815	Латунь		МАЗ, МА5	1800
				Бронза	

Продолжение табл. 4

Марка стали или сплава	ρ, кг/м³	Марка стали или сплава	ρ, кг/м³	Марка стали или сплава	ρ, кг/м³
50	7812	Л85, Л90	8750	БрА5-8,2	8200
60, 70, 8	7810	Л80	8660	БрЖМ 10-3-1,5	7500
У-12	7790	Л-62	8430	БрАМ 9-2	7600
40Х	7817	ЛА-85-0,5	8600	БрКМ 3-1	8400
50Х	7820				
25Н	7800	ЛЛН-59-3-2	8400	БрКН 1-3	8600
30Н	7820				
18ХНВ	7940	ЛАЖ-60-1-1	8200	БрОФ 4-0,25	8100
ШХ-15	7812	ЛЖМ-59-1-1		БрОЦ 4-3	8800
Г-12	7975	ЛКС-65-15-3		БрОЦС 4-4-2,5	9200
Х-13	7750	ЛС-63-3	8500	Алюминиевые сплавы:	
Х8С	7620	ЛМ-58-2		А	2710
Х25	7650	ЛН-65-5	8650	АМ	2730
1Х1849Т	7960	ЛО-90-1	8800	Д1, ДБ, Д-16	2800
Х14Н-4В	8000	ЛО-62-1	8540	Д-18	2750
Р18	8690	ЛС-74-3	8700	АВ	2690
		Никелевые сплавы:			
40Г, 60Г	7810			АК 6	2756
40Хф	7810	НМц-5			
		НЖМц28-2,5—1,5	8750	АК 9	2690

Таблица 5

**СРЕДНИЕ КОЭФФИЦИЕНТЫ ЛИНЕЙНОГО РАСШИРЕНИЯ  
УГЛЕРОДИСТЫХ И ЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ, А ТАКЖЕ НЕКОТОРЫХ  
ЦВЕТНЫХ СПЛАВОВ (β) 1° С (× 10<sup>-6</sup>)**

Марка стали или сплава	β в интервале температур, °С					
	20—100	20—200	20—400	20—600	20—800	20—1000
Чистое железо	11,5	11,7	11,8	12,0	—	—
Сталь 20	11,7	12,1	13,4	14,4	12,9	13,2
Сталь 30	12,1	13,9	15,0	15,6	—	—
Сталь 40	11,3	12,0	14,5	14,6	11,7	13,2
Сталь 65	11,0	11,6	13,2	14,2	12,7	14,8
Сталь У8	11,0	11,6	13,2	14,2	—	15,7
Сталь У13	10,9	11,1	12,7	14,0	14,8	17,4
Сталь 30Х	13,4	13,3	14,8	14,8	—	—
Сталь 40ХН	11,8	12,3	13,4	14,0	—	—
Сталь ШХ15	14,0	15,1	15,6	15,8	—	—
Сталь Х13	11,2	12,6	14,1	14,3	—	—
Сталь Х8С	11,1	12,7	14,3	14,2	—	—
Сталь Х18Н9	16,0	16,8	18,1	—	—	19,3
Сталь Х10Н25С	14,2	17,5	19,3	19,3	—	—
Сталь Х14Н14В	—	—	—	18,0	18,5	—
Сталь Г12	18,0	—	—	—	—	—
Латунь	16—22	—	—	—	—	—



Продолжение табл. 5

Марка стали или сплава	$\beta$ в интервале температур, °C					
	20—100	20—200	20—400	20—600	20—800	20—1000
Магниеые сплавы	25—26	—	—	—	—	—
Бронзы . . . . .	15,8—18,2	—	—	—	—	—
Алюминиевые сплавы . . . . .	19,5—24	—	—	—	—	—
Никелевые сплавы	13,7—16	—	—	—	—	—

## П Р И Л О Ж Е Н И Е 6

ЗАВИСИМОСТЬ МОДУЛЯ УПРУГОСТИ УГЛЕРОДИСТЫХ  
И ЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ ( $E$ ,  $Mn/m^2$ ) ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ ( $t$ , °C)

Марка стали	$\frac{t}{E}$				
15	20 202 000	100 187 000	300 170 000	450 157 000	—
25	20 202 000	100 200 000	300 189 000	450 152 000	—
30	80 201 000	100 197 000	300 167 000	500 162 000	600 140 000
40	20 213 500	100 210 000	300 198 000	500 179 500	—
50	20 220 000	100 215 000	300 200 000	500 180 000	—
60	20 208 000	100 212 000	300 193 000	400 178 000	—
50Г	20 220 000	100 217 000	300 208 000	500 191 000	—
30Х	20 218 500	100 215 000	300 201 000	500 179 500	—
30ХМА	20 219 500	100 210 000	300 206 000	500 176 000	—
35ХС	20 223 000	100 220 000	300 211 000	500 192 500	—
40ХС	20 223 000	100 220 000	300 211 000	500 192 500	—
35СГ	20 214 000	100 211 500	300 205 000	500 189 000	—

Продолжение приложения 6

Марка стали	$\frac{t}{E}$				
35ХМФ	20 217 000	100 213 000	300 203 500	500 183 500	—
20Н	20 215 000	100 210 000	300 202 000	500 185 000	—
30Н	20 211 500	100 209 500	300 201 000	500 184 000	—
25НЗ	20 212 000	100 210 000	300 208 000	500 184 000	—
30ХНЗ	20 211 000	100 207 000	300 190 000	500 176 000	—
15ХНЗМ	20 220 000—210 000	—	—	—	—
ШХ9	20 200 000	—	—	—	—
ШХ15	20 200 000	—	—	—	—
55С2	20 208 000	—	—	—	—
60С2	20 208 000	—	—	—	—
Г12	20 208 000	—	—	—	—

- Абрамович Г. Н. Прикладная газовая динамика. М., Гостехтеориздат, 1953.
- Акименко А. Д., Кузелев М. Я., Скворцов А. А., Холщеников М. Я. Нагрев заготовок под ковку и штамповку в камерной печи безокислительного нагрева. «Кузнечно-штамповочное производство», № 6, 1962.
- Аксельруд Л. Г. Перспективы развития конструкции металлургических печей. Доклад на всесоюзном совещании по металлургическим печам. Магнитогорск, 1959.
- Барк С. Е., Литвин Г. Е. Современные газовые печи машиностроительных заводов. М., ГОСИНТИ, 1959.
- Богданов В. Н. Применение сквозного индукционного нагрева в промышленности. М., Машгиз, 1957.
- Васильев А. В. Руководство по анализу топочных газов. М., Госэнергоиздат, 1954.
- Глинков М. А. (Ред.) Металлургические печи. М., Металлургиздат, 1951.
- Глинков М. А. (Ред.) Металлургические печи. Ч. I. М., Металлургиздат, 1963 и Ч. II. М., Металлургиздат, 1964.
- Глинков М. А. Основы общей теории тепловой работы печей. М., Металлургиздат, 1959.
- Глебов С. В. Легковесные огнеупоры. М., Металлургиздат, 1945.
- Гольдфарб Э. М., Кравцов А. Ф., Кравченко Н. И., Розенгарт Ю. М., Семикин И. Д., Тайц Н. Ю. Расчеты нагревательных печей. Гостехиздат УССР, 1958.
- Гребер Г., Эрк С., Григуль У. Основы учения о теплообмене. М., Изд-во иностр. лит-ры, 1958.
- Григорьев В. Н. Карусельные печи. М., Металлургиздат, 1959.
- Диомидовский Д. А. Металлургические печи. М., Металлургиздат, 1961.
- Иванцов Г. П. Нагрев металла. М., Металлургиздат, 1948.
- Калашников Н. В., Стоцкий Л. Р. Международная система единиц. «Машиностроитель», № 3, 1962, «Приборостроение», № 4, 1962.
- Карабин А. И. Сжигание жидкого топлива в промышленных установках. М., Металлургиздат, 1957.
- Касенков М. А. Нагревательные устройства кузнечного производства. М., Машгиз, 1962.
- Ключников С. И., Мансуров А. М. Механизация в кузнечных печах. М., Машгиз, 1954.
- Копытов В. Ф. Нагрев металла в печах. М., Металлургиздат, 1962.
- Копытов В. Ф. Новые методы газового нагрева. М., Металлургиздат, 1962.
- Кривандин В. А. Керамические рекуператоры. М., Металлургиздат, 1960.
- Кривандин В. А., Молчанов Н. Г., Соломенцов С. Л. Металлургические печи. М., Металлургиздат, 1962.
- Кузелев М. Я., Скворцов А. А. Нагрев металла под ковку и штамповку в пламенных печах. Судпромгиз, 1960.
- Куроедов В. А. Безокислительный нагрев стали в печах открытого пламени. «Кузнечно-штамповочное производство», № 1, 1959.
- Кутателадзе С. С., Боришанский В. М. Справочник по теплопередаче. М., Госэнергоиздат, 1959.
- Кутателадзе С. С. Теория теплообмена. М., Машгиз, 1962.
- Лапшин В. А. Контактный электронагрев. Горьковское книжное издательство, 1953.
- Лебедев Н. С., Телегин А. С. Нагревательные печи. М., Машгиз, 1962.
- Линчевский В. П. Топливо и его сжигание. М., Металлургиздат, 1959.
- Лукьянов В. С. Гидравлические приборы для технических расчетов. Известия Академии наук СССР, № 2, 1939.
- Лойцянский Л. Г. Механика жидкости и газа. М., Гостехтеориздат, 1957.
- Лыков А. В. Теория теплопроводности. М., Гостехтеориздат, 1952.
- Мак-Адамс. Теплопередача. М., Металлургиздат, 1961.
- Мамыкин П. С. Огнеупорные изделия. М., Металлургиздат, 1955.
- Минаев А. Н., Шипилин Б. И. Печи и сушилы литейных цехов. М., Машгиз, 1959.
- Миткалинный В. И. Струйное движение газов в печах. М., Металлургиздат, 1961.
- Михеев М. А. Основы теплопередачи. М., Госэнергоиздат, 1956.
- Михеев М. А., Михеева И. М. Краткий курс теплопередачи. М., Госэнергоиздат, 1961.
- Некрасов К. Д. Огнеупорные бетоны, их свойства и применение. М., Госстройиздат, 1949.
- Равич М. Б. Упрощенная методика теплотехнических расчетов. Изд-во Акад. наук СССР, 1958.
- Рафалович И. М. Тепловые расчеты пламенных печей. М., Металлургиздат, 1959.
- Рафалович И. М. Природный газ как топливо для металлургических печей. М., Металлургиздат, 1961.
- Расчеты, конструирование и эксплуатация нагревательных печей. Труды ИТОЧМ, т. 25, ч. I. М., Металлургиздат, 1960.
- Рустем С. Л. Оборудование и проектирование термических цехов. М., Машгиз, 1962.
- Свенчанский А. Д. Электрические промышленные печи. М., Госэнергоиздат, 1958.
- Скворцов А. А. Экономия металла за счет внедрения в производство безокислительных методов нагрева. Сб. «Экономия металла в кузнечно-штамповочном производстве». М., Машгиз, 1953.
- Соколов В. Н., Сорокин А. И., Зобин Б. Ф., Смирнов В. Н. Расчеты нагрева металла в металлургических печах. М., Машгиз, 1952.
- Соколов В. Н. Расчеты нагрева металла в металлургических печах. М., Металлургиздат, 1956.
- Справочник на огнеупорные изделия, материалы и сырье. М., Металлургиздат, 1956.
- Справочник строителя промышленных печей. М., Госстройиздат, 1952.
- Сторожев М. В. (Ред.) Технологический справочник по ковке и штамповке. М., Машгиз, 1959.

- Тайц Н. Ю. Технологии нагрева стали. М., Metallurgizdat, 1962.  
 Тайц Н. Ю., Розенгарт Ю. И. Методические нагревательные печи. М., Metallurgizdat, 1956.  
 Тебеньков Б. П. Рекуператоры для промышленных печей. М., Metallurgizdat, 1956.  
 Тельнов Р. М., Натанзон Е. М. Электронагрев методом сопротивления. М., Машиностроение, 1964.  
 Теплотехнический справочник. Госэнергоиздат, т. I, 1957; т. II, 1958.  
 Флаксерман Ю. Н. Диаграммы расчета топлив СССР. М., Госэнергоиздат, 1961.  
 Шмыков А. А. Справочник термиста. М., Машгиз, 1953.  
 Ясногородский И. З. Нагрев металлов и сплавов в электролите. М., Машгиз, 1944.  
 Эйтенсон Л. С. Моделирование. М., Изд-во «Советская наука», 1951.

# Оглавление

	Стр.
Предисловие . . . . .	3
Введение . . . . .	5

## Глава I. ТОПЛИВО

§ 1. Общие сведения . . . . .	11
§ 2. Характеристики топлива . . . . .	15
§ 3. Характеристика отдельных видов топлива 23	

## Глава II. ГОРЕНИЕ ТОПЛИВА

§ 4. Общие сведения . . . . .	41
§ 5. Расчеты процесса горения . . . . .	53
§ 6. Контроль процесса горения . . . . .	67

## Глава III. МЕХАНИКА ГАЗОВ

§ 7. Общие сведения . . . . .	72
§ 8. Единицы измерения и основные физические понятия . . . . .	72
§ 9. Силы, действующие в газе, и условия равновесия газов . . . . .	78
§ 10. Законы движения газов . . . . .	81
§ 11. Виды и режимы движения жидкостей и газов . . . . .	86
§ 12. Расчет движения газов в печной установке 89	
§ 13. Расчет сопротивлений при движении газов 95	
§ 14. Истечение газов из отверстий . . . . .	104
§ 15. Распределение потоков в разделяющихся каналах . . . . .	108
§ 16. Движение газов в замкнутом пространстве печи . . . . .	110
§ 17. Струйные приборы . . . . .	114

## Глава IV. ТЕОРИЯ ПОДОБИЯ

§ 18. Общие положения . . . . .	118
§ 19. Геометрическое подобие . . . . .	118
§ 20. Механическое подобие . . . . .	119
§ 21. Гидромеханическое подобие . . . . .	122
§ 22. Основные теоремы теории подобия . . . . .	124
§ 23. Моделирование физических явлений . . . . .	127

§ 24. Метод аналогии . . . . .	131
--------------------------------	-----

## Глава V. ОСНОВЫ ТЕОРИИ ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ

§ 25. Общие понятия . . . . .	132
§ 26. Теплопроводность . . . . .	133
§ 27. Конвекция . . . . .	162
§ 28. Вынужденная конвекция . . . . .	167
§ 29. Излучение . . . . .	170
§ 30. Теплообмен в рабочем пространстве печи . . . . .	185
§ 31. Расчет потерь тепла через стенки печей при установившемся тепловом состоянии . . . . .	192
§ 32. Расчет теплообменных аппаратов . . . . .	195
§ 33. Гидро- и электроинтеграторы . . . . .	201

## Глава VI. НАГРЕВ МЕТАЛЛА В ПЕЧАХ

§ 34. Общие сведения . . . . .	206
§ 35. Понятие о «тонком» и «массивном» телах . . . . .	208
§ 36. Физические параметры нагреваемых тел . . . . .	211
§ 37. Температура нагрева . . . . .	215
§ 38. Нагрев слитков и заготовок в камерных печах при постоянной температуре печи . . . . .	217
§ 39. Нагрев слитков и заготовок при переменной температуре печи . . . . .	222
§ 40. Режим нагрева слитков и заготовок в методических и полуметодических печах . . . . .	234
§ 41. Охлаждение металла . . . . .	241

## Глава VII. ОКИСЛЕНИЕ И ОБЕЗУГЛЕРОЖИВАНИЕ МЕТАЛЛА ПРИ НАГРЕВЕ И БОРЬБА С ЭТИМИ ПРОЦЕССАМИ

§ 42. Общие положения . . . . .	244
§ 43. Процесс окисления железа . . . . .	245
§ 44. Количественное определение величины угара . . . . .	247
§ 45. Влияние отдельных факторов на угар металла . . . . .	247
§ 46. Обезуглероживание . . . . .	251
§ 47. Методы борьбы с окислением металла . . . . .	252

## Глава VIII. ОСНОВЫ ТЕПЛОВОЙ РАБОТЫ ПЕЧЕЙ

§ 48. Общие положения . . . . .	259
§ 49. Определение расхода топлива и тепловые характеристики печей . . . . .	266
§ 50. Тепловой баланс теплоиспользующих устройств . . . . .	271

## Глава IX. МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ СТРОИТЕЛЬСТВА ПЕЧЕЙ

§ 51. Огнеупорные материалы . . . . .	273
§ 52. Теплоизоляционные материалы . . . . .	290
§ 53. Общестроительные материалы и жаростойкие сплавы . . . . .	290

## Глава X. ЭЛЕМЕНТЫ КОНСТРУКЦИИ И КЛАДКА ПЕЧЕЙ

§ 54. Фундаменты печей . . . . .	296
§ 55. Металлический каркас печи . . . . .	296
§ 56. Кладка печей . . . . .	300
§ 57. Дымовые шиберы и перекидные устройства . . . . .	309
§ 58. Устройства для перемещения и отвода газов . . . . .	311
§ 59. Устройства для сжигания топлива . . . . .	316
§ 60. Конструкции теплоиспользующих устройств . . . . .	330

## Глава XI. ПЛАМЕННЫЕ ПЕЧИ ДЛЯ НАГРЕВА МЕТАЛЛА

§ 61. Классификация печей . . . . .	342
§ 62. Нагревательные печи прокатных и трубопрокатных цехов . . . . .	343
§ 63. Нагревательные печи кузнечных цехов . . . . .	358
§ 64. Термические печи прокатных и кузнечных цехов . . . . .	356
§ 65. Механизмы и приспособления для загрузки и выгрузки материала . . . . .	388
§ 66. Основы проектирования печей . . . . .	388
§ 67. Сведения о технике безопасности . . . . .	390

## Глава XII. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ НАГРЕВАТЕЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА

§ 68. Общие сведения . . . . .	393
§ 69. Электрические печи прямого нагрева . . . . .	396
§ 70. Электроды, косвенного нагрева . . . . .	402
§ 71. Индукционный электронагрев . . . . .	415

Приложение 1. Теплопроводность горючих газов . . . . . 422

Приложение 2. Средние теплоемкости газов ( $c_0^t$ ),  $\text{кДж/м}^3 \cdot \text{град}$  при н. ф. у. . . . . 423

Приложение 3. Интеграл ошибок Гаусса или функция

$$\text{Крампа } \operatorname{erf}(z) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^z e^{-n^2} dn \dots\dots\dots 425$$

Приложение 4. Значения  $\left(\frac{T}{100}\right)^4 = \left(\frac{t+273}{100}\right)^4$  в зависимости от температуры . . . . . 428

Приложение 5. Физические параметры металлов . . . . . 430

Приложение 6. Зависимость модуля упругости углеродистых и легированных сталей ( $E$ ,  $\text{Мн/м}^2$ ) от температуры ( $t$ ,  $^{\circ}\text{C}$ ) . . . . . 436

Литература . . . . . 438

# ОПЕЧАТКИ

Страница	Строка	Напечатано	Следует читать
42	10 снизу	$\dots = 131,85 \text{ кг} + 8 \text{ кг}$	$\dots = 131,85 \text{ кг} + 128 \text{ кг}$
60	12 снизу, 3-й столбец	в $\text{кмоль/м}^3$	в $\text{кмоль/м}^3 \cdot 10^{-3}$
115	1 снизу	$(g_1 + g_2)(p_3 - p_2)[\text{см}]$	$\left(\frac{g_1}{\rho_1} + \frac{g_2}{\rho_2}\right)(p_3 - p_2)[\text{см}]$
115	3 снизу	$(g_1 + g_2) \frac{w_3^2}{2g} [\text{см}]$	$(g_1 + g_2) \frac{w_3^2}{2} [\text{см}]$
115	5 снизу	$\frac{g_1 w_1^2}{2g} [\text{см}]$	$\frac{g_2 w_2^2}{2} [\text{см}]$
115	6 снизу	$\frac{g_0 w_0^2}{2g} [\text{см}]$	$\frac{g_1 w_1^2}{2} [\text{см}]$
116	3 сверху	$g_1 \frac{(w_1 - w_3)^2}{2g} [\text{см}]$	$g_1 \frac{(w_1 - w_3)^2}{2} [\text{см}]$
116	6 сверху	$g_2 \frac{(w_2 - w_3)^2}{2g} [\text{см}]$	$g_2 \frac{(w_2 - w_3)^2}{2} [\text{см}]$
116	17—18, формула (122)	$g_1 \frac{w_1^2}{2g} + g_2 \frac{w_2^2}{2g} =$ $= (g_1 + g_2) \frac{w_3^2}{2g} +$ $+ \left(\frac{g_1}{\rho_1} + \frac{g_2}{\rho_2}\right) \times$ $\times (p_3 - p_2) + g_1 \times$ $\times \frac{(w_1 - w_3)^2}{2g} +$ $+ g_2 \frac{(w_2 - w_3)^2}{2g}$	$g_1 \frac{w_1^2}{2} + g_2 \frac{w_2^2}{2} =$ $= (g_1 + g_2) \frac{w_3^2}{2} +$ $+ \left(\frac{g_1}{\rho_1} + \frac{g_2}{\rho_2}\right) \times$ $\times (p_3 - p_2) + g_1 \times$ $\times \frac{(w_1 - w_3)^2}{2} +$ $+ g_2 \frac{(w_2 - w_3)^2}{2}$
123	4 снизу	$\beta = \frac{1}{273} \cdot \frac{1}{\alpha}$	$\beta = \frac{1}{273} = \frac{1}{\alpha}$
123	8 снизу, формула (143)	$Ar = \frac{g l^3}{\nu^2} \cdot \frac{\rho - \rho_0}{\rho}$	$Ar = \frac{g l^3}{\nu^2} \cdot \frac{\rho - \rho_0}{\rho_0}$
171	21 сверху	$A = D = 0$	$R = D = 0$

Скворцов Алексей Анатольевич  
Акименко Анатолий Дмитриевич  
Кузлов Михаил Яковлевич

## НАГРЕВАТЕЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА

Редактор издательства А. Н. Варганова  
Художник В. Н. Иванов  
Технический редактор Н. И. Коробкова  
Корректор М. И. Козлова

Т—10855 Сдано в набор 19/1—65 г. Подп. к печати 11/IX—65 г  
Формат 60×90<sup>1</sup>/<sub>16</sub> Объем печ. л. 27,75 Уч.-изд. л. 23,8  
Изд. № ОТ-70 Тираж 6000 экз. Зак. 228. Цена 1 р. 05 к  
Москва, И-51, Неглинная ул., д. 29/14,  
Издательство «Высшая школа»  
Сводный тематический план 1965 года учебников для вузов и техникумов  
Позиция № 497.

Московская типография № 8 Главполиграфпрома  
Государственного комитета Совета Министров СССР по печати,  
Хохловский пер., 7. Зак. 228

Продолжение

Страница	Строка	Напечатано	Следует читать
177	7 снизу, формула (258)	$\dots = C_{\text{прив}} [\text{вт}/\text{м}^2]$	$\dots = C_{\text{прив}} [\text{вт}/\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{К}^4]$
182	17 сверху	$q_{\text{г}}$	$\varepsilon_{\text{г}}$
190	7 снизу, формула (281)	$\dots = 50 + 0,3 \dots$	$\dots = 58,1 + 0,35 \dots$
190	9 снизу, формула (280)	$\dots = 0,09 \left( \frac{T_{\text{г}}}{100} \right)^3 +$ $+ (10 \div 15) \dots$	$\dots = 0,105 \left( \frac{T_{\text{г}}}{100} \right)^3 +$ $+ (11,6 \div 17,5) \dots$
204	11 сверху, формула (309)	$\dots = \frac{H_2}{H_1};$	$\dots = \frac{H_1}{H_2};$
349	12 сверху	$\dots 5-7 \text{ млн. кВт.}$	$\dots 5-7 \text{ млн. вт.}$
374	1 сверху	открытым	открытым

Зак. 228

Т—10855  
Формат 60.  
Изд. № ОТ

Сводный те



НАГРЕВАТЕЛЬНЫЕ  
УСТРОЙСТВА