

Лабораторне заняття 2. Демонстраційний експеримент, умови його проведення. Розроблення авторських продуктів з демонстраційного експерименту з фізики та астрономії.

Завдання. Підготувати цикл демонстрацій (бажано авторські) з певної теми курсів фізики та астрономії. Встановити їх роль та місце в освітньому процесі.

Методичні матеріали

У цьому пункті розглянуто приклади демонстраційних пристроїв, створених нами у співавторстві з членами експериментальної групи (студентами – майбутніми вчителями фізики та учнями), а також висвітлено методичні особливості їх використання в навчальному процесі з фізики. Новизну пристроїв підтверджено деклараційними патентами на корисні моделі. Члени експериментальної групи брали безпосередню участь у розробці конструкції, виготовленні, дослідженні та апробації навчальних моделей запропонованих пристроїв.

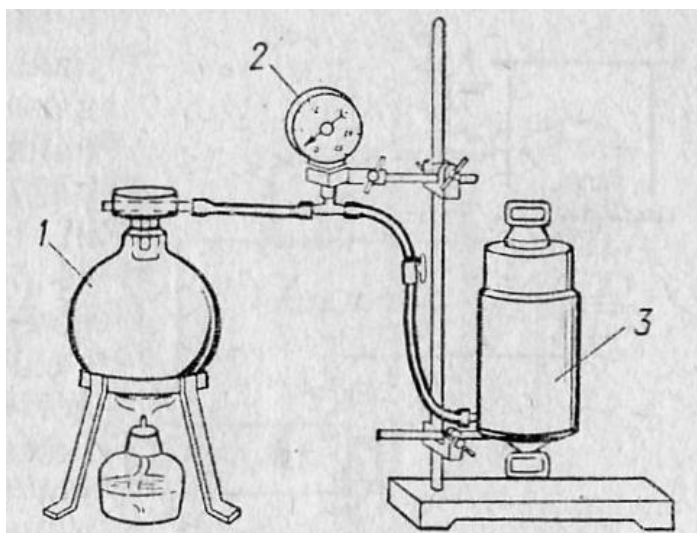
Пристрій для демонстрації перетворення теплової енергії в механічну. Постановка проблеми. Вивчення процесів перетворення теплової енергії в механічну є важливим питанням шкільного курсу фізики. Особливе значення цього навчального матеріалу пояснюється його зв'язком із технічним застосуванням (зокрема, в енергетиці). Неабияке значення він також має в контексті розвитку освіти у сфері енергозбереження. Проте наш досвід показує, що при вивченні зазначеного питання в учнів (і студентів) виникають певні труднощі. Не останню роль у цьому відіграє *слабке експериментальне забезпечення* відповідного навчального матеріалу. У переліку шкільного фізичного обладнання практично відсутні пристрої, що наочно демонструють процеси перетворення теплової енергії в механічну. Тому розробка таких пристроїв (навчальних моделей), а також вивчення методичних особливостей їх використання в навчальному процесі з фізики (зокрема, на уроках, на заняттях гуртків) є актуальною задачею.

Під час аналізу навчально-методичної літератури виявлено, що нині у шкільній практиці найчастіше використовуються наступні дві схеми проведення демонстрації перетворення теплової енергії в механічну. Наприклад, відомий пристрій для демонстрації роботи водяної пари, що розширюється. Він складається (рис. 4.14, а) з металевої кулі, робочого циліндру з поршнем, нагрівача, паропроводу, з'єднаного з манометром та спірометром, причому верхній кінець паропроводу має металеву пробку з вертикальним отвором. Цей пристрій працює так: у металеву кулю наливають воду, отвір паропроводу закривають, запалюють спиртівку, нагрівають металеву кулю, доводячи в ній тиск пари до $2,02 \cdot 10^5$ Па, відкривають паропровід – пара надходить у робочий циліндр, піднімає поршень, виконуючи роботу.

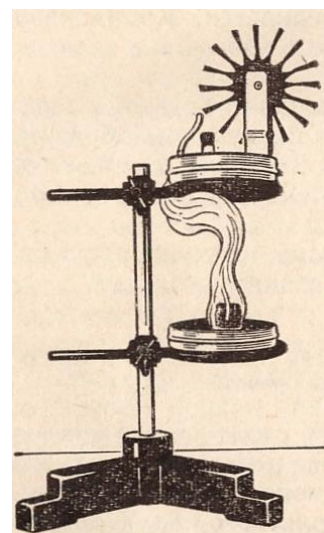
Іншим відомим пристроєм для демонстрації перетворення теплової енергії в механічну є модель, що містить (рис. 4.14, б) робочий циліндр, камеру згорання, нагрівач, паропровід, сопло, турбіну. Модель працює так: воду, що знаходиться в робочому циліндрі, нагрівають до температури кипіння; подальше нагрівання супроводжується переходом води з рідкого в газоподібний стан; пара виходить через сопло й обертає турбіну.

Серед основних недоліків обох наведених пристроїв виділимо такі:

- неможливість продемонструвати замкнутий цикл з робочим тілом, що зазнає двофазового перетворення;
- невисокі демонстраційні властивості, що полягають у слабкому унаочненні можливості практичного використання процесу перетворення теплової енергії у механічну;
- небезпечність при експлуатації (стосується, насамперед, першого з розглянутих пристроїв, адже в ньому тиск водяної пари при температурі приблизно 100°C досягає 2 атм);
- обмеженість тривалості роботи пристроїв часом випаровування води;
- складність конструкції та висока матеріалоемність пристроїв загалом (разом зі штативами й підставками).



а)



б)

Рис. 4.14. Відомі пристрої для демонстрації перетворення теплової енергії в механічну:

- а) модель зі спірометром: 1 – металева куля; 2 – манометр; 3 – спірометр;
б) модель із турбіною

Спільно з учнями експериментальної групи нами запропоновано пристрій для демонстрації перетворення теплової енергії в механічну, що позбавлений перелічених недоліків. Розглянемо далі технічний опис та основні методичні особливості його використання в навчальному процесі з фізики [444].

Технічний опис пристрою. Ідея цього пристрою ґрунтується на давно забутій дитячій іграшці, яка мала назву «Самохідний катер». Попри те, що

конструкція парореактивного рушія є відомою, про його принцип дії в навчально-методичній літературі майже нічого не зазначається. Крім того, залишається практично невивченим питання щодо використання пристрою в навчальному процесі з фізики. Адже відомі з різних літературних джерел моделі парореактивних суден розглядаються не як *навчальні*, а лише як *іграшкові*.

Конструкція пристрою відрізняється своєю простотою (рис. 4.15). Він містить: робочий циліндр – 1; водометні сопла – 2; трубопровід – 3; нагрівач – 4; плавучий корпус пристрою – 5.

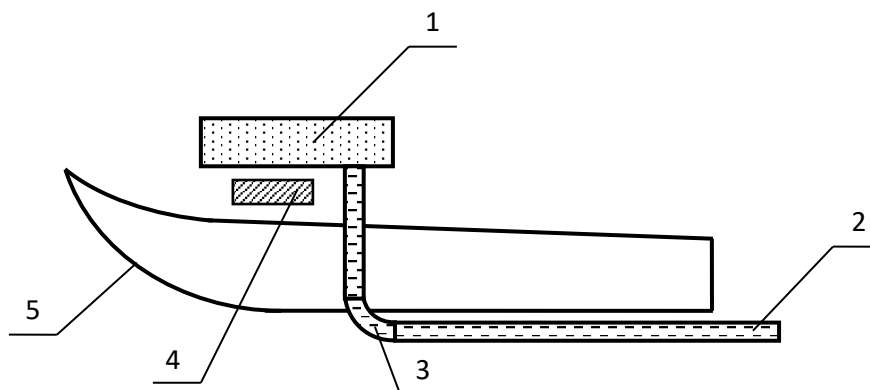


Рис. 4.15. Схема конструкції пристрою для демонстрації перетворення теплової енергії в механічну

Принцип дії даного пристрою полягає в наступному. Перед початком демонстрації робочий циліндр треба заповнити водою. Для цього в одне з водометних сопел потрібно налити воду до повного заповнення робочого циліндра й трубопроводу. Для забезпечення замкнутого циклу робочого тіла плавучий корпус пристрою поміщають на воду, при цьому його сопла опиняються під водою. Як джерело теплоти можна використовувати, наприклад, сухе пальне. У пристрої робоче тіло змінює свій агрегатний стан за замкнутим циклом. Принцип роботи пристрою пояснюється графіком його термодинамічного циклу (рис. 4.16).

Під час першої фази (ділянка $1 \rightarrow 2$) робоче тіло отримує від нагрівача кількість теплоти $Q_{12}^{(+)}$ (знак «+» означає, що робоче тіло отримує тепло). При цьому відбувається фазовий перехід рідина $\rightarrow$ пара (що завершується в точці 2 циклу), який супроводжується розширенням робочого тіла при сталих температурі T_1 та тиску p_1 ($p_1 > p_0$, де p_0 – атмосферний тиск). Розширення робочого тіла призводить до виходу води з водометних сопел, що створює реактивну силу тяги.

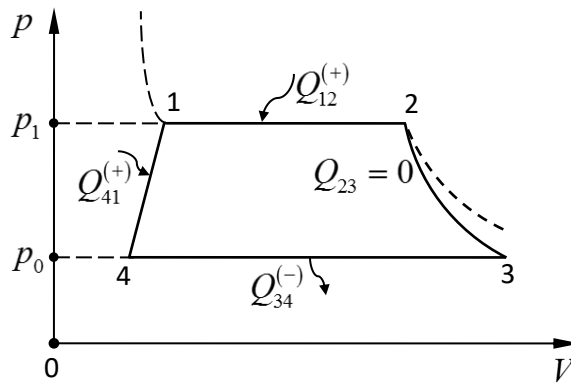


Рис. 4.16. Ідеалізований цикл розглядуваного пристрою

Упродовж другої фази циклу (ділянка $2 \rightarrow 3$) робоче тіло (пара) продовжує розширюватися до тих пір, доки його тиск не зрівняється з атмосферним тиском (гідростатичним тиском шару води на рівні сопел можна знехтувати). У кінці другої фази циклу (точка 3) тиск робочого тіла стає рівним атмосферному тиску, а швидкість води в соплі (відносно судна) стає рівною нулю. Упродовж другої фази температура робочого тіла знижується: від максимального значення в циклі T_1 (точка 2) до мінімального – T_2 (точка 3). У зв'язку з короткотривалістю другу фазу можна наближено вважати такою, що протікає адіабатно ($Q_{23} = 0$). Через таке наближення можна не враховувати процеси тепловіддачі в навколишнє середовище від робочого тіла в робочому циліндрі та в трубопроводі.

Подальше охолодження внаслідок віддачі тепла робочим тілом призводить до стиснення робочого тіла силою атмосферного тиску (третя фаза). Це стискання супроводжується фазовим переходом пара $\rightarrow$ рідина, при цьому відбувається віддача теплоти $Q_{34}^{(-)}$, яка виділяється при конденсації пари, що характеризує зміну агрегатного стану робочого тіла.

На початку четвертої фази циклу (точка 4) робоче тіло знаходиться в рідкому стані при температурі T_2 й атмосферному тиску p_0 . Упродовж четвертої фази робоче тіло розширюється та нагрівається до температури T_1 й тиску p_1 . Упродовж цієї фази робоче тіло отримує від нагрівача кількість теплоти $Q_{41}^{(+)}$. Отже, цикл завершується, а всі процеси знову повторюються.

Діюча модель пристрою. Разом з учнями експериментальної групи нами було виготовлено різні варіанти діючих моделей цього пристрою. Першою була модель, наведена на рис. 4.17 (а). Аналіз літературних джерел, у яких описано конструкцію подібних пристроїв, дозволив удосконалити діючу модель (рис. 4.17, б). Її вже можна використовувати в демонстраційному експерименті з фізики.



а)



б)

Рис. 4.17. Фото діючих моделей пристрою для демонстрації перетворення теплової енергії в механічну: а) перший варіант моделі; б) удосконалена модель

Діюча модель пристрою складається з плавучого корпусу, виконаного у вигляді судна, теплового двигуна (парореактивного рушія) та нагрівача. Тепловий двигун, зі свого боку, складається з робочого циліндра, трубопроводу та сопел. Конструктивно всі ці елементи теплового двигуна виконані з мідної трубки внутрішнім діаметром приблизно 3 мм (один із варіантів конкретного виконання теплового двигуна подано на рис. 4.18, а). У нагрівачі відбувається виділення теплової енергії в результаті згорання пального (сухе пальне або етиловий спирт (рис. 4.18, б)). При роботі двигуна сопла мають бути занурені у воду. Охолоджувачем у діючій моделі є вода у водоймі.



а)



б)

Рис. 4.18. Один із варіантів конструкції робочого циліндра та трубопроводу моделі (а) та можлива конструкція нагрівача, у якому використовується етиловий спирт (б)

Методичні особливості використання моделі при вивченні фізики.

Запропоновану модель можна використовувати з навчальною метою (а не лише як іграшку). Для цього було розроблено відповідне методичне забезпечення: описи цікавих демонстрацій, поставлених на основі розглядуваної моделі; цикли експериментальних і теоретичних фізичних задач, що пов'язані з дослідженням моделі. Розглянемо деякі методичні пропозиції щодо використання пристрою для демонстрації перетворення теплової енергії в механічну на заняттях з фізики.

Досвід показує, що найбільший навчальний ефект від використання цього пристрою можна досягти на уроках узагальнення матеріалу. Це пов'язано з тим, що у процесі вивчення з учнями пристрою вдається повторити основні змістові елементи навчального матеріалу певного розділу, а також наочно продемонструвати їх прикладне значення. Насамперед, ідеться про розділи:

➤ «Механіка» (змістові блоки: імпульс тіла та системи тіл; закон збереження імпульсу; реактивний рух (реактивні двигуни); механічна енергія, робота, потужність; ККД механізмів);

➤ «Молекулярна фізика й термодинаміка» (зокрема, ідеальний газ; рівняння стану ідеального газу; ізопроееси; реальні гази, ізотерми реальних газів; пароутворення і конденсація; насичена та ненасичена пара; кипіння; залежність тиску й густини насиченої пари від температури; зміна агрегатних станів речовини; критичний стан).

Неабияку навчальну цінність розглянута модель має для організації пізнавальної діяльності учнів у межах позакласної складової навчання фізики. На основі цього пристрою можна поглиблено вивчати з учнями процеси перетворення теплової енергії в механічну; реалізувати низку цікавих фізичних демонстрацій; проводити теоретичні та експериментальні дослідження.

Цікаві демонстрації, у яких використовується парореактивний рушій. За допомогою парореактивного рушія можна реалізувати низку цікавих демонстрацій із фізики. Розглянемо такі дві.

Демонстрація 1. «Реакція втікаючого й витікаючого струменів». З цією демонстрацією доцільно пов'язати розгляд наступної проблемної ситуації.

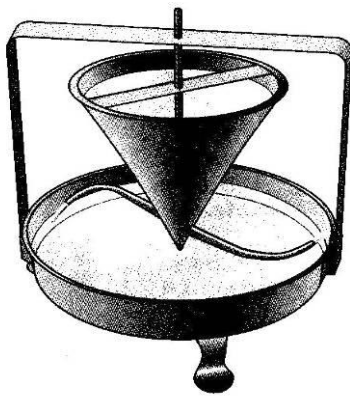
Проблемна ситуація. На певній фазі робочого циклу розглядуваного пристрою пар, розширюючись, виштовхує воду із сопел. Струмінь води набуває імпульс від судна, а судно – такий же за модулем імпульс, але спрямований у протилежний бік. Сила, що діє при цьому на судно з боку струменя, називається реакцією витікаючого струменя. На перший погляд, незрозумілою є поведінка судна під час іншої фази роботи двигуна. Тепер судно нібито має рухатись назустріч руху струменя води. І тому дивно, що під час випробувань судно все ж переміщується вперед, а не залишається на місці, роблячи лише ривки вперед і назад. Як пояснити такий рух судна?

Слід зазначити, що поставлене у проблемній ситуації творче завдання не є простим. Експеримент виявив, що здебільшого учасники педагогічного

експерименту вважали, що судно почне рухатися назустріч струменю, що заходить у сопло!

Демонстрація 2. «Парореактивне сегнерове колесо». Серед переліку стандартного обладнання демонстраційного експерименту з фізики є модель гідравлічної реактивної турбіни, що називається *сегнеровим колесом* (на честь угорського фізика й математика Яноша Андроша Сегнера, який винайшов цю турбіну) (рис. 4.19, а). Модель складається з конусоподібної ємності, яка може обертатися навколо вертикальної осі. До нижньої частини ємності прикріплені дві горизонтально розташовані трубки, кінці яких відігнуті у протилежні боки. За допомогою цієї моделі можна наочно продемонструвати силу реакції струменя води, що витікає із сопла.

Конструкція саморобного парореактивного сегнерова колеса складається з парореактивного рушія, встановленого на плавучій круглій платформі. Сопла рушія спрямовані у протилежні боки. Для демонстрації роботи моделі спочатку заповнюють робочий циліндр водою, поміщають платформу з рушієм на поверхню води, під робочим циліндром встановлюють і запалюють свічку. Через невеликий проміжок часу модель починає швидко обертатися навколо вертикальної осі. Одним із недоліків такої моделі є те, що вона, обертаючись, може ще й пересуватися поверхнею води, стикаючись зі стінками ємності (що викликає гальмування моделі). Таку поведінку саморобної моделі можна пояснити насамперед тим, що на практиці складно досягти рівності моментів сил реакції струменів двох її сопел.



а)



б)

Рис. 4.19. Сегнерове колесо: а) звичайне; б) парореактивне

З метою усунення цього недоліку в конструкції парореактивного сегнерова колеса ми запропонували використовувати *рідинну самоцентрувальну опору* [325]. Її суттєвою ознакою є те, що плавуча циліндрична платформа має змочуватися водою, а стінки ємності – не змочуватися (або навпаки). Діаметр платформи має бути меншим за внутрішній діаметр ємності на величину, що складає кілька радіусів кривизни меніску. Здатність до самоцентрування плавучої платформи обумовлена формами менісків, які пов'язані зі змочуванням рідиною плавучої платформи й незмочуванням нею стінок ємності (технічний опис самоцентруючої

рідинної опори докладно розглянуто нижче). На рис. 4.19 (б) наведено парореактивне сегнерове колесо удосконаленої конструкції.

Цикл задач, що пов'язані з дослідженням моделі. Досвід показує, що наведені вище фізичні демонстрації можна з успіхом використовувати в навчальному процесі з фізики навіть у тих навчальних закладах, де фізика вивчається на рівні стандарту. А учням, що вивчають фізику поглиблено (академічний і профільний рівні), можна запропонувати ще й низку теоретичних та експериментальних задач, що пов'язані з дослідженням моделі парореактивного судна. Наведемо приклади таких задач.

Теоретичний блок.

Задача 1. Модель реактивного (водомерного) судна масою M рухається завдяки пристрою, який забирає воду з водоймища та виштовхує її назад із сопел судна. Швидкість струменя води відносно судна стала й дорівнює u . Загальна площа сопел S . Знайти:

а) силу тяги F судна як функцію швидкості судна v та швидкості струменя u води відносно судна. **Відповідь:** $F = \rho S u^2 (1 - v/u)$, де ρ – густина води;

б) корисну потужність N , що розвиває рушій судна, як функцію величин v та u . **Відповідь:** $N = \rho S u^2 (1 - v/u) v$;

в) ККД η рушія судна як функцію величин v та u . Дослідити вираз ККД на максимум. Сили тертя в рушії не враховувати. **Відповідь:** $\eta = 2(v/u)(1 - v/u)$, $\eta_{\max} = 1/2$, якщо $v = u/2$;

г) швидкість v судна як функцію часу. Опір води не враховувати. **Відповідь:** $v = u \{1 - \exp[-(\rho S u \cdot t)/M]\}$.

Розв'язання. а) *Сила тяги судна.* Розглянемо спочатку випадок, коли судно при працюючому двигуні залишається відносно води нерухомим (це має місце, наприклад, одразу після ввімкнення рушія). Оскільки рушій виштовхує воду зі сталою швидкістю u відносно судна, то за час dt із сопел виходить вода (елемент води) масою $dm = \rho S u \cdot dt$ (де ρ – густина води). Її імпульс $dm \cdot u$. При цьому модуль сили, що діє на судно з боку води (сила тяги), дорівнюватиме щосекундній зміні імпульсу води:

$$F_0 = \frac{dm \cdot u}{dt} = \rho S u^2.$$

Якщо ж судно рухається зі швидкістю v , то імпульс елемента води dm , що виходить із сопел упродовж часу dt , дорівнює

$$dm \cdot (u - v) = \rho S u (u - v) \cdot dt.$$

Тому формула сили тяги у випадку руху судна зі швидкістю v набирає вигляду

$$F = \rho S u (u - v). \quad (4.5)$$

Останню формулу можна переписати так:

$$F = \rho S u^2 (1 - v/u) = F_0 (1 - v/u), \quad (4.6)$$

де $F_0 \equiv \rho S u^2$ – модуль сили тяги при нерухомому судні.

З формули (4.6), а також з графіка залежності сили тяги $F = F(v)$ при сталих u та S (рис. 4.20) видно, що максимальне значення сили тяги набуває в момент старту моделі. Якщо ж $v = u$, то $F = 0$, як і повинно бути, адже в цьому випадку не відбувається зміни імпульсу води при її витіканні із сопел (у системі відліку, що пов'язана з поверхнею води, вода у трубці не рухається).

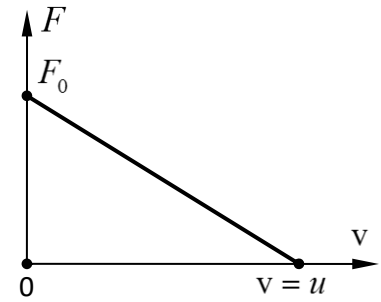


Рис. 4.20. Графік залежності сили тяги від швидкості судна $F = F(v)$

б) *Корисна потужність рушії*. При рівномірному русі судна зі швидкістю v відносно води, корисну потужність N рушії можна знайти за формулою $N = Fv$. З урахуванням формули (4.6), маємо

$$N = \rho S u^2 (1 - v/u) v = F_0 v (1 - v/u). \quad (4.7)$$

Аналіз формули (4.7) (рис. 4.21) дозволяє отримати максимальне значення корисної потужності, яку розвиває описаний у задачі рушій. Очевидно, що

$$N_{\max} = \frac{1}{4} \rho S u^3,$$

Таке значення досягається за швидкості судна $v_1 = u/2$.

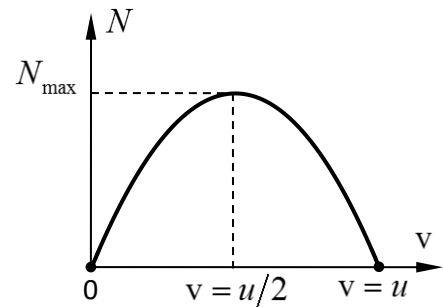


Рис. 4.21. Графік залежності потужності рушії від швидкості судна $N = N(v)$

в) *ККД рушії*. Ця величина показує, яка частина потужності струменя води, що виривається із сопел (повна потужність рушії $N_{\text{повн}}$),

перетворюється на корисну потужність N , пов'язану з переміщенням судна:

$$\eta = N / N_{\text{повн}}. \quad (4.8)$$

Знайдемо потужність струменя води (повну потужність рушії) $N_{\text{повн}}$ – потужність, яку здатен віддавати потік води, що тече зі швидкістю u . Нехай при виконанні роботи шаром води маси dm , швидкість останнього зміниться від u до нуля. Тоді згідно з теоремою про зміну кінетичної енергії отримаємо

$$N_{\text{повн}} dt = \frac{dm \cdot u^2}{2}, \quad (4.9)$$

де dt – час зміни швидкості шару води масою dm від u до нуля.

З формули (4.9), з урахуванням $dm = \rho S u \cdot dt$, отримуємо

$$N_{\text{повн}} = \frac{1}{2} \rho S u^3. \quad (4.10)$$

Отже, використовуючи формули (4.8), (4.7) та (4.10), дістаємо

$$\eta = \frac{2v}{u} \left(1 - \frac{v}{u} \right).$$

З останньої формули видно, що ККД рушія дорівнює нулю у двох випадках (рис. 4.22): за $v=0$ – судно не рухається, а двигун працює (режим холостого ходу); за $v=u$ – судно рухається зі швидкістю, що дорівнює швидкості витікання води із сопел. ККД рушія найбільший $\eta_{\max} = 1/2$ за швидкості судна $v = u/2$.

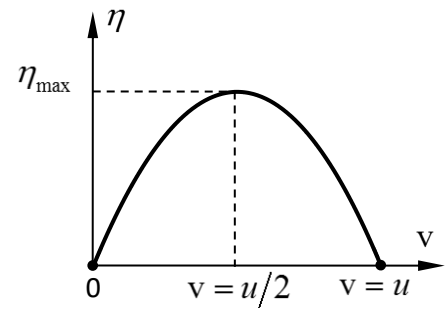


Рис. 4.22. Графік залежності ККД рушія від швидкості судна $\eta = \eta(v)$

г) *Швидкість судна.* Оскільки за умовою задачі опір руху судна можна не враховувати, імпульс системи «судно і струмінь води, що виривається із сопел» не змінюватиметься. Нехай у момент часу t судно рухається зі швидкістю v . Тоді, прирівнюючи імпульси системи у моменти часу t і $t + dt$, отримуємо рівняння

$$Mv = M(v + dv) - dm(u - v), \quad (4.11)$$

де M – маса судна; dm – маса води, що виходить із сопел упродовж часу dt . Врахувавши, що $dm = \rho Su \cdot dt$, рівняння (4.11) можна переписати у вигляді

$$\frac{dv}{v-u} = -\frac{\rho Su}{M} dt.$$

Інтегруючи останнє рівняння, отримуємо

$$\ln|v-u| = -\frac{\rho Su}{M} t + \ln C,$$

$$v-u = Ce^{-\frac{\rho Su}{M} t}.$$

Отримане рівняння має задовольняти умову $v|_{t=0} = 0$. Звідки $C = -u$.

Отже, залежність модуля швидкості судна від часу має вигляд

$$v = u \left(1 - e^{-\frac{\rho Su}{M} t} \right).$$

Задача 2. Модель водометного судна приводиться у рух за допомогою парореактивного двигуна (конструкція якого описана нами вище). Його термодинамічний цикл наведено на рис. 4.16. Атмосферний тиск $p_0 = 10^5$ Па. Температура навколишнього середовища $T = 20^\circ\text{C}$. Оцінити:

а) тиск p_1 пари при її розширенні на ділянці 1–2 циклу. Відомо, що під час розширення пари на цій ділянці вода виходить із сопел зі швидкістю $u = 2$ м/с відносно судна, а швидкість самого судна відносно поверхні води $v = 1$ м/с. *Відповідь:* $p_1 = p_0 + \rho u(u-v) \approx 102$ кПа, де ρ – густина води;

б) максимальну температуру T_1 пари в циклі. Для оцінних розрахунків питому теплоту пароутворення для води можна вважати сталою, а її значення можна взяти таким, що відповідає нормальному атмосферному тиску й температурі кипіння ($T_0 = 373$ К) $L = 2,3$ МДж/кг. *Відповідь:* $T_1 = T_0 + (p_1 - p_0)RT_0^2 / (Lp_0M) \approx 373,4$ К, де M – молярна маса води;

в) ККД η циклу розглядуваного двигуна. *Відповідь:* $\eta \approx 1 - T/T_1 = 0,25$.

Розв'язання. а) На ділянці 1–2 (див. рис. 4.16) відбувається фазовий перехід «рідина – пара», тому тиск p_1 і температура T_1 залишаються сталими. Для забезпечення необхідного значення сили тяги F моделі, тиск насиченої пари на ділянці 1–2 має дорівнювати

$$p_1 = p_0 + F/S, \quad (4.12)$$

де S – загальна площа поперечного перерізу сопел.

У формулі (4.12) ми знехтували гідростатичним тиском води (на рівні сопел) порівняно з атмосферним і гідродинамічним тиском. Підставивши у (4.12) формулу (4.5), отримуємо

$$p_1 = p_0 + \rho u(u - v),$$

де ρ – густина води. Обчислення p_1 при $p_0 = 10^5$ Па, $\rho = 10^3$ кг/м³, $u = 2$ м/с, $v = 1$ м/с дають $p_1 \approx 102$ кПа.

б) На ділянці 1–2 температура пари є сталою (фазовий перехід) і максимальною в циклі. При цьому вона перевищує $T_0 = 100^\circ\text{C}$, оскільки в камері вода кипить при підвищеному тиску p_1 ($p_1 > p_0$). Для знаходження температури кипіння води в нагрівальній камері скористаємось рівнянням Клапейрона – Клаузіуса

$$\frac{dp}{dT} = \frac{L}{T(v_2 - v_1)}, \quad (4.13)$$

яке визначає залежність тиску p насиченої пари від температури T . Якщо в рівнянні (4.13) під L розуміти *питому* теплоту пароутворення, то $v_2 - v_1$ – зміна *питомих* об'ємів речовини при фазовому переході (якщо ж L – *молярна* теплота пароутворення, то v_2 і v_1 – відповідні *молярні* об'єми речовини).

Оскільки в нашому випадку тиск p_1 насиченої пари в нагрівальній камері на ділянці 1–2 циклу відрізняється не набагато від атмосферного тиску ($p_1 - p_0 \ll p_0$), то рівняння Клапейрона – Клаузіуса (4.13) можна наближено записати у вигляді

$$\frac{\Delta p}{\Delta T} \approx \frac{L}{T_0(v_2 - v_1)}, \quad (4.14)$$

де T_0 – температура кипіння води за нормального атмосферного тиску p_0 .

Через те, що вода при кипінні в камері двигуна знаходиться у стані, далекому від критичного (для води $p_{\text{кр}} = 218$ атм, $T_{\text{кр}} = 374^\circ\text{C}$), питомий об'єм рідини v_1 значно менше за питомий об'єм пари v_2 ($v_1 \ll v_2$). Тому величиною v_1 у рівнянні (4.14) можна знехтувати. Крім того, за невеликих значень тиску насиченої пари (далеко від критичного стану) v_2 можна знайти за допомогою рівняння Клапейрона – Менделєєва (M – молярна маса):

$$v_2 = \frac{RT}{pM} \approx \frac{RT_0}{p_0 M}.$$

При цьому рівняння (4.14) набирає вигляду

$$\frac{\Delta p}{\Delta T} \approx \frac{L p_0 M}{R T_0^2}.$$

Звідки отримуємо

$$\Delta T = \Delta p \cdot \frac{R T_0^2}{L p_0 M} \approx 0,4 \text{ К.}$$

Отже, $T_1 = T_0 + \Delta T \approx 373,4 \text{ К.}$

в) Для оцінки ККД η циклу розглядуваного двигуна можна провести (подумки) цикл Карно, температури нагрівача та холодильника якого дорівнюють відповідно максимальній T_1 і мінімальній T температурам досліджуваного циклу. ККД такого циклу Карно визначить верхню межу ККД досліджуваного циклу:

$$\eta = 1 - T/T_1,$$

У нашому випадку холодильником є навколишнє середовище. За умовою задачі $T = 20^\circ\text{C} = 297 \text{ К}$; максимальною температурою у циклі є $T_1 \approx 373 \text{ К}$.

Отже, $\eta \approx 0,25$.

Експериментальний блок.

Задача 3. Виміряти швидкість моделі судна з парореактивним двигуном. *Обладнання:* досліджувана модель судна; ємність з водою, що має доволі велику відкриту поверхню (наприклад, заповнена водою ванна); рулетка; секундомір.

Розв'язання. Для визначення швидкості моделі потрібно забезпечити можливість її прямолінійного усталеного руху на певній дистанції на поверхні води. Для підвищення точності вимірювання слід провести серію дослідів, у кожному з яких вимірюється час τ_i ($i = 1, \dots, n$), за який судно долає фіксовану відстань l . Визначивши середній час $\bar{\tau}$ руху моделі, можна знайти її швидкість за формулою: $v = l/\bar{\tau}$.

Приклад конкретного вимірювання:

- відстань, яку долає модель $l = (1,00 \pm 0,01) \text{ м}$, $\varepsilon_l = 0,01$;
- середній час руху моделі $\bar{\tau} = (2,0 \pm 0,1) \text{ с}$, $\varepsilon_{\tau} = 0,05$;
- швидкість судна $v = (0,50 \pm 0,03) \text{ м/с}$, $\varepsilon_v = 0,06$.

Задача 4. Виміряти корисну потужність, що розвиває двигун моделі при її русі з усталеною швидкістю. *Обладнання:* досліджувана модель судна; ємність з водою, що має доволі велику відкриту поверхню (наприклад, ванна з водою); рулетка; секундомір; штатив із закріпленням на ньому нерухомим блоком; нитка; аркуш паперу; пісок; терези з важками; скотч; ножиці.

Розв'язання. Корисну потужність, яку розвиває двигун судна, можна знайти за формулою $N = F \cdot v$, де F – сила тяги двигуна, при якій швидкість судна дорівнює v . Вимірювання сили тяги F можна провести в такий спосіб. До носової частини судна з непрацюючим двигуном слід прив'язати нитку й перекинути її через нерухомий блок, що закріплений на штативі. На іншому кінці нитки треба закріпити паперову ємність. Підсипаючи пісок у ємність, можна збільшувати силу натягу нитки. Вдається

отримувати різні значення швидкості судна при його усталеному русі, коли сила натягу нитки (сила тяги) дорівнюватиме силі опору руху судна (рис. 4.23).



Рис. 4.23. Вимірювання сили тяги моделі

Зробивши кілька випробувань (кожного разу досипаючи пісок у ємність) можна добитися, щоб судно рухалося (завдяки натягу нитки) з тією ж усталеною швидкістю v , яку воно мало при працюючому двигуні. Сила натягу в цьому випадку й буде дорівнювати шуканій силі тяги F двигуна. Значення сили натягу нитки можна знайти за величиною сили тяжіння (ваги) ємності з піском (для оцінних розрахунків тертям у блоці можна знехтувати). Швидкість судна v вимірюємо так же як у попередній задачі.

Приклад конкретного вимірювання:

- швидкість судна $v = (0,50 \pm 0,03) \text{ м/с}$, $\varepsilon_v = 0,06$;
- сила тяги двигуна (вага ємності з піском) $F = (1,00 \pm 0,05) \text{ Н}$, $\varepsilon_F = 0,05$;
- корисна потужність двигуна $N = F \cdot v$, $N = (0,50 \pm 0,05) \text{ Вт}$, $\varepsilon_N = 0,1$.

З а д а ч а 5. Виміряти максимальну силу тяги парореактивного двигуна моделі судна. *Обладнання:* модель судна з досліджуваним двигуном; ємність з водою, що має доволі велику відкриту поверхню (наприклад, таз з водою); штатив із закріпленням на ньому нерухомим блоком; нитка; аркуш паперу; пісок; терези з важками; скотч; ножиці.

Р о з в ' я з а н н я . Як було показано в задачі 1, сила тяги парореактивного двигуна є максимальною, якщо судно не рухається відносно води (наприклад, у момент його старту). Це й визначає ідею наступного способу її вимірювання. До корми судна, що знаходиться в ємності з водою, слід прив'язати нитку й перекинути її через нерухомий блок, що закріплений на штативі. До іншого кінця нитки треба підвісити паперову ємність. Далі при працюючому двигуні потрібно збільшувати силу натягу нитки шляхом підсипання до ємності піску. За деякої ваги ємності з піском судно залишається нерухомим при працюючому двигуні. Це означає, що сила тяги двигуна врівноважена силою натягу нитки, величина якої дорівнюватиме вазі ємності з піском (за умови нехтування тертям у блоці). Масу ємності з піском вимірюємо на терезах.

Приклад конкретного вимірювання: максимальне значення сили тяги двигуна (вага ємності з піском) $F_{\max} = (2,10 \pm 0,05) \text{ Н}$, $\varepsilon_F = 0,03$.

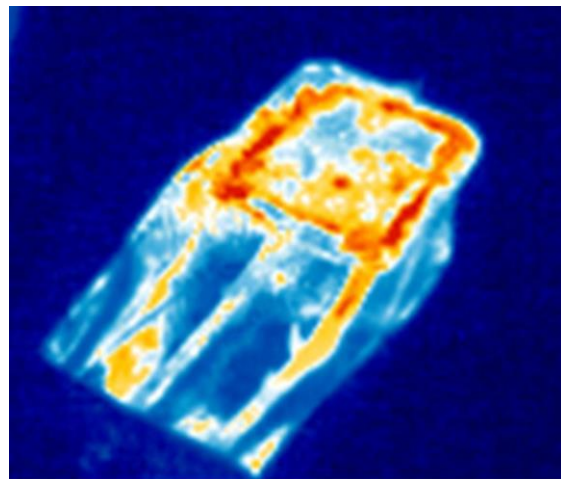
Задача 6. Експериментально виміряти температуру води, що виходить із сопел працюючої моделі парореактивного судна. *Обладнання:* модель парореактивного судна; ємність з водою, що має доволі велику відкриту поверхню (наприклад, таз з водою); тепловізор.

Розв'язання. Працююча модель судна була обстежена за допомогою тепловізора (рис. 4.24). Виявлено, що температура води, яка виходить із сопел достатньої довжини, несуттєво відрізняється від температури води в ємності. Це пояснюється тим, що нагрівання води в робочому циліндрі та її перетворення на пару відбувається вище рівня води в ємності. Тому теплопередача через конвекцію не відбувається. Отже, втрати теплоти через вихід води із сопел в ємність порівняно незначні.

Апробація пристрою. На розглянутий вище пристрій нами у співавторстві з учнями експериментальної групи було отримано патент на корисну модель «Пристрій для демонстрації перетворення теплової енергії в механічну» (патент України №78031 [305]). Наведемо формулу цього технічного рішення.



а)



б)

Рис. 4.24. Фото діючої моделі пристрою, отримані фотокамерою (а) та тепловізором (б)

Формула корисної моделі. Пристрій для демонстрації перетворення теплової енергії в механічну, що працює з використанням робочого тіла, яке зазнає двофазового перетворення рідина-пара та містить робочий циліндр, нагрівач, трубопровід, сопло, який відрізняється тим, що має плавучий корпус та не менше двох водометних сопел, які знаходяться нижче лінії осадки корпусу пристрою, а робоче тіло (вода) зазнає двофазового перетворення рідина – пара – рідина в замкнутому циклі.

Спираючись на чинну класифікацію об'єктів винаходу [278, с. 137], зазначимо, що об'єктом винаходу в нашому випадку є *застосування раніше відомого продукту за новим призначенням*. Дійсно, новизна запропонованого

технічного рішення передусім полягає у використанні вже відомого пристрою – дитячої іграшки «Парореактивний човен» – за новим призначенням – як *демонстраційний пристрій* для фізичного експерименту.

На відміну від відомих пристроїв аналогічного призначення використання розглянутого нами пристрою дозволяє: не обмежувати тривалість роботи пристрою часом випаровування води в циліндрі; продемонструвати замкнений цикл з робочим тілом, що зазнає двофазового перетворення рідина – пара – рідина; продемонструвати використання перетворення теплової енергії в механічну в практичних цілях; використовувати як джерело енергії різні види палива; підвищити безпечність демонстрації перетворення теплової енергії робочого тіла в кінетичну енергію моделі (плаваючого корпусу пристрою).

Зазначимо, що розглянутий пристрій пройшов експертну оцінку на всеукраїнських і міжнародних конкурсах фізико-технічного спрямування, де отримав схвалення. Зокрема, окремі аспекти цієї розробки були представлені учнями й студентами (співавторами патенту) на таких конкурсах:

- Міжнародний учнівський конкурс-олімпіада проєктів на тему «Стабільний світ» (I-SWEEEP) (2010 р., м. Хьюстон, штат Техас, США);
- Міжнародний учнівський конкурс науково-дослідних робіт учнів 9–11 класів «Вчені майбутнього» (2010 р., м. Москва, Росія; організатори: Московський державний університет та корпорація Intel);
- Всеукраїнський конкурс студентських науково-дослідних робіт (державний етап конкурсу 2014 р., м. Маріуполь);
- Всеукраїнський конкурс-захист науково-дослідних робіт учнів – членів МАН України (державний етап МАН 2012 р., м. Київ).

Отже, створені на основі парореактивного рушія наочні навчальні пристрої для демонстрації перетворення теплової енергії в механічну (зокрема, модель парореактивного судна, парореактивне сегнерове колесо) сприяють активізації пізнавальної діяльності учнів у навчанні фізики (зокрема, при вивченні окремих тем з механіки та молекулярної фізики й термодинаміки). Останнє реалізується через постановку цікавих фізичних демонстрацій та розв’язування учнями теоретичних та експериментальних задач, пов’язаних із дослідженням навчальних моделей з парореактивним рушієм. Важливо також, що використання цих моделей розширює кругозір учнів у сфері енергозбереження (зокрема, поглиблює їх знання щодо пристроїв і способів перетворення одного виду енергії в інший), а також сприяє посиленню їх інтересу до вивчення фізики загалом.