

ВСТУП

Інтенсифікація промислового виробництва і збільшення типів технологічного обладнання з потужними динамічними навантаженнями, а також підвищення вимог надійності та економічності будівельних конструкцій призводять до необхідності уточнення та вдосконалення динамічних розрахунків будівель і споруд.

Порівняно з питаннями міцності будівельних конструкцій, все частіше виходять на перший план питання комфортності перебування людей у приміщеннях висотних будівель та поблизу промислових споруд з динамічним обладнанням, адже лише міцне здоров'я та повноцінна життєдіяльність людини є дійсним і єдиним надійним підґрунтям сталого розвитку суспільства в усіх сферах. Підвищення вимог комфортності житла та робочих місць, захисту прецизійного обладнання від вібрації сприяє бурхливому розвитку такої науки, як віброекологія. Велика кількість інженерів займається розробкою низькочастотної багатоланкової активної віброізоляції важких машин і обладнання з динамічними навантаженнями, а також пасивної віброізоляції будівель при русі трамваїв, поїздів метрополітену тощо.

Розвиток теорії розрахунку на міцність і стійкість складених стержнів, пластин, оболонок, інших елементів, значна кількість досліджень реакції будівель і споруд на вітрові, рухомі, сейсмічні та інші динамічні навантаження, дослідження нелінійних коливань механічних систем, стійкості конструкцій, засобів віброзахисту і динамічного гасіння коливань, дозволяє удосконалювати методики динамічного розрахунку складних висотних будівель з прорізами, мостів, а також протяжних промислових і цивільних споруд, що лежать на пружній основі.

Не дивлячись на значну кількість і безперечно високу якість досліджень в області динаміки споруд, досі відсутні комплексні методики розрахунків,

випробувань та діагностики складних об'єктів будівництва, що були б не тільки зручними, але й орієнтованими на стандартні вимірювальні й однотипні обчислювальні засоби, відповідними за можливостями не тільки жорстким регламентам Державних будівельних норм (ДБН) і Державних стандартів України (ДСТУ), а й ініціативним діям інженера у набагато ширших межах світових будівельних стандартів – наприклад, Єврокодів.

Після основних понять динаміки споруд і теорії коливань в перших розділах розглядаються власні та вимушені коливання найпростіших коливальних систем з одним ступенем свободи без урахування тертя. Слід відзначити, що вимушені коливання найчастіше вивчаються при гармонійних діях і лише в деяких випадках при імпульсних і випадкових динамічних навантаженнях.

У посібнику розглянуто декілька основних методів будівельної механіки, що дозволяють визначати частоти і форми власних коливань стійких споруд, знаходити амплітуди динамічних переміщень, згинаючих моментів і поперечних сил при різних режимах вимушених коливань. Спочатку вивчається використання методу переміщень, потім – методу скінчених елементів (МСЕ) і методу сил, що пояснюється необхідністю першочергового підготовки слухачів до аналізу динамічному розрахунку рами за допомогою МСЕ у формі методу переміщень, адже МСЕ – основа більшості вітчизняних обчислювальних програмних комплексів (ПК), таких як ЛІРА, SCAD, МОНОМАХ та ін.

В наступних розділах надано обґрунтування виділення складних і складених споруд в окремий клас об'єктів будівництва з точки зору формування розрахункової моделі споруди. Показано важливість вибору розрахункової моделі, адже похибки математичних методів, що застосовуються у самому розрахунку, часто на порядок менше похибок, що допускаються при виборі конфігурації схеми споруди, при лінеаризації властивостей матеріалів, вузлів і основи споруди, а також спрощення конкретних навантажень і впливів, насамперед динамічних. Наведено принципи формування розрахункових

моделей будівель і споруд в залежності від виду діючого динамічного навантаження, конструктивних особливостей споруд та умов їх експлуатації.

Далі розглядаються основи розрахунку споруд на основні динамічні дії – гармонійні, імпульсні і сейсмічні навантаження, у тому числі із урахуванням впливу сил непружного опору і гасіння коливань. В прикінцевих розділах наведено основні конструктивні вимоги до проектування будівель і споруд відповідно діючим нормативним документів, а також інформація щодо сейсмостійкості будівель і споруд та основ віброекології.

Видання також містить контрольні питання з розглянутих тем, основні напрямки наукової та практичної роботи у сфері динаміки споруд, перелік використаної літератури і джерел, які рекомендуються для самостійного та більш глибокого засвоєння студентами матеріалу дисципліни, алгоритм розрахунку багатоповерхової каркасної будівлі на динамічні сейсмічні та вітрові навантаження за допомогою ПК LIRA.

Навчально-методичний посібник «Динаміка споруд» призначений для студентів і магістрантів спеціальностей «Міське будівництво і господарство», «Промислове та цивільне будівництво» та інших будівельних спеціальностей денної та заочної форм навчання, а також для фахівців, які займаються питаннями динаміки споруд і віброекології, а також проектуванням, розрахунком і конструюванням будівельних конструкцій, будівель і споруд, що знаходяться під впливом різноманітних динамічних дій.

РОЗДІЛ 1

ОСНОВНІ ПОНЯТТЯ ДИНАМІКИ СПОРУД

Динаміка споруд є одним з найбільш складних розділів будівельної механіки і базується на відповідних розділах фізики, теорії коливань, теоретичної та будівельної механіки, опору матеріалів і теорії пружності. При вирішенні завдань і дослідженнях з динаміки споруд застосовується сучасний апарат обчислювальної математики, теорії автоматичного управління, використовуються сучасні електронні обчислювальні машини (ЕОМ). У даному розділі розглядаються динамічні дії і види коливань споруд, вводиться поняття про число ступенів свободи.

Для багатьох видів споруд динамічні навантаження (природного або техногенного походження) є основними, за якими визначаються зовнішні розміри, конфігурація, вид і параметри перетинів елементів конструкції. До таких споруд через підвищену гнучкість і слабку дисипацію належать об'єкти, виконані, зокрема, з металевих конструкцій: висотні будівлі і споруди (хмарочоси, вежі, щогли, труби, радіотелескопи, висотні монументи і т.д.); мости, естакади і трубопроводи; повітряні лінії електропередач (ЛЕП), включаючи опори; морські та річкові платформи та інші гідротехнічні споруди; конструкції атомних і теплових електростанцій та агрегатів; різноманітні конструкції промислових будівель.

Однак існують ще два аспекти, у зв'язку з якими дослідження динаміки споруд з їх практичним застосуванням останнім часом отримали бурхливий і дещо несподіваний розвиток. Насамперед це стосується якості життя і роботи людей у житлових і виробничих приміщеннях (перший аспект). Ця проблема є скоріше сервісно-цивілізаційною і відноситься до сфери віброекології. Потрібно суттєво переглянути точність визначення теоретично прогнозованих динамічних параметрів всіляких видів коливань (частіше вимушених, але іноді й вільних)

різних точок і перетинів елементів конструкцій споруд на всіх етапах її створення і експлуатації. Це обумовлено тим, що до теперішнього часу в колишніх радянських країнах інженерні розрахунки будівельних конструкцій за старими будівельними нормами і правилами (СНіП) виконувалися, як правило, лише з перевіркою їх динамічної міцності, для чого були потрібні зовсім інші критерії, а також пов'язані з ними точність постановки завдання та принципи вибору динамічної розрахункової схеми (моделі), а також підходи до опису динамічних процесів і властивостей (математичної моделі).

Разом з тим, в країнах зі зростаючим обсягом промислових підприємств, що закриваються (це явище характерне не тільки для колишніх радянських республік), відбувається таке насичення територій міських і промислових зон стихійно занедбаними конструкціями з вичерпаним терміном служби та в аварійному або невідомому стані, при якому навіть часткове їх технічне обстеження стає неймовірно трудомістким, а іноді й практично нездійсненним. У таких випадках для повної паспортизації та моніторингу забудови (другий аспект) може знадобитися масове застосування інтегрально-інструментальної динамічної діагностики з роботами комплексного характеру – теоретичними дослідженнями і розрахунками, взаємопов'язаними з натурними випробуваннями.

Період розвитку динаміки споруд, що співпадає з бурхливим розвитком авіабудування, ракетобудування та суднобудування, відзначений диференціацією будівельної механіки. Виділилися в самостійні наукові напрямки будівельна механіка літака, будівельна механіка ракети, будівельна механіка корабля, що мають свої специфічні особливості як у частині розрахункових схем (моделей), так і в питаннях взаємодії цих класів конструкцій з відповідним навколишнім середовищем як зовнішнім впливом. Сформувалися й нові наукові напрями – динаміка літака, динаміка ракет, динаміка корабля.

Подальша еволюція цих напрямків у динаміці споруд пов'язана з очевидною необхідністю врахування зворотного зв'язку динамічної поведінки

конструкцій з фізико-механічними параметрами навантажень і впливів, обумовлених природними явищами. Внаслідок цього стали розвиватися прикладні напрямки аеро- та гідродинаміки.

До специфічних вузьких аспектів проблем динаміки споруд відноситься взаємодія форм коливань реальних споруд внаслідок полігармонічності їх реакцій на зовнішні впливи, в тому числі в процесі монтажу, коли споруда знаходиться в різних непроектних станах, розрахунок яких окремо не виконується. Адаже динамічна реакція споруди в процесі монтажу значно відрізняється від динамічної реакції в проектному стані. Не менш важлива взаємодія різних видів руху елементів конструкцій – наприклад, кручення споруди з його вигином в горизонтальній і вертикальній площинах.

До нових важливих аспектів проблем динаміки споруд можна без перебільшення віднести вплив динамічних реакцій конструкцій на людину, а також вплив людини як джерела рухомого навантаження на динамічну поведінку споруд. Дослідження поведінки системи «людина – споруда» виявилися плідними завдяки просуванню теорії біомеханіки людини.

1.1 Види динамічних дій

Традиційно для задач динаміки однією з найважливіших проблем вважається визначення збурень, а саме – коректне вимірювання характерних параметрів, їх статистична обробка і введення в модель, – з подальшим вирішенням цих завдань в ймовірнісній постановці із застосуванням нелінійних просторових моделей споруд.

В теперішній час підвищуються потужності технологічного устаткування та швидкості руху транспорту, збільшуються розміри, гнучкість будівель, споруд і як наслідок – динамічні навантаження при дії вітру, сейсміки, транспорту. Можна було б привести різні класифікації і визначення динамічних навантажень

і впливів, але всі вони мали б тимчасовий, не остаточний вигляд, адже наприкінці минулого тисячоліття з'явилися нові види устаткування та транспорту, а також матеріалів, схем і масштабності споруд, що автоматично пов'язано з появою нових класів динамічних процесів і навантажень техногенного або комбінованого походження.

Динамічне навантаження – це силовий або кінематичний зовнішній фактор, що викликає при русі конструкції або сили інерції, порівнянні зі статичними навантаженнями від власної ваги, які слід враховувати при аналізі напружено-деформованого стану (НДС), або коливання конструкцій, відчутні розташованими на них людьми, що впливають на якість роботи приладів, обладнання та т.п.

Динамічний вплив – це природне або техногенне явище, що викликає поле силових або кінематичних зовнішніх факторів, динамічно взаємодіючих зі спорудою.

Практика ставить перед інженером численні запитання. Що є динамічним навантаженням і в яких випадках не можна обмежитися розрахунками на статичну міцність і стійкість? Чи є небезпечним перехід по мосту групи людей, проїзд транспорту, робота механізмів на перекритті і т.д.? Нагадаємо сумний досвід аварій тільки декількох мостів:

- 1831 р., місто Манчестер – 60 солдатів йшли стройовим кроком, в результаті чого зруйнувався підвісний міст (на рис. 1.1 показаний міст, відбудований у 1883 р.);

- 1850 р., м. Анжеро, Франція – обрушився висячий міст через ущелину річки Мен при русі колони в 500 піхотинців, 226 осіб загинули;

- 1905 р., м. Санкт-Петербург, Росія (рис. 1.2) – Єгипетський міст через річку Фонтанку обрушився при проході кавалерійського загону;

- 1940 р., м. Такома, штат Вашингтон, США (рис. 1.3) – висячий трьохпрольотний міст загальною довжиною 1662 м і довжиною прольотів 335 м, 854 та 335 м, обрушився після завершення будівництва. Причиною були великі

амплітуди вертикальних переміщень (до 1,5 м) при згинально-крутильних коливаннях, викликаних втратою аеродинамічної стійкості при певній швидкості вітрового потоку.



Рисунок 1.1 – Міст у м. Манчестер

Розрізняють такі види динамічних навантажень:

1) Безперервно діючі періодичні навантаження, прикладені в певних місцях споруди. Такого типу навантаження створюються найчастіше при вібраціях і роботі вентиляторів, турбін, вібраторів, компресорів та інших пристроїв, причому нерідко навантаження є моногармонічним (одночастотним). Основна особливість цього виду навантажень – наявність періоду T (див. рис. 1.4, а) при безперервному (циклічному) повторенні впливу у часі.

2) Імпульсні (ударні) навантаження (рис. 1.4, б) характеризуються фронтом наростання і спаду зусиль S за короткий проміжок часу (короткий у

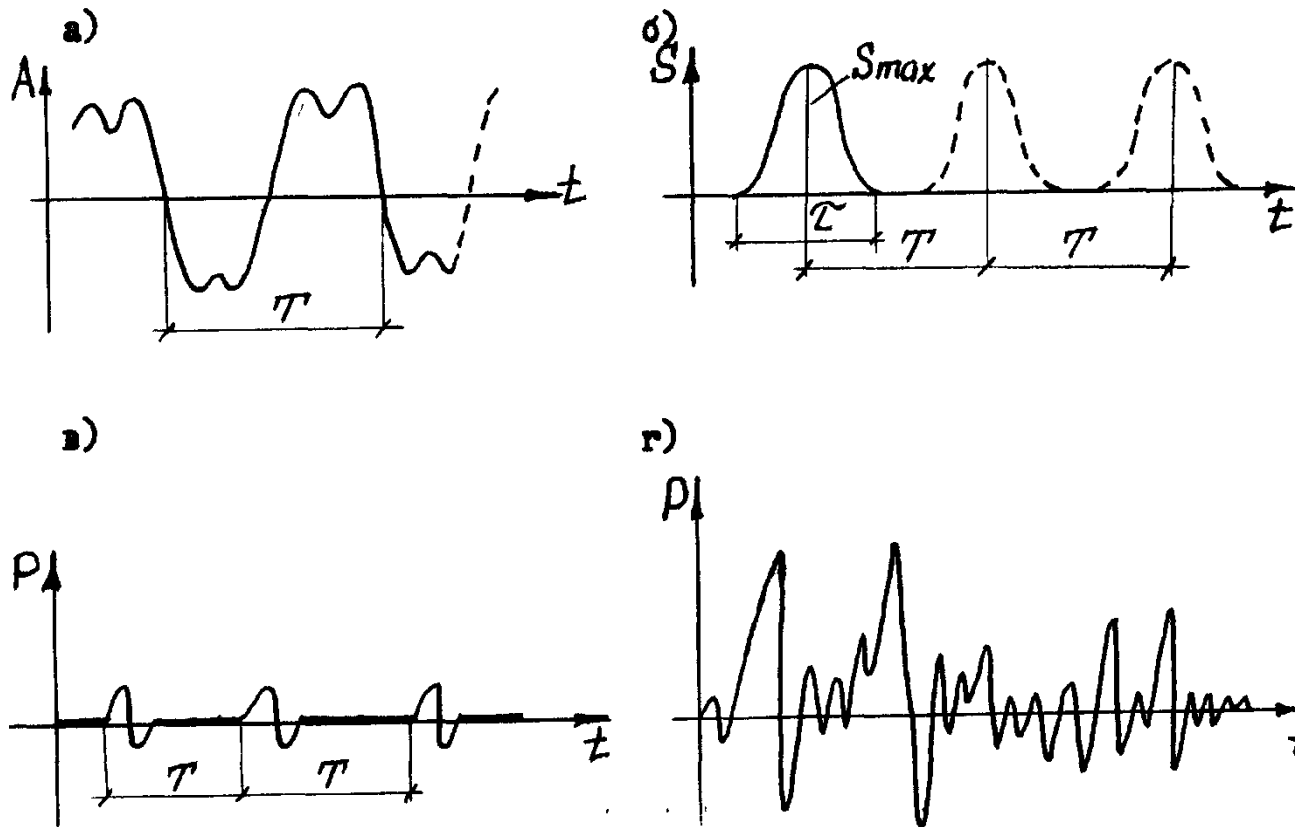


Рисунок 1.2 – Єгипетський міст через р. Фонтанка у м. Санкт-Петербург, Росія



Рисунок 1.3 – Відбудований міст у м. Такома, штат Вашингтон, США

порівнянні з періодом власних коливань конструкцій). Подібні навантаження виникають при роботі молотів, копрів, при будь-яких вибухах, обвалах і т.д. Як варіант, можливо періодична дія імпульсів (див. штрихові лінії на рис. 1.4, б), наприклад, при роботі штампувальних машин.



- а) гармонійні;
- б) імпульсні (ударні);
- в) рухомі;
- г) вітрові та сейсмічні.

Рисунок 1.4 – Види динамічних навантажень

3) Рухомі навантаження, що переміщуються по споруді та створюються практично всіма видами транспорту – автомобільним і залізничним на мости і в підземних спорудах, водним на конструкції причалів та інші гідротехнічні

споруди, повітряним на плити аеродромних покриттів. До цієї ж групи належать і вплив автотранспорту на перекриття промислових будівель, навантаження від конвеєрів і кранів різного типу. Зокрема, при взаємодії мостового крана, що рухається по підкранових балках, в розрахунку балки необхідно враховувати вплив системи рухливих, іноді підресорених вантажів, а в розрахунку моста крана – імпульсно-періодичне навантаження, що діє на візки з боку підкранової балки, що деформується та має стики між ланками кранових рейок довжиною l . Останній випадок зображений на рис. 1.4, в, де період дорівнює $T = l / v_{кр}$ (швидкість руху крану).

4) Вітрові навантаження носять випадковий характер (рис. 1.4, г) і є одними з найважливіших, наприклад, для високих або гнучких споруд, висячих покриттів мембранного типу, мостів і т.д.

5) Сейсмічні навантаження також носять випадковий характер і викликаються не тільки землетрусами, але й коливаннями основи споруд від так званої промислової сейсміки (або мікросейсміки).

б) Інші, до яких можна віднести динамічні навантаження аварійного характеру при катастрофах, пожежах, селях, цунамі та інші стихійних лихах.

Крім наведеної класифікації слід підкреслити два способи передачі навантажень на споруду. Якщо навантаження безпосередньо прикладається до споруди у вигляді сили, то говорять про силове збурення – це вітрове навантаження, відцентрові сили рухомих частин обладнання і т.д. Якщо ж споруді навантаження передається у вигляді переміщення його окремих точок по жорстко заданому закону, який не залежить від динамічних властивостей самої споруди, то говорять про кінематичне збурення – сейсмічні дії на основи і фундаменти споруд, переміщення опорних вузлів балок і рам і т.д.

Певні проблеми динамічних розрахунків пов'язані з коректним урахуванням масштабності споруд (і їх моделей), а також адекватності всіх основних навантажень при комп'ютерному або фізичному моделюванні зі спробами відтворення істинних процесів і наявного НДС конструкції. Зокрема, в

деяких роботах запропоновані моделі та алгоритми, що дозволяють більш коректно, ніж багато універсальних ПК, проводити одночасно розрахунок складеного об'єкта на статичні та динамічні нестандартні навантаження з урахуванням взаємодії інерційних навантажень з пружними конструкціями і інерційними пружно-дисипативними основами, з аналізом стійкості системи, приєднання до неї будь-яких підсистем (наприклад, приборудов), з урахуванням всієї історії основного навантаження об'єкта.

У розглянутій постановці можуть прийматися як силові, так і кінематичні, у тому числі випадкові збурення в часовій і частотній областях. У необхідних випадках крім традиційних форм обліку динамічних навантажень від вітру, землетрусу, руху автомобільного та залізничного транспорту, роботи устаткування можуть бути досліджені нетрадиційні підходи до розрахунку процесів взаємодії, нерідко за допомогою спрощених квазістатичних силових факторів. Тут зникають поняття класичного силового або кінематичного збурення і проявляються параметричні коливання, автоколивання і т.п.

Наприклад, при розрахунку конструкцій з рухомими навантаженнями система «пішоходи + конструкція» повинна розглядатися як єдина біомеханічна система зі змінними параметрами; «підресорені екіпажі, що рухаються по прогонній споруді» – як інерційні нерегулярні односторонньо зв'язані механічні системи, одна з яких рухома. При взаємодії конструкцій з вітровим потоком слід враховувати можливість виникнення аеропружних автоколивань та інших наслідків вітрових навантажень.

Динамічним методом, паралельно з аналізом коливань, з тим же підходом досліджується стійкість рівноважних станів різноманітних конструктивних систем (наприклад, комбінованих), історія навантаження елементів, ефективність або особливі явища при приєднанні нової конструкції до існуючого споруди.

1.2 Поняття про ступені свободи споруди

Динамічні властивості споруди або конструкції багато в чому залежать від розподілу по споруді мас, параметрів жорсткості та демпфування (затухання або гасіння коливань), а також від числа ступенів свободи – числа незалежних узагальнених координат, що повністю визначають положення механічної системи в будь-який момент часу.

Якщо матеріальна точка на площині має два ступеня свободи, а в просторі – три, то абсолютно тверде тіло на площині крім двох параметрів, що визначають положення, наприклад, його центра ваги, вимагає введення третьої узагальненої координати – у даному випадку кута повороту тіла відносно центра ваги. Іншими словами, число ступенів свободи споруди дорівнює числу додаткових зв'язків, які умовно слід ввести в систему для усунення будь-яких можливих переміщень всіх мас системи.

Усі реальні споруди і конструкції мають нескінченно велике число ступенів свободи. Проте на практиці у багатьох випадках величинами розподілених мас несучих конструкцій порівняно з величинами зосереджених мас обладнання або другорядних конструкцій можна знехтувати або перенести їх у певні вузли. Тоді, відповідно до так званого способу зосереджених мас, число ступенів свободи споруди наближено дорівнює числу можливих переміщень (незалежних координат) тільки зосереджених мас. Однак еквівалентна модель із зосередженими масами, дискретна за своєю суттю, повинна мати нижчі частоти і форми власних коливань з близькими відповідними даними для моделі з розподіленими масами (маються на увазі перші три частоти власних коливань).

Основними припущеннями в динаміці стержневих систем з дискретними моделями найчастіше є такі:

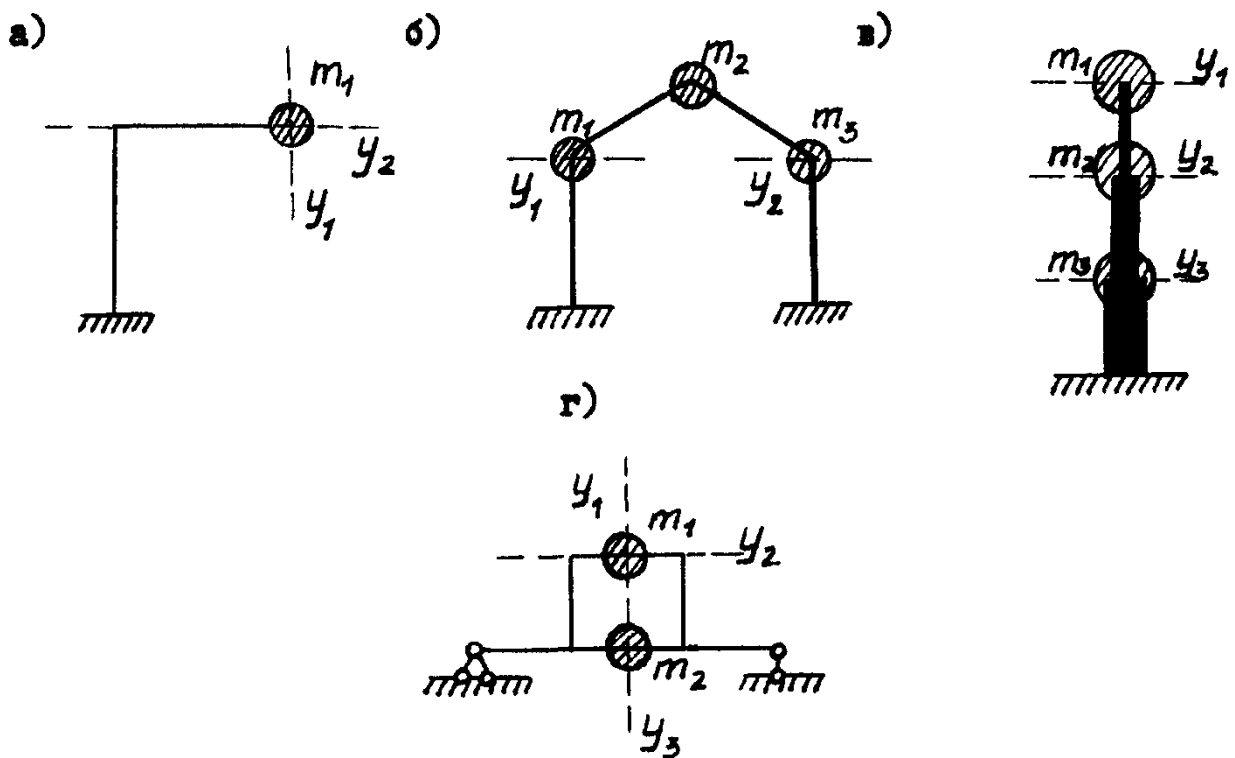
- 1) стержні вважаються невагомими, а їх маси прикладаються у вузлах (при використанні різних методів це допущення застосовується лише в окремих

випадках – наприклад, у методі сил);

2) зосереджені маси приймаються точковими, тобто не враховується їх інерція обертання;

3) не враховується зближення кінців стержня при його поздовжньо-поперечному вигині (досліджуються малі коливання).

На рис. 1.5 зображені умовні динамічні «площинні» розрахункові схеми умовно невагомих конструкцій із зосередженими масами. Штрихові лінії показують вибрані узагальнені координати. Конструкції на рис. 1.5, а, б мають два ступені свободи, а на рис. 1.5, в, г – три.



а) консольна рама з двома ступенями свободи;

б) рама з двома ступенями свободи;

в) вертикальний консольний стержень з трьома ступенями свободи;

г) вільно оперта балка з трьома ступенями свободи.

Рисунок 1.5 – Динамічні розрахункові схеми із зосередженими масами

1.3 Види коливань і сил, які діють на масу, що коливається

Наведемо деяку класифікацію динамічних процесів і в першу чергу коливань споруд. Коливання за видом процесу і з причин, якими вони були викликані, можна розділити на дві великі групи:

- 1) вільні;
- 2) вимушені.

Вільні коливання здійснює система, виведена зі стану стійкої рівноваги і надана сама собі. Надалі причина, що викликала коливання, усувається. Якщо в системі відсутнє тертя, то вільні коливання будуть незгасаючими. Якщо ж у такій системі початкові умови обрані не випадково, а форма початкових відхилень відповідає одній з головних форм (при якій всі точки системи коливаються з однаковою частотою K), то вільні незгасаючі коливання, що здійснюються системою, є моногармонічними та називаються власними (рис. 1.6, а).

В реальних системах завжди присутні сили непружного супротиву, отже вільні коливання зазвичай є згасаючими (рис. 1.6, б).

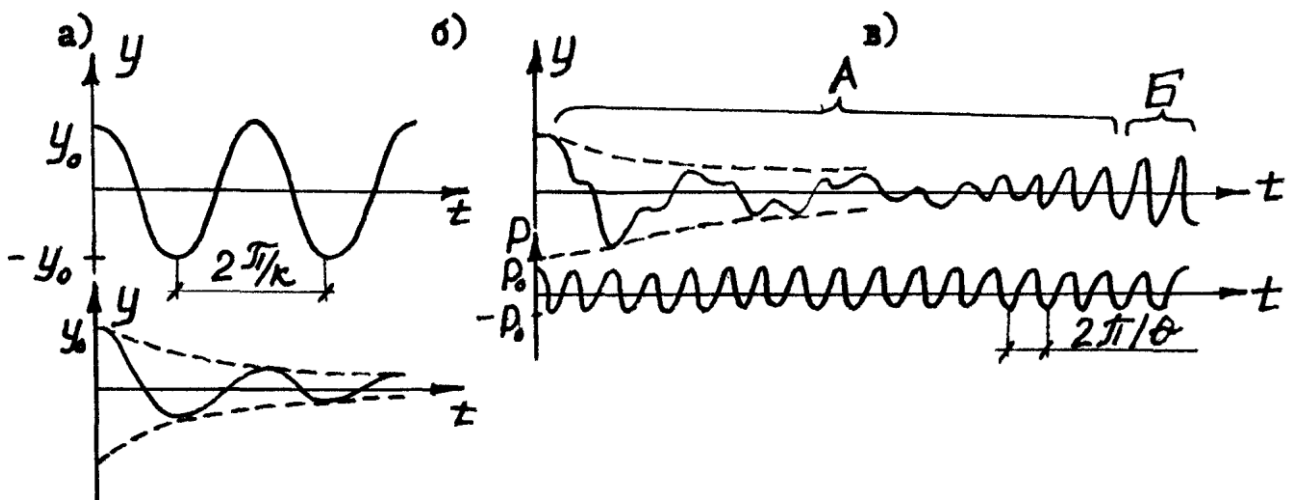


Рисунок 1.6 – Види коливань

І нарешті, якщо на систему безперервно діє динамічне навантаження, то коливання називаються вимушеними. Вони складаються з перехідного процесу (див. ділянку А на рис. 1.6, в) несталих коливань і усталеного процесу (ділянка Б) – після загасання вільних і стабілізації вимушених коливань, наприклад, з частотою сили, що збуджує $P(t) = P_0 \cdot \cos \theta \cdot t$, де θ – частота вимушених коливань; P_0 – амплітуда (початкове значення сили, що збуджує); t – момент часу.

За характером деформацій систем розрізняють поперечні, поздовжні і крутильні коливання стержнів, плоскі згинальні або просторові коливання рам, плит і цілих будинків і споруд.

За законом відхилень амплітуд динамічних процесів коливання можуть бути періодичними і неперіодичними (зокрема, випадковими).

При вимушених коливаннях на масу, що коливається, в загальному випадку крім сил тяжіння можуть діяти сили, що збуджують, або кінематичні переміщення гармонійного чи більш складного характеру. Зі збільшенням амплітуд прискорень мас коливальної системи збільшуються сили інерції, що дорівнюють добутку маси на прискорення, взятому з протилежним знаком – $m \cdot \ddot{y}$, де m – маса, що коливається, \ddot{y} – прискорення маси при коливаннях.

Коливанням чинять опір:

- 1) сили пружного опору – сили, що відновлюють;
- 2) сили непружного опору – демпфуючі сили.

Пружними властивостями наділені різні пружини, балки, елементи будівельних конструкцій, ґрунти. Демпфуючі (дисипативні) властивості притаманні також усім конструкціям і матеріалам, від цих властивостей залежать час загасання вільних коливань і амплітуди вимушених коливань.

Пружні і непружні властивості матеріалів і конструкцій можуть мати лінійні або нелінійні характеристики. Далі в основному будуть розглядатися системи з лінійними характеристиками, а збурення як правило будуть прийматися моногармонічними.

1.4 Коливання систем з одним ступенем свободи

Розглянемо основні параметри коливань, що виникають при вільних і вимушених коливаннях консервативної механічної системи з одним ступенем свободи. Консервативною називається механічна система, в якій відсутнє тертя, або воно не враховується. До таких умовних розрахункових схем можуть бути приведені при первісному розгляді задачі про коливання фундаментів під машини з динамічними навантаженнями [25], балок і ферм із зосередженими масами на них (наприклад, обладнання) і т.д. При малих силах непружного опору їх можна не враховувати в більшості задач, крім вивчення режимів, близьких до резонансних, що буде розглянуто в наступних розділах.

Системою з одним ступенем свободи може бути статично визначена і статично невизначена система, а також кінематично невизначена система. Будемо розглядати тільки статично визначені системи. При рішенні задач для систем з декількома ступенями свободи за методами сил, переміщень і кінцевих елементів буде видно, що рішення для статично невизначених систем з одним ступенем свободи можна легко знаходити як окремі випадки.

1.4.1 Власні коливання

Розглянемо найпростішу консервативну пружну одномасову систему з одним ступенем свободи. Коливальні системи, або осцилятори, зображені на рис. 1.7, складаються з маси m , пружно підвішеної на пружині або балці з жорсткістю r , що дорівнює відношенню сили тяжіння G до статичного прогину системи y_{cm}^G :

$$r = \frac{G}{y_{cm}^G}. \quad (1.1)$$

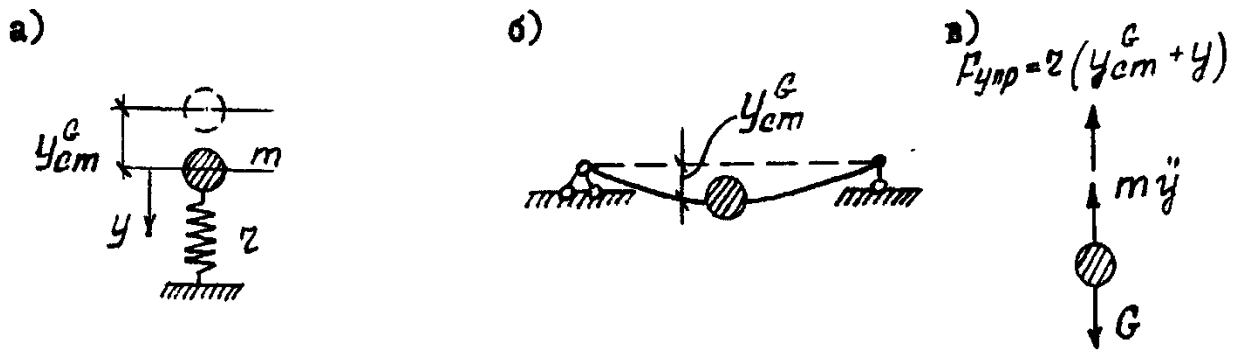


Рисунок 1.7 – Осцилятори з одним ступенем свободи

Користуючись принципом Даламбера (методу кінетостатики для точки), рівняння руху можна записати у формі умови динамічної рівноваги статично діючих сил і сил інерції:

$$\begin{aligned} \sum y - m\ddot{y} &= 0; \\ (G - F_{упр}) - m\ddot{y} &= 0; \\ m\ddot{y} + r(y_{cm}^G + y) - G &= 0 \end{aligned}$$

Підставляючи (1.1), отримаємо диференціальне рівняння власних коливань системи з одним ступенем свободи:

$$m\ddot{y} + ry = 0. \quad (1.2)$$

Відзначимо, що коливання, викликані в даній системі, не згасають, а тому термін «вільні» замінений на «власні». Будь-які початкові умови руху приведуть до коливань з постійною і завжди однаковою частотою. Так як нас цікавлять одночастотні гармонійні коливання з частотою K і амплітудою A , то рішення для динамічних переміщень y і його похідні мають вигляд:

$$y = A \sin Kt; \quad \dot{y} = AK \cos kt; \quad \ddot{y} = -AK^2 \sin kt. \quad (1.3)$$

Підстановка (1.3) в (1.2) дає

$$-mAK^2 \sin Kt + rA \sin Kt = 0, \quad mK^2 = r,$$

звідки отримуємо формулу для кругової (циклічної) частоти власних коливань системи з одним ступенем свободи

$$K = \sqrt{\frac{r}{m}} \quad [\text{сек}^{-1}]. \quad (1.4)$$

Лінійна частота f вимірюється в герцах:

$$f = \frac{K}{2\pi} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{r}{m}} \quad [\text{Гц}]. \quad (1.5)$$

Якщо врахувати (2.1) і замінити масу G/g , то можна отримати інше вираження, вельми зручне в інженерній практиці. Зокрема, при горизонтальних коливаннях y_{cm} визначається як горизонтальне статичне переміщення від умовної сили $G = m \cdot g$, прикладеної в горизонтальному напрямку. Нарешті, при розрахунках складних систем з одним ступенем свободи (наприклад, рамних) у формулі (1.5) жорсткість замінюється через податливість $r = l / \delta_{ll}$:

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{g}{m\delta_{ll}}}, \quad (1.7)$$

де δ_{ll} – статичне переміщення по напрямку можливих коливань від одиничної сили $P = 1$.

У технічних завданнях зустрічається також термін «технічна частота» – число обертів двигуна в одну хвилину:

$$n = 60 \cdot f, \quad [\text{об/мин}]. \quad (1.8)$$

Період власних коливань T можна визначити наступним чином:

$$T = \frac{1}{f} = \frac{2\pi}{K} = \frac{60}{n}, \quad [\text{сек}].$$

1.4.2 Вимушені коливання

Припустимо, що до зосередженої маси (див. рис. 1.7) прикладена гармонійна сила, де P_0 – амплітуда сили, а θ – частота вимушених коливань. При такому силовому збуренні з рис. 1.7, в, і принципу Даламбера впливає, що диференціальне рівняння вимушених коливань буде мати вигляд:

$$m\ddot{y} + ry = P_0 \sin \theta t. \quad (1.9)$$

Тоді процес сталих вимушених коливань, відзначений режимом Б на рис. 1.6, в, матиме форму рішення (1.3) при заміні частоти K на θ . У такому випадку замість (1.9) можна отримати:

$$\begin{aligned} -mA\theta^2 + rA &= P_0; \\ \left(-\frac{m}{r}\theta^2 + 1\right) \cdot A &= \frac{P_0}{r} \\ A &= \frac{P_0}{r} \cdot \frac{1}{1 - (\theta/K)^2} \end{aligned} \quad (1.10)$$

Якщо другий співмножник в (1.10) позначити динамічним коефіцієнтом

$$\mu = \frac{1}{1 - (\theta/K)^2}, \quad (1.11)$$

то динамічні переміщення можуть бути визначені так:

$$y_{дин} = A \sin \theta t = y_{см}^P \cdot \mu \cdot \sin \theta t, \quad (1.12)$$

де $y_{см}^P = P_0/r$ – переміщення від дії статично прикладеної амплітуди вимушених коливань.

Таким же чином може бути знайдена амплітуда будь-якого внутрішнього силового фактора:

$$M_{дин} = \mu \cdot M_{см}^P; \quad Q_{дин} = \mu \cdot Q_{см}^P; \quad \sigma_{дин} = \mu \cdot \sigma_{см}^P. \quad (1.13)$$

Слід підкреслити, що тут немає зв'язку з прогинами і зусиллями від власної ваги системи $y^{c.в.}_{ст}$, $M^{c.в.}_{ст}$, $\sigma^{c.в.}_{ст}$ і відлік динамічних амплітуд ведеться від рівня величин при положенні статичної рівноваги системи. Повні, максимальні величини дорівнюють:

$$\begin{aligned} y_{полн.} &= y_{ст}^{c.в.} + y_{дин.} = y_{ст}^{c.в.} + \mu \cdot y_{ст}^{P_0} \cdot \sin \theta t; \\ M_{полн.} &= M_{ст}^{c.в.} + \mu \cdot M_{ст}^{P_0} \cdot \sin \theta t; \\ \sigma_{max} &= \sigma_{ст}^{c.в.} + \mu \cdot \sigma_{ст}^{P_0} \cdot \sin \theta t \end{aligned} \quad (1.14)$$

де другі доданки мають знаки « \pm ».

Використовуючи вираз (1.11), побудуємо графік залежності динамічного коефіцієнта μ від співвідношення частот вимушених і власних коливань, який показано на рис. 1.8. При відсутності частоти θ сила, що збурює P_0 діє статично, відношення частот $\theta/K = 0$, коефіцієнт $\mu = 1$, отже $y_{дин.} = y_{ст}^{P_0}$. При збігу частот вимушених і власних коливань проявляються резонансні коливання: $\theta/K = 1$, $\mu = \infty$, $y_{дин.} = \infty$.

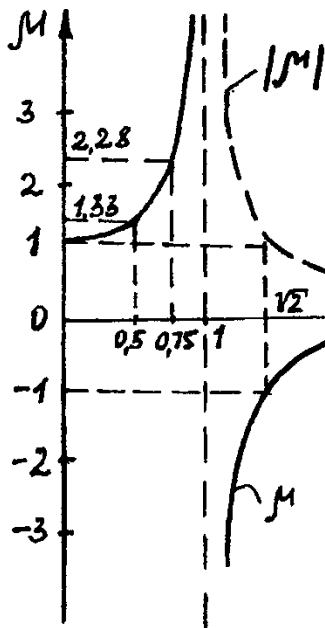


Рисунок 1.8 – Графік залежності динамічного коефіцієнта

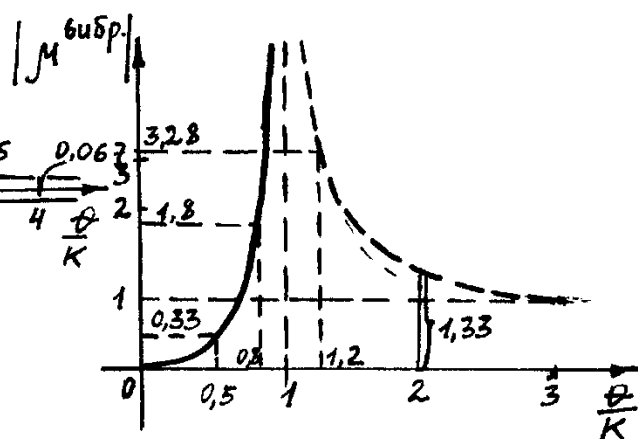


Рисунок 1.9 – Графік залежності вібраційного коефіцієнта

У зарезонансній зоні (при $\theta > K$) динамічний коефіцієнт змінює знак на негативний і зі збільшенням частоти збурення μ зменшується від ∞ (при $\theta/K = 1$) до нуля (при $\theta/K = \infty$). Для зручності цю гілку графіка із зони від'ємних μ зазвичай переносять дзеркально в зону позитивних значень, будуючи графік $|\mu|$ (штрихова лінію на рис. 1.8).

У більшості вібраційних машин амплітуда вимушених коливань P_0 в рівнянні (1.9) пропорційна квадрату частоти:

$$P_0 = \alpha\theta^2, \quad (1.15)$$

де коефіцієнт α зазвичай дорівнює добутку маси частин, що обертаються m_{ep} на ексцентриситет e між центром мас і віссю обертання: $\alpha = m_{ep} \cdot e$. Підстановка (1.15) в (1.10) приводить до формули для амплітуд:

$$A = \frac{\alpha\theta^2}{r} \cdot \frac{1}{1 - (\theta/K)^2} = \frac{\alpha}{m} \cdot \frac{1}{\frac{1}{(\theta/K)^2} - 1} = \frac{\alpha}{m} \cdot \mu^{\text{вibr}} \quad (1.16)$$

$$\mu^{\text{вibr}} = \mu \cdot (\theta/K)^2.$$

Графік динамічного коефіцієнта при впливі вібратора $\mu^{\text{вibr}}$, наведений на рис. 1.9, відрізняється від графіка при звичайному силовому збуренні μ (рис. 1.8) наявністю нульової точки при нульовій частоті збурення і асимптотичним наближенням $\mu^{\text{вibr}}$ до одиниці при $\theta/K \rightarrow \infty$ (при цьому $A = \alpha/m$). Остаточо:

$$y_{\text{дин}}^{\text{вibr}} = \mu^{\text{вibr}} \cdot \frac{\alpha}{m} \cdot \sin \theta t. \quad (1.17)$$

Припустимо тепер, що в систему надходить не силове, а кінематичний динамічний вплив. Наприклад, при вібраційних переміщеннях опор балки або іншого осцилятора $\eta(t)$ диференціальне рівняння вимушених коливань має

ВИГЛЯД:

$$m\ddot{y} + r[y - \eta(t)] = 0. \quad (1.18)$$

Закон кінематичного збурення може бути будь-яким, тут отримаємо рішення тільки для випадку гармонійних вібрацій: $\eta(t) = \eta_0 \sin \theta t$. Підставляючи цей вплив і вид рішення типу (1.3) в (1.18), отримаємо після скорочення на $\sin \theta t$:

$$\begin{aligned} -mA\theta^2 + rA &= r\eta_0; \\ (r - m\theta^2) \cdot A &= r\eta_0; \\ A &= \frac{r\eta_0}{r - m\theta^2} = \frac{\eta_0}{1 - (\theta/K)^2} = \eta_0 \cdot \mu \end{aligned} \quad (1.19)$$

Таким чином, графік і вираз для динамічного коефіцієнта при силовому і кінематичному збуренні збігаються, а динамічні переміщення при кінематичному збуренні пропорційні амплітуді дії:

$$y_{дин.} = \mu \cdot \eta_0 \cdot \sin \theta t. \quad (1.20)$$

Графік на рис. 1.8 іноді називають амплітудно-частотною характеристикою (АЧХ) системи з одним ступенем свободи при силовому і кінематичному збуренні, а графік на рис. 1.9 – АЧХ при силі, що збурює, пропорційній квадрату частоти.

РОЗДІЛ 2

СЕЙСМОСТІЙКІСТЬ БУДІВЕЛЬ І СПОРУД

Теорія сейсмостійкості являє собою самостійний розділ динаміки споруд, що характеризується специфічними завданнями і методами досліджень. «Сеймос» в перекладі з грецької мови означає «землетрус».

2.1 Причини виникнення землетрусів

Причини виникнення землетрусів в першу чергу пов'язані з будовою Землі. На рис. 2.1 представлена схема розташування шарів земної кулі.

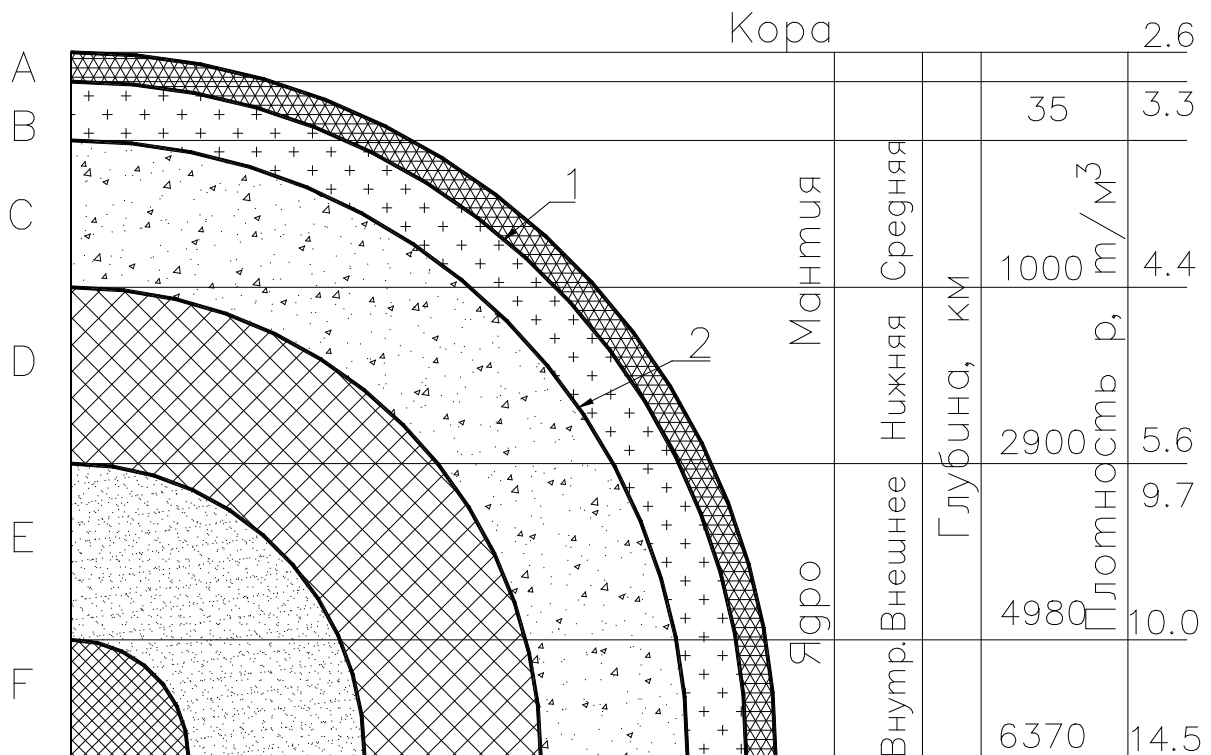


Рисунок 2.1 – Схема розташування шарів земної кулі: А – земна кора; В, С, D – відповідно верхня, середня і нижня мантії; Е, F – відповідно зовнішнє і внутрішнє ядра; 1 – поверхня Мохоровичича; 2 – астеносфера

Самий верхній шар – земна кора – складається з осадових і кристалічних порід. За сейсмічними даними, в континентальній корі можна виділити три шари – осадовий, гранітний і базальтовий. Товщина кори в районі суші становить 35...47 км, в районі океану – 7...10 км.

Під земною корою знаходиться мантия, також складається з декількох шарів. Розрізняють верхню і нижню мантиї. Гранична поверхня між корою і верхньою мантиєю називається поверхнею Мохоровичича. Останнім часом область переходу земної кори в мантию стала іменуватися тектоносферою. У верхній мантиї на глибині 50...100 км є шар зниженої щільності, який іменують астеносферою. На думку фахівців, цей шар, що має товщину до 200 км, на окремих ділянках у вигляді лінз містить розплавлені речовини. Кора і верхня мантия вище астеносфери, що її підстилає, утворюють літосферу.

Центральна частина Землі, що лежить під мантиєю, називається ядром. Розрізняють зовнішнє і внутрішнє ядра. Кордон між ними проходить на глибині близько 5000 км. Зовнішнє ядро рідке, розплавлене, щільність його близько 10 т/м³. Щільність внутрішнього твердого ядра досягає 14,5 т/м³.

Спостереження за поверхнею Землі показують, що вона знаходиться в стані постійного, дуже повільного руху з опусканням поверхні кори в одних і підйомах в інших місцях. Зафіксовані також і горизонтальні рухи. Наука про сили, що викликають ці рухи, називається тектонікою, а самі рухи – тектонічними. У більшості випадків землетрусу є наслідком тектонічного руху земної кори.

Існують декілька гіпотез про причини тектонічних рухів. Найбільш обґрунтованими з них є наступні:

- пульсації гіпотеза, згідно з якою відбуваються поперемінні стиснення і розтягування Землі, що призводить до утворення складчастості при стисненні і розривів при розтягуванні;

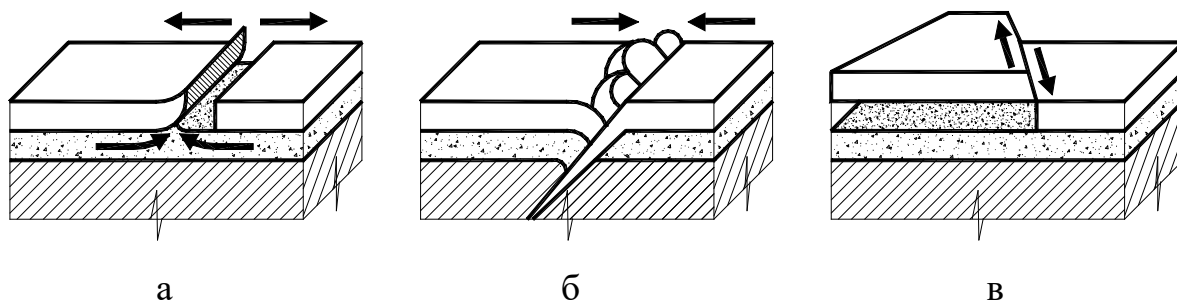
- гіпотеза конвекційних потоків, що припускає переміщення мас усередині Землі внаслідок нерівності температур в речовинах з різною щільністю, що

призводить до пересування континентів і гороутворенню;

- гіпотеза дрейфу материків, або мобілізма, заснована на припущенні, що в далекому минулому існували єдиний океан і єдиний материк, який згодом розділювався на окремі континенти, які відсунулися один від іншого, а утворена відстань заповнилася водою (гіпотеза А. Вегенера);

- гіпотеза тектоніки плит, згідно з якою верхня оболонка Землі (літосфера, що включає в себе кору і підстильний її шар верхньої мантії), разом з розташованими на ній континентами і океанами розділена на кілька величезних плит, які під дією конвекційних потоків переміщуються відносно одна одної, якби плаваючи по розігрітому шару астеносфери (глобальна тектоніка плит).

Типи стиків між плитами показані на рис. 2.2. При відході однієї плити від іншої з розширенням стику (рис. 2.2, а) утворюється хребет шляхом заповнення розплавленою породою ущелини. За такою схемою взаємодіють між собою Євразійська і Північно-Американські плити. Відстань між Лондоном і Нью-Йорком збільшується приблизно на 1 см на рік; між плитами існує океанічний хребет.



- а) розширення стику;
- б) зближення плит;
- в) взаємний зсув плит.

Рисунок 2.2 – Типи стиків між тектонічними плитами

При зближенні плит (рис. 2.2, б), коли одна з них згинається і занурюється

під край іншої, в місці перегину нижньої плити утворюється жолоб – океанічна западина; підйом верхньої плити відповідає формуванню гірських систем. Така схема характерна для взаємодії між собою Євразійської і Індійської плит, а також Євразійської і Африканської. Жолобам відповідають глибоко розташовані осередки сильних землетрусів.

Відзначено також взаємні зсуви плит (рис. 2.2, в), які призводять до тріщин – трансформаційний розломів. Так Анатолійський розлом на півночі Туреччини призводить до великих зрушень суміжних плит (Євразійської і Африканської), тут спостерігається багато землетрусів. Тектонічні плити та їх межі показано на рис. 2.3.

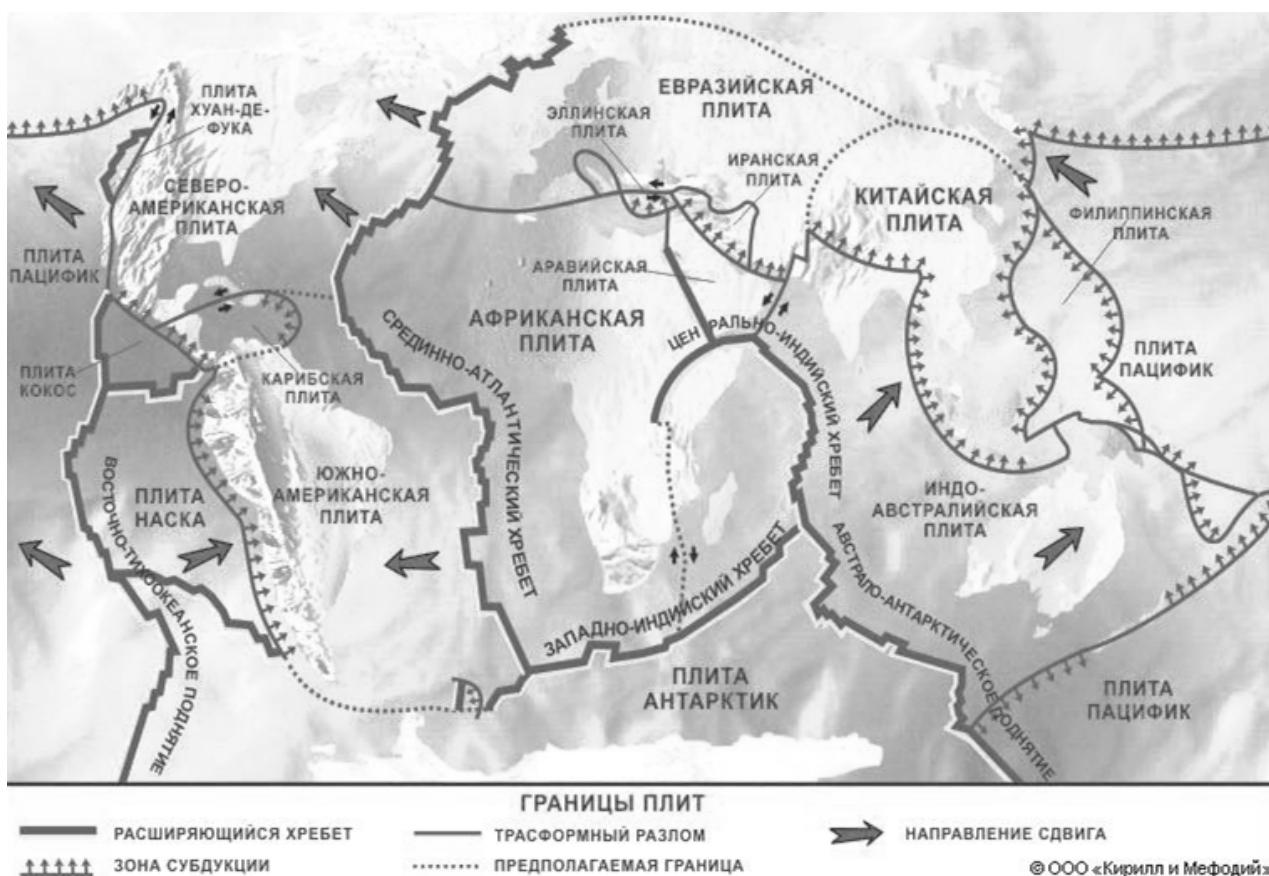


Рисунок 2.3 – Тектонічні плити, їх границі та напрями руху

Так як всі три схеми взаємних рухів плит пов’язані з утворенням осередків землетрусів, то границям плит відповідають області сейсмічних явищ – пояса

сейсмічності. Виділено три групи таких поясів:

- 1) Тихоокеанський;
- 2) Середземноморський;
- 3) другорядні.

До другорядних відносяться Арктичний пояс, Індійський пояс (у західній частині Індійського океану) і Східно-Африканський пояс.

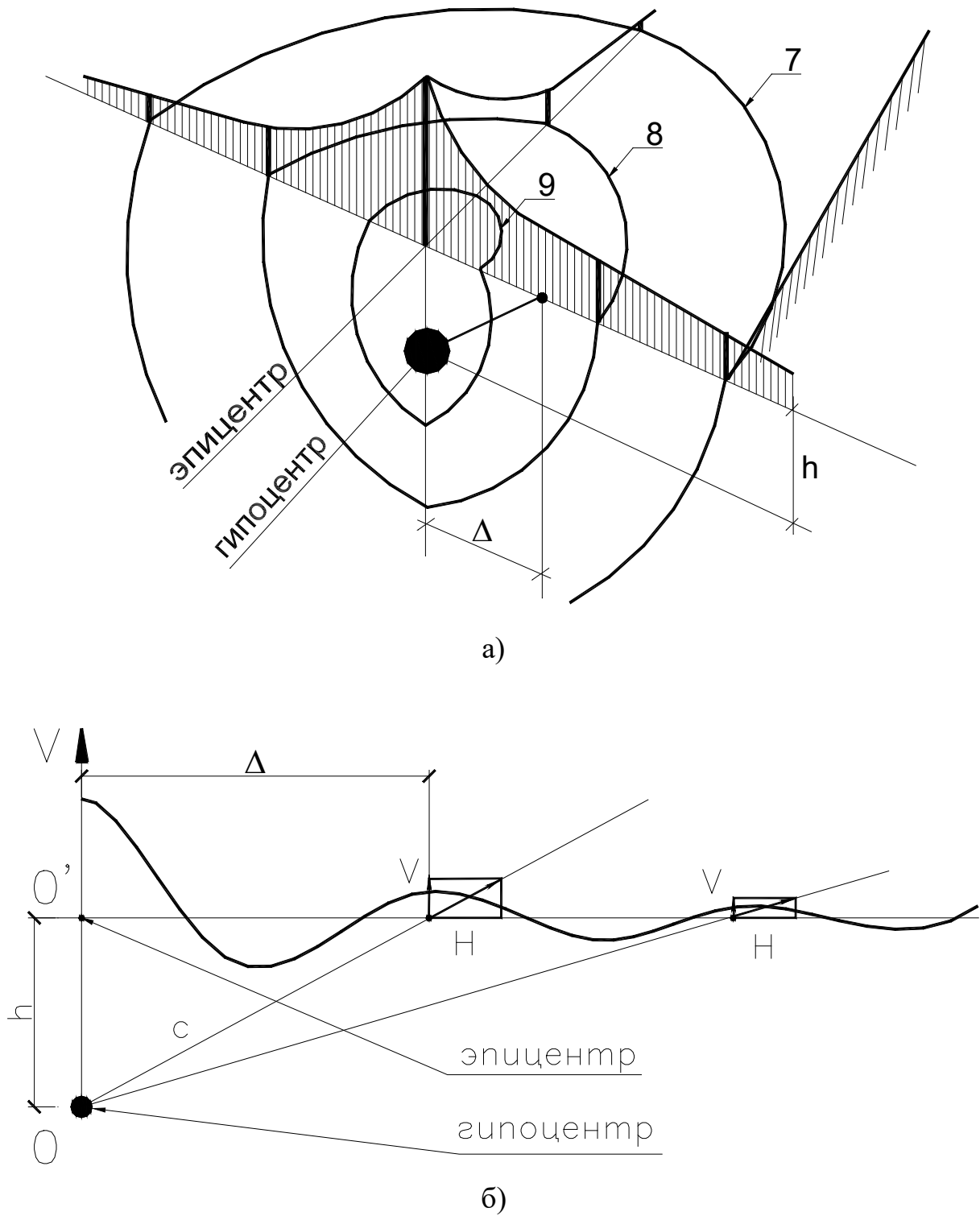
Крім землетрусів тектонічного походження існують дві інші групи землетрусів, що викликаються виверженнями вулканів і карстовими явищами. Ці землетрусу рідкісні і мають невелику силу.

3.2 Загальна характеристика землетрусів

Внаслідок тектонічних рухів в поверхневому шарі Землі відбувається накопичення потенційної енергії, яка в певних ослаблених ділянках переходить у кінетичну, що призводить до скидання або зсуву, тобто до землетрусу. При цьому відбувається розрив земних порід, утворюються великі і малі тріщини, частина яких виходить на поверхню Землі. Розриви і переміщення порід, що складають земну кору, викликають підземні поштовхи, що віддаються на земній поверхні. Кожен такий поштовх народжує сейсмічні хвилі, що досягають найбільшої сили в осередку землетрусу, що називається сейсмічним осередком (див. рис. 2.4, а).

У сейсмічному осередку розрізняють гіпоцентр, тобто глибинну зону, де власне і зароджується землетрус, і епіцентр – область найбільшої сили сейсмічної хвилі на земній поверхні (рис. 2.4, б). Відстань між епіцентром та гіпоцентром характеризує глибину сейсмічного вогнища h (глибину гіпоцентру).

Залежно від глибини осередку землетрусу діляться на:



а) схема осередкової зони;

б) зміна складових руху ґрунту в залежності від видалення їх від епіцентру

Рисунок 2.4 – Розподіл інтенсивності землетрусів

- нормальні – при $h = 0 \dots 70$ км;
- проміжні – при $h = 70 \dots 300$ км;
- глибокофокусні – при $h > 300$ км.

Кожен осередок землетрусу – це область усередині Землі, з якої поширюються пружні хвилі різних типів. Виділено три типи хвиль:

- 1) поздовжні Р-хвилі (від латинського «прима», що означає «перші»);
- 2) поперечні S-хвилі (від латинського «секунда» – «другі»);
- 3) поверхневі L-хвилі (від латинського «лонга» – «довгі»).

Під дією цих хвиль поверхневий шар землі відчуває горизонтальні і вертикальні коливання. На рис. 2.4, б показано зміну руху ґрунту в залежності від відстані до епіцентру.

Вертикальні коливання дуже істотні у зоні епіцентру, проте вже на порівняно невеликій відстані від епіцентру їх значення різко падає, отже в основному доводиться враховувати горизонтальні впливи. Довгий час вважалося, що випадки розташування епіцентру в межах або поблизу поселень рідкісні, і при проектуванні враховувалися тільки горизонтальні коливання. Однак землетруси в Агадирі (Марокко) 1960 року і Ташкенті 1966 року, епіцентри яких розташовувалися в межах міст, спонукали ввести в норми проектування додаткові вимоги щодо врахування вертикальних коливань.

Інтенсивність прояву землетрусів та їх руйнівний ефект в числі інших причин залежать від гіпоцентральної відстані c , яка може бути визначена, згідно рис. 2.4, б, за формулою:

$$c = \sqrt{\Delta^2 + h^2},$$

де Δ – епіцентральна відстань – відстань від точки на поверхні Землі, у якій визначається інтенсивність землетрусу, до епіцентру; h – глибина гіпоцентру.

Для визначення величини енергії, що виділяється в осередку при

землетрусі, американськими дослідниками Ч. Ріхтером і Б. Гутенбергом на початку 40-х років ХХ століття була запропонована умовна характеристика цієї енергії, яка називається магнітудою і знаходиться за формулою:

$$M = \lg A - \lg A_0 = \lg(A / A_0),$$

де A_0 і A – максимальні амплітуди будь-якої хвилі (Р, S або L), заміряні при деякому дуже слабкому (нульовому, еталонному) відомому та усебічно вивченому землетрусі і землетрусі, що розглядається, на деякому віддаленні Δ від епіцентру. При використанні для визначення амплітуд зміщень поверхневих хвиль приймають $\lg A_0 = -1.32 \lg \Delta$ і отримують формулу:

$$M = \lg A + 1.32 \lg \Delta.$$

Ця формула дає можливість знайти значення M за записом зсувів усього однією станцією, знаючи її віддалення Δ від епіцентру. Проте зазвичай M визначають як середнє за даними декількох станцій. Максимальна із зареєстрованих магнітуд знаходиться у межах 8,6...8,8. У табл. 2.1 наведено класифікацію землетрусів за магнітудою та їх середнє число на Землі за 1 рік.

Таблиця 2.1 – Класифікація землетрусів за магнітудою та їх число

Характеристика землетрусів	Магнітуда M	Середня кількість землетрусів на рік n
Катастрофа планетарного масштабу	8	1...2
Сильний, регіонального масштабу	7...8	15...20
Сильний, локального масштабу	6...7	100...150
Середній	5...6	750...1000
Слабкий, місцевий	4...5	5000...7000

Якщо магнітуда землетрусів характеризує відносну силу землетрусів в осередку, то інтенсивність (бальність) I характеризує силу землетрусу на

поверхні землі. Вченим Н. В. Шебалінім запропонована наступна приближена залежність між параметрами M і I (у балах):

$$I = 1.5M - 3.5 \lg \sqrt{\Delta^2 + h^2} + 3,$$

звідки максимальна інтенсивність в епіцентрі (при $\Delta = 0$):

$$I_0 = 1.5M - 3.5 \lg h + 3.$$

Отримана формула показує, що залежно від глибини осередку h одному й тому ж значенню магнітуди M може відповідати різна інтенсивність I .

2.3 Оцінка інтенсивності землетрусів

Як зазначено вище, інтенсивність характеризує силу землетрусу на поверхні землі. Для оцінки сейсмічної інтенсивності багатьма авторами з різних країн було запропоновано близько 50 шкал.

У 1883 році була складена 10-бальна шкала Россі-Фореля, а в 1900 році – 7-бальна шкала Оморі. Ця ж, тільки вдосконалена шкала застосовується в Японії дотепер.

Найбільшого поширення в світі отримала 12-бальна шкала Меркаллі-Конкані-Зіберга (європейська шкала); в Америці використовується модифікована шкала Меркаллі (шкала ММ). Шкали різних країн відрізняються одна від одної за ступенем детальності опису наслідків землетрусів і відображають конструктивні особливості будівель і споруд цих країн.

У колишньому Радянському Союзі з 1952 року використовувалася 12-бальна сейсмічна шкала, розроблена Інститутом фізики Землі Академії Наук СРСР (шкала ІФЗ). Частина цієї шкали, яка становить практичний інтерес для будівельників і охоплює зони від 6 до 9 балів, була затверджена в 1953 році в

якості державного стандарту ГОСТ 6249-52.

Подальше вдосконалення шкала ІФЗ отримала в роботах С. В. Медведева, В. Шпонхойера, В. Карніка (шкала MSK-64).

У 1975 році Інститутом фізики Землі спільно з Центральним Науково-дослідним інститутом будівельних конструкцій (НДІБК) було підготовлено нову редакцію сейсмічної шкали, що містить необхідні доповнення та уточнення. Ця шкала використовується в теперішній час в усіх колишніх радянських республіках, включаючи Україну.

Для характеристики сили землетрусів за сейсмічною шкалою ІФЗ інструментальне та описове визначення використовуються окремо.

Інструментально сила землетрусів в балах визначається:

- за максимальним зміщенням x_0 сферичного пружного маятника сейсмографа, який має період власних коливань 0,25 с і логарифмічний декремент коливань 0,5;

- за максимальною швидкістю коливань ґрунту v_0 , яка визначається за допомогою велосіграфа;

- за максимальним прискоренням коливань ґрунту a_0 , що визначається за допомогою акселерографа.

Співвідношення між показаннями зазначених приладів і інтенсивністю (в балах) наведено в табл. 2.2.

Таблиця 2.2 – Інструментальна частина сейсмічної шкали ІФЗ

Бали	6	7	8	9
x_0 , мм	1,5...3	3,1...6	6,1...12	12,1...24
v_0 , см/с	3...6	6,1...12	12,1...24	24,1...48
a_0 , см/с ²	30...60	61...120	24...240	241...480

Для запису параметрів коливання поверхні ґрунту під час землетрусів у різних країнах встановлено мережу сейсмічних станцій, прилади яких працюють у режимі очікування, тобто автоматично включаються при поштовху не нижче

певної інтенсивності.

Сила землетрусів в пунктах, де відсутні сейсмічні станції, визначається на підставі опису ступеня пошкодження та руйнування будівель, зведених без антисейсмічних заходів.

При описанні пошкоджень будівель і споруд від землетрусів розрізняють такі типи будівель:

- тип А – зі стінами із рваного каменю, з цегли-сирцю, глинобитними;
- тип Б – зі стінами з обпаленої цегли, з природних і бетонних крупних блоків і дрібних каменів правильної форми;
- тип В – крупнопанельні, зі сталевим та залізобетонним каркасом, дерев'яні.

Ступені пошкодження класифіковані наступним чином:

I – легкі ушкодження – невеликі тріщини в стінах, відколювання невеликих шматків штукатурки;

II – помірні пошкодження – невеликі тріщини в стиках між панелями, відколювання досить великих шматків штукатурки, падіння черепиці з дахів;

III – важкі ушкодження – великі глибокі і наскрізні тріщини в стінах, значні тріщини в стиках між панелями;

IV – руйнування – обвалення внутрішніх стін і стін заповнення каркаса, проломи у стінах, обвалення частин будівель, руйнування зв'язків між окремими частинами будівлі;

V – обвали – повне руйнування будівель.

За кількістю пошкоджень будівлі пошкодження діляться на «більшість» (близько 70%), «багато» (близько 50%) і «окремі» (близько 10%).

Опис наслідків землетрусів диференційовано за сейсмічною шкалою за трьома розділами:

- характеристика пошкоджень будівель і споруд;
- залишкові деформації в ґрунтах і скельних породах;
- інші ознаки.

У табл. 2.3 наведені деякі описові ознаки пошкоджень будівель і залишкових деформацій в ґрунтах при сейсмічності 6, 7, 8 і 9 балів.

Таблиця 2.3 – Описова частина сейсмічної шкали ІФЗ

Бали	Характеристика пошкодження будівель та інших споруд	Залишкові деформації в ґрунтах і скельних породах
6	Пошкодження I ступеня в окремих будівлях типу Б і в багатьох типу А. Пошкодження II ступеня в окремих будівлях типу А	У небагатьох випадках – зсуви, на сирих ґрунтах можливі видимі тріщини шириною до 1 см. В гірських районах – окремі зсуви, можливі зміни дебіту джерел та рівня вод в колодязях
7	У багатьох будівлях типу В ушкодження I ступеня і в окремих – II. У багатьох будівлях типу Б – II ступеня і в окремих – III. У багатьох будівлях типу А – III ступеня і в окремих – IV. Тріщини в кам'яних огорожах	В окремих випадках – зсуви і тріщини на дорогах. Порушення стиків трубопроводів. У небагатьох випадках виникають або пропадають існуючі джерела води
8	У багатьох будівлях типу В ушкодження II ступеня і в окремих – III. У багатьох будівлях типу Б – III і в окремих – IV. У багатьох будівлях типу А – IV і в окремих – V ступеня. Пам'ятники та статуї зсуваються. Кам'яні огорожі руйнуються	Невеликі зсуви на великих укосах виїмок і насипів доріг, тріщини в ґрунтах досягають декількох сантиметрів. Можливе виникнення нових водойм. Іноді пересохлі колодязі наповнюються водою або існуючі вичерпуються
9	У багатьох будівлях типу В ушкодження III ступеня і в окремих – IV. У багатьох будівлях типу Б – IV ступеня і в окремих – V. У більшості будівель типу А – V ступеня. Пам'ятники і колони перекидаються	Значні пошкодження берегів штучних водойм, розриви частин підземних трубопроводів. В окремих випадках – викривлення рейок. Тріщини в ґрунтах до 10 см, а по схилах і берегах – більше 10 см. Часті зсуви і осипання ґрунтів, обвали гірських порід

Проектування будівель в сейсмічних районах з 7-, 8- та 9-бальною

інтенсивністю повинно здійснюватися з урахуванням вимог антисейсмічного будівництва. При інтенсивності 6 балів і менше пошкодження звичайних будинків малі, тому для таких умов проектування повинно здійснюватися без урахування сейсмічної небезпеки. При 10-бальних і більш інтенсивних землетрусах звичайні заходи сейсмічного захисту виявляються недостатніми; в таких районах будівництво не передбачено або повинно відбуватися за спеціальними дозволами зі всебічним обґрунтуванням.

2.4 Сейсмічне районування, вплив ґрунтових умов

Розподіл території країни на регіони, що відрізняються за очікуваною величиною інтенсивності сейсмічного впливу, називається сейсмічним районуванням. Сейсмічне районування ґрунтується на матеріалах минулих землетрусів, і як правило передбачає побудову карт прогнозу сейсмічності та величин сейсмічних впливів.

На карті сейсморайонування за допомогою ізосейм виділяються райони, в яких в умовах середніх ґрунтів можуть бути струси на поверхні землі, відповідні 6, 7, 8 або 9 балам за сейсмічною шкалою.

При проектуванні будівель і споруд інтенсивність сейсмічних дій у балах для певного району будівництва належить приймати на основі списку населених пунктів України і комплекту карт загального сейсмічного районування (ЗСР) території України, отриманих у 2004 році Інститутом геофізики НАН України і Кримською експертною радою з оцінки сейсмічної небезпеки та прогнозу землетрусів. Список населених пунктів і карти наведені в додатках до [10].

Комплект включає карти ЗСР А, В і С – для всієї території України у масштабі 1:2500000, а також детальні карти ЗСР А0, А, В і С для територій Криму та Одеської області у масштабі 1:1000000 (врізання до карт ЗСР).

Зазначена на картах сейсмічна інтенсивність відноситься до ділянок із

середніми за сейсмічними властивостями ґрунтами (II категорії згідно з табл. 2.4). Комплект карт ЗСР території України складається з трьох карт.

Карта А відповідає 10%-й імовірності перевищення розрахункової сейсмічної інтенсивності протягом 50 років і середнім періодам повторення такої інтенсивності один раз на 500 років. Карту належить застосовувати для проектування об'єктів масового цивільного, промислового призначення, різноманітних житлових об'єктів у міській та сільській місцевості.

Карта В відповідає 5%-й імовірності перевищення розрахункової сейсмічної інтенсивності протягом 50 років і середнім періодам повторення такої інтенсивності один раз на 1000 років. Карту належить застосовувати для проектування та будівництва споруд підвищеного рівня відповідальності, що мають коефіцієнт надійності за відповідальністю не менше 1,1, пошкодження або руйнування яких при впливі землетрусу може спричинити надзвичайну ситуацію регіонального рівня.

Карта С відповідає 1%-й імовірності перевищення розрахункової сейсмічної інтенсивності протягом 50 років і середнім періодам повторення такої інтенсивності один раз на 5000 років. Карту належить застосовувати при проектуванні особливо відповідальних об'єктів, що мають коефіцієнт надійності за відповідальністю не менше 1,2, пошкодження або руйнування яких при впливі землетрусу може спричинити надзвичайну ситуацію державного рівня.

Детальна карта А0 відповідає 39%-й імовірності перевищення розрахункової сейсмічної інтенсивності протягом 50 років і середнім періодам повторення такої інтенсивності один раз на 100 років. Відповідні карти належить застосовувати для проектування тільки в Криму і Одеській області для маловідповідальних будівель. Аналогічні об'єкти на інших територіях України проектуються з використанням карти А для території України.

Сейсмічну інтенсивність майданчика будівництва належить визначати з урахуванням результатів сейсмічного мікрорайонування (СМР), яке виконується для районів із сейсмічністю 6 і більше балів відповідно до складу робіт згідно з

нормативними документами на інженерні вишукування для будівництва (для різноманітних об'єктів сейсмічного мікрорайонування).

Таблиця 2.4 – Сейсмічність майданчика будівництва в залежності від ґрунту

Категорія ґрунту за сейсмічними властивостями	Ґрунти	Сейсмічність майданчика будівництва при сейсмічності району, балів				Швидкості розповсюдження сейсмічних хвиль у ґрунті v_s м/с
		6	7	8	9	
I	Скельні ґрунти усіх видів невивітрілі та слабовивітрілі; великоуламкові ґрунти щільні, маловологі з магматичних порід, які вміщують до 30% піщано-глинистого заповнювача	5	6	7	8	$v_s > 800$
II	Скельні ґрунти вивітрілі та сильновивітрілі; великоуламкові ґрунти за винятком віднесених до I категорії; піски гравелисті, крупні та середньої крупності щільні та середньої щільності маловологі та вологі; піски дрібні та пилюваті щільні та середньої щільності маловологі	6	7	8	9	$500 < v_s < 800$
III	Піски крихкі незалежно від ступеня вологості та крупності; піски гравелисті, крупні та середньої крупності щільні та середньої щільності водонасичені; піски дрібні та пилюваті щільні та середньої щільності вологі та водонасичені	7	8	9	10	$200 < v_s < 500$
IV	Піски крихкі водонасичені, схильні до розрідження; насипні ґрунти; пливуні, біогенні ґрунти та намули	за результатами спеціальних досліджень				$v_s < 200$

У випадку неоднорідного складу ґрунти майданчика будівництва відносяться до найбільш несприятливої категорії ґрунту. У разі прогнозування підйому рівня ґрунтових вод або обводнення ґрунтів у процесі експлуатації будівлі категорії ґрунту належить визначати в залежності від властивостей ґрунту (ступеня вологості, показника текучості) у замоченому стані.

У звітах про інженерно-геологічні вишукування слід зазначати категорію ґрунту за сейсмічними властивостями.

У разі відсутності карт сейсмічного мікрорайонування для об'єктів масового цивільного, промислового і сільського будівництва допускається спрощене визначення сейсмічності майданчика будівництва на основі матеріалів інженерно-геологічних вишукувань згідно з табл. 2.4.

Проектування будівель і споруд для будівництва на майданчиках за наявності в основі будівлі просідаючих ґрунтів належить здійснювати з урахуванням вимог [18].

Вибір конструктивно-планувальних рішень будівель і споруд, а також призначення складу та обсягу захисних заходів, які забезпечують міцність та експлуатаційну придатність об'єктів, повинні здійснюватись виходячи із розрахункової сейсмічності майданчика будівництва, потужності просідаючої товщі, прогнозу замочування ґрунтів основ у межах усієї або частини просідаючої товщі та очікуваної величини просідання ґрунтів основ.

Розрахунок будівель і споруд на сейсмічні дії та впливи, що зумовлені деформаціями основи при замочуванні просідаючих ґрунтів, належить виконувати на основі просторових розрахункових моделей.

Без достатнього обґрунтування не слід розташовувати споруди на ділянках, несприятливих у сейсмічному відношенні, до яких відносяться наступні майданчики будівництва:

- розташовані в зонах можливого прояву тектонічних розломів на поверхні;
- з осипами, обвалами, зсувами, карстом, гірничими виробками;
- з крутістю схилів більше 15°;
- розташовані в зонах можливого проходження селевих потоків;
- розташовані на цунамінебезпечних ділянках;
- складені ґрунтами IV категорії за сейсмічними властивостями.

На майданчиках сейсмічністю 9 балів із несприятливими ґрунтовими

умовами, а також на грунтах IV категорії не допускається багатопверхова житлова забудова, будівництво промислових підприємств і енергетичних об'єктів, не пов'язаних з обслуговуванням населення, яке проживає у даній місцевості, а також будівництво об'єктів, де можливе велике скупчення людей (шкіл, дитячих садків, лікарень, торговельних центрів, театрів, кінотеатрів). На цих майданчиках допускається розташовувати загальноміські зони відпочинку, зелені масиви, складські приміщення, автобази, гаражі, ремонтні майстерні, тимчасові сільськогосподарські, виробничі та інші одноповерхові приміщення.

2.5 Інженерно-сейсмометричні спостереження і паспортизація об'єктів

З метою одержання достовірної інформації про роботу конструкцій при землетрусах і коливаннях прилеглих до будівель грунтів у проектах характерних основних типів будівель масової забудови, будівель із принципово новими конструктивними рішеннями, а також особливо відповідальних споруд належить передбачати розміщення станцій інженерно-сейсмометричної служби (ІСС).

Обов'язкове встановлення станцій ІСС повинно передбачатись на об'єктах заввишки понад 70 м і відповідальних будівлях і спорудах, а також на об'єктах експериментального будівництва.

Витрати на придбання сейсмометричної апаратури, а також на виконання проектних і будівельно-монтажних робіт щодо її встановлення повинні передбачатись в кошторисах на будівництво об'єктів, а експлуатаційні витрати – у бюджетах місцевих органів самоуправління сейсмонебезпечних районів.

Паспортизація об'єктів після закінчення будівництва, а також обстеження та паспортизація існуючих об'єктів повинні виконуватись у відповідності з чинними нормативними документами з оцінки технічного стану і паспортизації промислових і цивільних будівель і споруд, які експлуатуються у сейсмічних районах. Паспорт повинен містити обґрунтовані дані щодо застосування карти

ЗСР-2004 з урахуванням діючих стандартів та вимог чинного законодавства щодо об'єктів підвищеної небезпеки.

Динамічна паспортизація вказаних будівель і споруд повинна виконуватись акредитованими лабораторіями, які оснащені необхідним обладнанням і сейсмометричною апаратурою. Динамічна паспортизація включає наступні види робіт:

- визначення реакції будівель на спеціальні динамічні дії в частотному діапазоні хвиль від 0,2 Гц до 40 Гц;

- визначення частот, форм власних коливань будівель і декрементів коливань та їх порівняння із проектними даними;

- формування динамічного паспорта будівлі на основі періодичних динамічних обстежень, а також у обов'язковому порядку при обстеженнях після того, як відбулися землетруси інтенсивності 6 балів і вище.

Динамічна паспортизація для будівель і споруд, як правило, здійснюється для особливо відповідальних та унікальних споруд, будівель з одночасним перебуванням великої кількості людей, а також для корпусів теплоелектроцентралей, доменних печей, резервуарів для нафтопродуктів, житлових і цивільних будівель вище 16 поверхів, а також гідротехнічних споруд.