

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ОДЕСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ імені І. І. МЕЧНИКОВА
ФАКУЛЬТЕТ ГІДРОМЕТЕОРОЛОГІЇ І ЕКОЛОГІЇ

**ФІЗИЧНІ ПРИНЦИПИ В ТЕХНОЛОГІЯХ
ЗАХИСТУ НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА**

НАВЧАЛЬНИЙ ПОСІБНИК

для здобувачів освіти факультету гідрометеорології і екології
спеціальності 183 Технології захисту навколишнього середовища

ОДЕСА
ОНУ
2025

УДК 53-029:6:502/504(075.8)
Ф505

Укладачі:

О. І. Герасимов, доктор фізико-математичних наук, професор кафедри екології та охорони довкілля;

В. В. Курятников, кандидат фізико-математичних наук, доцент кафедри екології та охорони довкілля;

А. Я. Співак, кандидат фізико-математичних наук, старший викладач кафедри екології та охорони довкілля;

Л. М. Сідлецька, завідувачка лабораторії радіоекології кафедри екології та охорони довкілля.

Рецензенти:

О. С. Тітлов, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри нафтогазових технологій, інженерії та теплоенергетики Одеського національного технологічного університету;

В. І. Скалозубов, доктор технічних наук, професор кафедри атомних електростанцій Національного університету «Одеська політехніка».

*Рекомендовано до видання вченою радою
ОНУ імені І. І. Мечникова
Протокол № 12 від 20 червня 2025 р.*

Фізичні принципи в технологіях захисту навколишнього
Ф505 середовища [Електронний ресурс] : навч. посіб. для здобувачів освіти ф-ту гідрометеорології і екології спец. 183 Технології захисту навколишнього середовища / уклад.: О. І. Герасимов, В. В. Курятников, А. Я. Співак, Л. М. Сідлецька. – Електронні текстові дані (1 файл : 2,4 МБ). – Одеса : Одес. нац. ун-т ім. І. І. Мечникова, 2025. – 152 с.

ISBN 978-966-186-362-9

В навчальному посібнику наведені теоретичні відомості щодо застосування фізичних принципів в технологіях захисту навколишнього середовища, зокрема, в задачах очищення об'єктів довкілля від небезпечних забруднень та випромінювань, в задачах утилізації та дезактивації відходів, в теплоенергетичних та енергозберігаючих технологіях.

Навчальний посібник складено відповідно з програмою спеціального семінару «Фізичні принципи в технологіях захисту навколишнього середовища» та призначений для студентів бакалаврського рівня вищої освіти спеціальності «Технології захисту навколишнього середовища», а також може використовуватися магістрами та аспірантами, що прагнуть опанувати професію у сфері захисту навколишнього середовища.

УДК 53-029:6:502/504(075.8)

ISBN 978-966-186-362-9

© Герасимов О. І., Курятников В. В.,
Співак А. Я., Сідлецька Л. М., 2025
© Одеський національний університет
імені І. І. Мечникова, 2025

ЗМІСТ

	Вступ.	5
<i>Розділ 1</i>	Фізико-хімічні процеси в атмосфері. Фізичні механізми осадження дисперсних частинок	7
	1.1 Термодинамічні процеси в атмосфері	8
	1.2 Технології очищення атмосферного повітря від забруднень та їх вплив на довкілля	15
<i>Розділ 2</i>	Фізико-хімічні процеси у гідросфері та ґрунтах. Фізичні методи та технології очищення водних об'єктів природного середовища та ґрунтів.	43
	2.1 Відстоювання стічних вод	44
	2.2 Фільтрування осадів стічних вод.	49
	2.3 Конвективно - дифузійний механізм поширення домішок у водному середовищі.	50
	2.4 Знешкодження мінералізованих стоків. Методи захисту літосфери.	53
<i>Розділ 3</i>	Вібрації, їх оцінювання та нормування. Захист елементів довкілля від механічних і акустичних коливань.	71
<i>Розділ 4</i>	Електромагнітне випромінювання. Вплив та нормування. (Енергетичне забруднення довкілля. Небезпечні випромінювання).	87
	4.1 Захист елементів довкілля від електромагнітних полів і випромінювань.	88
	4.2 Захист інформаційних та інформаційно - комунікаційних систем та мереж як елементів довкілля від впливу зовнішніх сил, у тому числі ЕМ-випромінювань.	91

<i>Розділ 5</i>	Захист від іонізуючих випромінювань.	99
	5.1 Проходження іонізуючого випромінювання крізь речовину.	101
	5.2 Екранування небезпечних енергетичних випромінювань.	102
	5.3 Дози радіації та дозові навантаження. Міграція радіонуклідів.	107
	Додатки.	132
	Додаток А.	132
	Додаток Б.	144
	Список використаної та рекомендованої літератури.	148

ВСТУП

Вміння та здатність студентів застосовувати фізичні закони та принципи у своїй практичній діяльності, а саме в технологіях захисту навколишнього середовища є важливим етапом професійної підготовки здобувачів вищої освіти бакалаврського рівня, що має на меті формування професійних компетентностей щодо здійснення освітнього процесу у закладах вищої освіти.

Метою цього посібника є надання студентам знань, розвиток їх вмінь і навичок використання фізичних законів та дослідницьких методів у їх практичній діяльності для вирішення задач у сфері технологій захисту довкілля. Представлений посібник покликаний допомогти студентам спеціальності "Технології захисту навколишнього середовища" в практичній діяльності під час вивчення ОК Спеціальний семінар з "Технологій захисту навколишнього середовища".

У технологіях очищення об'єктів довкілля від різноманітних забруднень, таких як захист від небезпечних енергетичних випромінювань, утилізація та дезактивація відходів, а також у теплоенергетичних та енергозберігаючих технологіях, відбуваються фізичні процеси переносу енергії (тепла), маси, електричного заряду, які аналізуються в деяких розділах спеціального семінару з Технологій захисту навколишнього середовища.

Розділи практичного модуля, відповідно до робочої програми спеціального семінару "Фізичні принципи в технологіях захисту довкілля":

1. Фізико-хімічні процеси в атмосфері. Фізичні механізми осадження частинок.
2. Фізико-хімічні процеси у гідросфері та ґрунтах.
3. Вібрації, їх оцінювання та нормування. Захист від впливу вібрацій.
4. Електромагнітне випромінювання. Вплив та нормування.
5. Захист від іонізуючих випромінювань. Методики розрахунку захисту.

Вивчення цих розділів допомагає студентам отримати *вміння*:

- застосовувати базові фізичні принципи та закони для розуміння комплексних фізичних явищ, оцінки та передбачення наслідків впливу зовнішніх чинників з метою вибору адекватних заходів для безпеки довкілля;
- аргументувати та використовувати природні (безпечні) та штучні системи й процеси, що лежать в основі природоохоронних технологій, керуючись екологічним імперативом та концепцією сталого розвитку.

РОЗДІЛ 1

ФІЗИКО-ХІМІЧНІ ПРОЦЕСИ В АТМОСФЕРІ. ФІЗИЧНІ МЕХАНІЗМИ ОСАДЖЕННЯ ДИСПЕРСНИХ ЧАСТИНОК

Вивчення теми пов'язане зі створенням необхідних основ для розуміння фізичної та фізико-хімічної сутності технологічних процесів захисту навколишнього середовища. При вивченні теми потрібно звернути увагу на основні обставини, якими визначається вплив людини на природу та джерела зростаючого негативного впливу людської діяльності на біосферу (область активного життя в межах земної оболонки, включаючи нижню атмосферу, гідросферу і верхню літосферу, де живуть живі організми). Надзвичайна вага охорони атмосфери витікає з її впливу на сутність і перебіг усіх екзогенних процесів у літосфері (руйнування порід, напрямки вітру, наявність природних вод, мерзлота та інше), а також гідросфері (водний баланс, режим поверхневих та підземних вод і акваторій). Викиди в атмосферу із джерел, які пов'язані із промисловою діяльністю, класифікуються за агрегатним станом (газоподібні, рідкі, тверді); за хімічним складом; за розміром частинок; за масою речовини викиду. Промислові викиди поділяються на дві основні групи: парогазові; аерозольні. Парогазові викиди – суміш газів (парів), що не несе в собі тверді або рідкі завислі частинки. Аерозольні викиди – суміш газів (парів), що несе в собі тверді або рідкі завислі частинки.

При вивченні теми необхідно:

- засвоїти основні фізичні механізми осадження частинок та очистки газових викидів;
- сутність та закономірності фізичних процесів, які лежать в основі цих механізмів;
- проаналізувати ефективність кожного з методів в залежності від розміру частинок, швидкості та режиму течії газу;

- розглянути безрозмірні параметри, які дозволяють в рамках методу теорії подібності оцінити ефективність осадження частинок у випадку використання сумісних механізмів осадження;
- розглянути роботу пиловловлювачів, яка заснована на використанні одного або декількох механізмів для осадження завислих в газі частинок: гравітаційної седиментації, відцентрового, інерційного, дифузійного осадження, електричного очищення газів від пилу;
- розглянути механізм електричного очищення газів від пилу, який є одним з найбільш ефективних видів очищення газу від дрібнодисперсних твердих та рідких аерозолів.

1.1 Термодинамічні процеси в атмосфері

Атмосфера – це газова оболонка, що огортає Землю. Вона утворена сумішшю газів різного походження та віку. Основу повітря сучасної атмосфери складають азот (78,09 % за об'ємом) і кисень (20,95 %), а також незначна кількість аргону (~1 %), вуглекислого газу (~0,03 %), водню та інших газів. У верхніх шарах атмосфери переважають легкі гази, такі як гелій і водень. Первісна атмосфера мала зовсім інший склад, ніж сучасна. Вона складалася з суміші водню, метану, аміаку, водяної пари та інших газів. Усі гази первинної атмосфери, які увійшли до складу сучасної, виділялися із глибин Землі поступово, протягом тривалого часу.

Поступово густина первинної атмосфери зростала в результаті безперервної дегазації земних надр. Переважна частина водяної пари конденсувалась і випадала на поверхню Землі.

Приблизно 3,5 мільярда років тому атмосфера була азотно-аміачно-вуглекислою, з вмістом CO_2 близько 50-60 %. З часом у земній атмосфері почав домінувати азот (N_2) і збільшуватися вміст кисню. Близько 200 мільйонів років тому сформувалась сучасна вторинна атмосфера, де переважає азот. Кисень накопичувався в результаті фотосинтезу, що привело

до зміни первісного складу атмосфери.

На поверхні Землі густина повітря приблизно становить $\rho \approx 1,24-1,30 \text{ кг/м}^3$. Зі збільшенням висоти значення ρ зменшується, поступово наближаючись до густини міжпланетного середовища на висоті 60-70 тис. км над поверхнею Землі. Крім густини, важливими характеристиками фізичного стану атмосфери є атмосферний тиск, температура та вологість повітря. Усі ці параметри змінюються як по вертикалі, так і по горизонталі, проте найбільш помітні зміни спостерігаються у вертикальному напрямку. Виділяють кілька шарів атмосфери: тропосфера, стратосфера, мезосфера, термосфера та екзосфера. Температура повітря в нижніх шарах атмосфери знижується з висотою, у середньому на 6°C на кожний 1 км (вертикальний градієнт температури). У горизонтальному напрямку температура змінюється на 6°C лише на відстані 500-600 км. Атмосферний тиск у повітряній оболонці знижується на 1 мм рт. ст. на кожні 10 м підйому. Земля, як планета, постійно обмінюється енергією з Сонцем і Космосом, а три її оболонки — атмосфера, гідросфера та літосфера – обмінюються між собою ще й імпульсом та речовиною.

Отже, всі оболонки Землі є відкритими термодинамічними системами, де йдуть нерівноважні процеси перенесення тепла і перетворення одного виду енергії в інший. В основі термодинаміки лежать два закони: перший закон є законом збереження енергії, а другий - законом про спрямування фізичних процесів (закон про ентропію).

Рівняння стану

Відомо, що сухе повітря і водяна пара в області температур і тисків, близьких до нормальних, ведуть себе як ідеальний газ. Середня молекулярна маса повітря дорівнює $\mu = 29 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}$, а водяної пари – $\mu_v = 18 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}$. Рівняння стану для газу маси m , що міститься в об'ємі V , запишеться у вигляді

$$PV = j R T, \quad (1.1)$$

де p – тиск, $j = \frac{m}{\mu}$ – кількість молів, μ – молярна маса, $R = 8,31$ Дж / (моль К) – універсальна (молярна) газова постійна, T – абсолютна температура

Перший закон термодинаміки

Закон збереження енергії для одиничної маси газу записується у вигляді

$$\delta Q = dU + \delta A, \quad (1.2)$$

де δQ – мала кількість тепла, що підводиться до системи, dU – внутрішня енергія системи, $\delta A = p dv$ – виконана над газом елементарна механічна робота.

Для ідеального газу, де не враховується взаємодія між молекулами, будь-яке збільшення внутрішньої енергії проявляється як підвищення температури. Якщо газу надати малу кількість тепла δQ , це призведе до малого збільшення температури dT , що можна записати як

$$c \cdot dT = \delta Q, \quad (1.3)$$

де c – питома теплоємність, вимірювана в Дж/ (кг • К).

Величина теплоємності газу залежить від того, чи відбувається робота при підведенні тепла, чи ні. Тому розрізняють теплоємність при постійному об'ємі ($dv = 0$ – роботи немає) та при постійному тиску ($p dv = A$), коли здійснюється робота. У першому випадку $c_v = (\delta Q/dT)_v = dU/dT$, а в другому $c_p = (\delta Q/dT)_p = (dU + p dv)/dT$. Для сухого повітря $c_p = 1005$ Дж/(кг•К) та $c_v = 716$ Дж/(кг•К). Природно, що $c_p > c_v$, оскільки у процесі при $p = \text{const}$ частина тепла буде витрачена як збільшення внутрішньої енергії газу та виконання роботи проти зовнішніх сил (розширення). Використовуючи отримане співвідношення $dU = c_v \cdot dT$, рівняння збереження енергії (1.2) запишемо у формі

$$\delta Q = c_v dT + p dv. \quad (1.4)$$

Для отримання зручної форми запису рівняння балансу про диференціюємо за температурою рівняння стану (1.1) і отримаємо

$$p dv + v dp = R_a dT. \quad (1.5)$$

Підставляючи в (1.5) значення $p dv$ із (1.4), остаточно отримаємо

$$\delta Q = c_p \cdot dT - v dp. \quad (1.6)$$

Це інший вираз першого початку термодинаміки. Отримані висновки дають змогу визначити окремі процеси, що мають місце в атмосфері (моделі атмосфери).

Вивчаючи тему і розпочинаючи вивчення термодинаміки атмосфери з 1-го закону, потрібно розуміти, що йдеться про одне з формулювань закону збереження енергії.

Важливим є питання стратифікації атмосфери. Стратифікація атмосфери – це розподіл температури в різних шарах атмосфери по висоті. По відношенню до сухого (або вологого ненасиченого) та насиченого повітря стратифікація атмосфери може бути стійкою, нестійкою та байдужою. При стійкій стратифікації атмосфери вертикальний градієнт температури менше адіабатичного (сухо- або волого адіабатичного, дивлячись за умовами вологості), при нестійкій – більше адіабатичного, при байдужій – дорівнює адіабатичному. Нестійка стратифікація атмосфери підтримує вертикальні рухи в атмосфері та є умовою розвитку конвекції. Стійка стратифікація атмосфери перешкоджає вертикальному руху та пов'язаному з ними розвитку хмар. Найпростішим процесом в термодинаміці є адіабатичний, коли частинка повітря, що вивчається, переміщується без теплообміну з середовищем, що її оточує. У такому разі зміна теплоємності зазначеної частинки взаємопов'язана винятково з подоланням нею маршрутом вгору ($dz > 0$, тобто $dP < 0$) чи вниз ($dz < 0$ та $dP > 0$). Ключовим залишається питання температури, яку набере об'єм сухого повітря або повітря з ненасиченою парою під час адіабатичного руху. Слід врахувати, що при сухоадіабатичному підйомі порції повітря вгору виконується робота розширення, що відбувається за рахунок внутрішньої енергії, тому відбудеться зниження температури цієї порції.

Навпаки, при опусканні об'єму повітря відбувається перехід роботи стиснення у внутрішню енергію, і об'єм, що опускається, нагрівається. Зміни

температури об'єму повітря при сухадіабатичних процесах характеризуються рівнянням Пуассона:

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{0,286}. \quad (1.7)$$

В приземному шарі атмосфери теплові умови суттєво впливають на його рухливість. Вони є підґрунтям для його тимчасових та просторових змін. Теоретичні моделі, що базуються на рівняннях теплопровідності (рівняння притоку тепла), рівняннях стану ідеального газу, рівняннях дифузії водяної пари, становлять основу теорії аналізу процесів, що відбуваються в приземному шарі.

Моделюються такі явища як добовий перебіг атмосферних параметрів, бризи, вплив неоднорідностей підстилаючої поверхні, орографічні ефекти (гірничо-долинні вітри, льодовикові вітри, місцеві вітри : фени, бори та інше), адвективні тумани .

Дослідження впливу температурного розподілу на турбулентні потоки використовуються у моделюванні процесу розсіювання забруднюючих речовин в атмосфері.

Термодинамічні процеси відіграють визначальну роль у виникненні тропічного циклону (тайфуну). Зазвичай, формування урагану зумовлене функціонуванням атмосферної теплової машини, де повітря нагрівається через теплообмін з поверхнею океану. Температура поверхні океану становить близько 300 К. Внаслідок конвекції повітря піднімається вгору над поверхнею та охолоджується до температури близько 200 К. На певній висоті температура повітря припиняє знижуватися і далі, з підйомом вгору, починає зростати. Ця межа визначається як тропопауза. Шар атмосфери над нею – це стратосфера, тоді як тропосфера – нижній шар.

У цьому процесі важливе значення мають фазові переходи води. На поверхні океану відбувається активне випаровування. Тепле повітря при підйомі розширюється та охолоджується. Досягнувши точки роси, водяна пара конденсується, утворюючи хмари та сильні опади. Виділення

прихованої теплоти при конденсації забезпечує притік енергії, яка підтримує механічну енергію урагану.

Ізотермічні процеси в атмосфері. Барометрична формула

У полі сили тяжіння тиск атмосфери, її температура та щільність з висотою знижуються. Однак вертикальна зміна температури в тропосфері становить менше 10 % нормального значення на рівні океану. Це дає основу при вирішенні великого класу задач рахувати розподіл температури з висотою ізотермічним ($T = \text{const}$). У цьому випадку з рівняння стану отримаємо диференціальне рівняння, розв'язком якого є барометрична формула Больцмана.

$$p = p_0 \cdot e^{-\frac{\mu g h}{RT}} \quad (1.8)$$

Тут p_0 – тиск на рівні моря. Для $T = 288 \text{ K}$ $P_0 = 0,101 \text{ МПа/м}^2$. Висота однорідної атмосфери приблизно 8 км.

Розподіл густини по висоті має такий самий вигляд, як для тиску.

Якщо питомий об'єм (відповідно щільність) постійний за висотою, настає байдужа рівновага. Сили, що викликають конвекцію, будуть при $v = \text{const}$ рівні нулю.

Адіабатичні процеси в атмосфері

Модель адіабатичних процесів має найширше застосування у фізиці атмосфери. При вертикальному переміщенні частинки повітря через низьку теплопровідність повітря можна вважати теплоізованими. Отже, $\delta Q = 0$ і рівняння балансу енергії (1.6) набуде вигляду

$$c_p dT = v dp.$$

Підставляючи значення питомого об'єму з рівняння стану, отримаємо вираз

$$c_p dT = (dp/p) R_a T \quad (1.9)$$

Це рівняння Пуассона. Воно встановлює залежність температури від тиску при адіабатичному процесі.

Густина повітря істотно залежить від температури та тиску, і незначно від наявності водяної пари (через малі її концентрації).

Якщо знехтувати останнім фактором, то на заданому (фіксованому) рівні густина повітря буде функцією лише температури. Отже, розподіл температури по висоті (або як кажуть, стратифікація) визначає умови рівноваги в атмосфері. Ці умови можуть бути сприятливими або такими, що не сприяють розвитку вертикального переміщення повітря.

В адіабатичній атмосфері температура частинки повітря, переміщеної по вертикалі, завжди дорівнюватиме температурі навколишнього середовища. Таким чином, адіабатична стратифікація створює умови байдужої рівноваги. Тому при вирішенні питання про стійкість атмосфери треба порівнювати натурні градієнти температури з адіабатичними.

В результаті перегріву окремих мас повітря в атмосфері може виникнути конвективний рух повітря. Прискорення, яке отримає маса повітря за рахунок різниці сили тяжіння та сили Архімеда (сили плавучості), називається прискоренням конвекції:

$$a = g \frac{T' - T}{T} \quad (1.10)$$

де T' – температура об'єму повітря на даному рівні; T – температура навколишньої атмосфери.

Для визначення висоти рівня конвекції (рівня вирівнювання температур) для повітря з ненасиченою парою використовують формулу

$$z = \frac{T' - T}{\gamma_a - \gamma}, \quad (1.11)$$

де γ_a – суходіабатичний градієнт; γ – градієнт температури в шарі атмосфери.

При розв'язанні задач термодинаміки атмосфери використовуються наступні термодинамічні температури:

- еквівалентна температура t_e , яка враховує тепло, що виділяється при конденсації водяної пари;

- потенційна температура (θ) – це така термодинамічна температура, яку прийме об'єм повітря, якщо його суходіабатично призвести до рівня $P_{00}=1000,0$ гПа, ця температура обчислюється за формулою (1.7);

- псевдопотенційна температура t_{ps} , – це температура, яку прийме

повітря, якщо воно піднімається від рівня конденсації по вологій адіабаті до тих пір, поки вся пара не сконденсується, потім сухоадіабатично опускається до ізобари 1000 гПа.

Об'єм вологого повітря з ненасиченою водяною парою, піднімаючись вгору, теж змінює свій стан за сухоадіабатичним законом. Однак при цьому в ньому збільшується відносна вологість. Висота, на якій відносна вологість дорівнює 100 %, називається рівнем конденсації.

1.2 Технології очищення атмосферного повітря від забруднень та їх вплив на довкілля

До головних типів забруднень повітря відносяться:

1. Газові домішки:

- Діоксид сірки (SO_2) – продукт горіння палива з великим вмістом сірки, причиняє кислотні опади.
- Оксиди азоту (NO_x) – забруднювачі, що виникають у двигунах машин та при спалюванні палива.
- Леткі органічні сполуки – випаровуються з промислових розчинників, фарб, нафтопродуктів.
- Вуглекислий газ (CO_2) та метан (CH_4) – парникові гази, що призводять до зміни клімату.

2. Аерозольні забруднення.

Аерозольні забруднення – це тверді, рідкі чи газоподібні часточки, які містяться у повітрі і шкідливо впливають на довкілля та здоров'я людей.

Тверді частинки (аерозолі):

- Пил – найдрібніші частинки ґрунту, мінералів або промислових відходів.
- Сажа – утворюється внаслідок неповного згоряння органічних речовин (нафта, вугілля, біомаса).

- Металеві частинки – утворюються під час обробки металів (наприклад, у металургії або зварюванні).

- Рідкі частинки (тумани, аерозолі рідин):

- Краплі води або хімічних розчинів, що виникають під час випаровування або конденсації, зокрема, небезпеку становлять краплі кислот (сірчана, азотна кислота), що виникають у промислових реакціях.

Вплив аерозольних забруднень на навколишнє середовище:

- Кліматичні зміни: парникові гази (CO_2 , CH_4) спричиняють глобальне потепління.

- Кислотні дощі: SO_2 та NO_x у повітрі реагують з водяною парою, формуючи кислотні опади, котрі шкодять ґрунтам, водоймам та рослинам.

- Забруднення ґрунтів і води: частинки пилу та хімічних домішок осідають, погіршуючи якість води та ґрунтів.

- Вплив на рослинний світ: газоподібні забруднювачі, такі як озон (O_3), руйнують тканини рослин, знижуючи їхню продуктивність.

Вплив на здоров'я людини:

- Токсичність: хімічні речовини, як-от важкі метали (ртуть, свинець), шкідливо діють на нервову систему та метаболізм.

- Алергії: пил, що скупчується у повітрі, може викликати алергічні реакції.

Методи та підходи до очищення аерозольних систем: переваги й недоліки

1. Механічні способи очищення

Ці способи ґрунтуються на видаленні частинок із повітря за допомогою фізичних сил [1-3], таких як гравітація, інерція або відцентрова сила. До апаратів механічного очищення належать:

Відстійні камери (гравітаційне очищення)

Недоліки:

- Ефективність обмежена для частинок розміром >50 мкм,
- Не підходить для дрібнодисперсних частинок.

Циклонні апарати (відцентрове очищення).

Переваги:

- Висока ефективність для частинок розміром 5-50 мкм.

Недоліки:

- Низька ефективність для частинок <5 мкм,
- Підвищений опір руху газового потоку.

2. Фільтраційні методи очищення

Передбачають застосування пористих матеріалів для уловлювання твердих частинок [3-7].

1. Тканинні фільтри

Переваги:

- Ефективність до 99 % для малих частинок (PM2.5).

2. Пористі керамічні фільтри

Переваги:

- Стійкість до високих температур і агресивних середовищ.

3. Вологі методи очищення (скрубери)

Припускають промивання забрудненого повітря рідиною (зазвичай водою). Скрубери різних типів (плівкові, форсункові, вихрові) мають переваги, до яких відноситься висока ефективність очищення, та недоліки, що пов'язані з утворенням рідких відходів, які потребують подальшої утилізації, а також з підвищеним споживанням води та енергії.

4. Адсорбційні та каталітичні способи очищення

Застосовуються для видалення газоподібних домішок.

Адсорбція на активованому вугіллі

- Переваги:

- Ефективне видалення легких органічних сполук і газів.
- Недоліки:
- Потребує регулярної заміни або регенерації адсорбенту.

5. Електричні методи очищення (електрофільтри)

Базуються на створенні електричного поля для осадження заряджених частинок. Електрофільтри високої напруги мають переваги. Це – висока ефективність (до 99 %) для дрібнодисперсних частинок.

Димові гази, що використовуються в теплоенергетиці, повинні піддаватися очищенню від золи, концентрація якої може сягати від 20 до 30 г/см³ повітря. Дисперсійний склад золи зазнає значних змін, що визначається як місцем видобутку сировини, так і методом пилопідготовки, хоча переважна кількість часточок зазвичай менша за 30-40 мкм.

Методи очищення газових викидів. Охорона повітряного простору. Гравітаційне осадження. Циклони та їх розрахунки

Дія пиловловлювачів і сепараторів базується на певному фізичному принципі [3-10]. У пиловловлювальних та сепараційних установках застосовуються різні способи відділення частинок аерозолі від газового середовища. Це способи осадження під впливом гравітації, осадження з використанням сил інерції, осадження в відцентровому полі. Серед способів очищення газів є також фільтрація і електростатичне осадження.

Робота гравітаційних пиловловлювачів базується на принципах гравітаційного осідання, а саме осідання частинок аерозолі під впливом сили тяжіння.

$$F = \frac{1}{6} \rho g \pi d^3 \quad (1.12)$$

де d – діаметр частинки, g – прискорення вільного падіння.

Сила Стокса F_c пов'язана із в'язкістю μ_0 , діаметром d та швидкістю осадження частинки $W_{\text{ч}}$:

$$F_c = 3 \pi \mu_0 d W_{\text{ч}} \quad (1.13)$$

Переміщення частинки в броунівському русі Δx відповідно до рівняння Ейнштейна [10-11]:

$$\Delta x = \sqrt{2Dt} \quad (1.14)$$

де D – коефіцієнт дифузії частинки, що характеризує інтенсивність

броунівського руху, $\text{м}^2 / \text{с}$; t – час, с.

Явище осідання зустрічається також в установках, робота яких, здебільшого, ґрунтується на використанні інших сил, зокрема, відцентрових. Цей спосіб відділення частинок аерозолів від повітря (газу) суттєво результативніший за гравітаційне осідання, адже виникає відцентрова сила, котра у багато разів перевищує силу тяжіння. Відцентрове розділення може використовуватися стосовно до більш дрібніших частинок.

В апаратах, що ґрунтуються на застосуванні відцентрової сепарації, можливі два принципово різних конструктивних рішення:

- потік аерозолу обертається в нерухомому корпусі пристрою;
- потік пересувається в роторі, що обертається.

Перше рішення реалізовано в циклонах, друге – в ротаційних пиловловлювачах.

Швидкість відцентрового осідання кулястої частинки можна вирахувати, прирівнявши відцентрову силу $F_{\text{ц}}$, котра з'являється при обертанні пилогазового потоку, силі опору середовища згідно із законом Стокса.

Отже, швидкість осідання завислих часток у відцентрових пиловловлювачах прямо пропорційна квадрату діаметра частинки.

Найважливішим параметром, що характеризує функціонування пристроїв очищення повітря від пилу в тих або інших конкретних випадках їх використання, є коефіцієнт (ступінь) очищення (ефективність знепилювання),%:

$$\epsilon = m/M,$$

де m , M – маси частинок пилу, що містяться в газах на вході в апарат (до очищення), та на виході з апарату після очищення.

У циклонах газ змушують обертатися або вихритися, щоб на частинки діяли відцентрові сили.

Цього досягають або шляхом тангенціального впускання потоку в камеру, або пропускаючи газ вздовж осі циклону.

У промисловості пиловловлювальні камери застосовують як пристрої попередньої обробки газів, скажімо, для відділення великих частинок і розвантаження апаратів наступних ступенів. Через це дане обладнання використовують лише для осадження великих частинок (понад 100 мкм). Звичайно, середня швидкість руху газів у пиловловлювальних камерах становить 0,2...1 м/с, а у пилових мішках – 1...1,5 м/с.

Для рівномірного розподілу газу по перетину, пиловловлювальні камери можуть бути забезпечені дифузорами та газорозподільними решітками, а для зменшення висоти осадження частинок – горизонтальними чи похилими полицями.

Метою розрахунку пиловловлювальних камер є визначення їхніх розмірів та коефіцієнта очищення. А коефіцієнти очищення можуть бути знайдені дослідним шляхом. Конструювання осадкових камер спирається на розрахунки сил, що діють на конкретну частинку, та визначення швидкості її вертикального переміщення донизу під впливом підсумкової сили. Відповідно до закону Ньютона прискорення руху частинок визначається сукупним впливом сили тяжіння, сили Архімеда та сили опору навколишнього середовища [8, 9]. У контексті газового потоку, дією сили Архімеда можна знехтувати. Силу опору виражають через коефіцієнт опору ζ , що залежить від числа Рейнольдса Re . Рівняння руху частинки:

$$m \frac{dw_{oc}}{dt} = mg - \frac{\xi \rho w_{oc}^2}{2} \pi r^2, \quad (1.15)$$

де r – радіус частинки; m – маса частинки; w_{oc} – швидкість руху частинки; t – час; ρ – густина середовища (газу).

Функціональну залежність між ζ і Re беруть зі стандартних графіків або рівнянь [8-11], що описують рух окремої сферичної частинки. При $Re < 0,5$ ця залежність характеризується законом Стокса $\zeta = 24 / Re$. Для великих Re можна використовувати емпіричне рівняння Клячко:

$$\xi = \frac{24}{Re} + \frac{4}{Re^{0,5}}, \quad (1.16)$$

яке може бути застосовано в діапазоні $0,5 < Re < 800$. Для мікроскопічних

частинок у формулі для сили супротиву необхідно враховувати поправку Каннінгема.

Вертикальне прискорення частинки зберігається, поки сила тяжіння не врівноважується силою опору; після цього частинка, досягнувши граничної швидкості, рухається рівномірно. Граничну швидкість можливо визначити, прирівнявши ліву частину рівняння (1.13) до нуля. Цей вираз дозволяє обчислити число Галілея Ga .

$$4Ga = 4gd^3\rho(\rho_k - \rho)/3\mu^2, \quad (1.17)$$

де μ – в'язкість газу, ρ – густина газу, ρ_k та d – густина та діаметр дисперсної частинки.

Пряме співвідношення між діаметром частинки і w_{oc} можна дати через комбінацію $(Re / \zeta)^{1/3}$ в функції $Ga^{1/3}$. Ця залежність добре виражається емпіричним співвідношенням

$$\lg (Re / \zeta)^{1/3} = -1,387 + 2,153 \lg Ga^{1/3} + 0,548 \lg 2 \cdot Ga^{1/3} + 0,05665 \lg 2 \cdot Ga^{1/3}$$

Отже, для обчислення усталеної швидкості осідання частинок будь-якого розміру d , спершу потрібно встановити критерій Ga . Далі розраховують Re / ζ , а вже потім визначають w_{oc} , користуючись вищезазначеним визначенням Re / ζ .

Надійним засобом очищення запилених газів є осадження частинок пилу під впливом відцентрових сил у циклонах. Запилені гази вводяться в циклони через тангенційні або аксіальні завихрювачі, здійснюючи всередині апаратів складний обертально-поступальний рух.

Принцип роботи циклону демонструє рисунок 1.1. Газ циркулює всередині циклону, переміщаючись зверху донизу, а після того рухається вгору. Частинки пилу відкидаються відцентровою силою до стінки. На частинки у потоці всередині циклону діє сила інерції, що прагне змістити їх з криволінійних ліній струму по дотичних, спрямованих під певним кутом вниз і до стінки корпусу. Частинки під дією сил тяжіння та інерції спускаються відносно газового потоку вниз та потрапляють до пилоприймача (бункера). Частинки, що не досягли стінки, продовжують рух по

криволінійних лініях струму та можуть бути винесені з циклону газовим потоком, який може захопити і деяку кількість осілих в бункер частинок.

Зазвичай в циклонах відцентрове прискорення у сотню-тисячу разів більше за прискорення сили тяжіння. Це означає, що навіть найдрібніші частинки пилу не можуть рухатися разом з газом. Під впливом відцентрової сили вони переміщуються до стінок циклону.

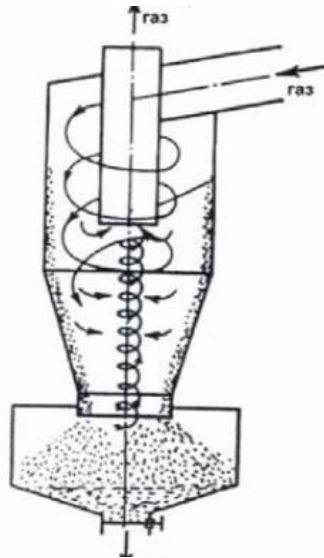


Рис.1.1 Принцип очищення запылених газів в циклонах

З огляду на те, що шляхи завислих частинок близькі до кола, величину інерційної сили допустимо вважати пропорційною квадрату дотичної швидкості, масі частинок і обернено пропорційною радіусу обертання. Отже, якщо радіус обертання менший за метр і дотична швидкість в межах 10-15 м/с, то сила інерції на порядок перевищує силу тяжіння. З цієї причини сепарація частинок в циклонах протікає значно інтенсивніше, ніж в гравітаційних відстійниках.

Оскільки сила інерції пропорційна масі, то найдрібніші частинки в циклонах вловлюються не дуже добре.

У промисловості прийнято розподіляти циклони на високопродуктивні та високоефективні. Перші – ефективні, проте потребують значних витрат для реалізації процесу очищення; циклони другого типу характеризуються невеликим гідравлічним опором, але гірше уловлюють найдрібніші частинки.

На практиці широко застосовують циліндричні (з видовженою циліндричною частиною) та конічні (з видовженою конічною частиною) циклони. Циліндричні циклони зараховують до високопродуктивних апаратів, а конічні – до високоефективних.

Діаметр циліндричних циклонів не перевищує 2000 мм, а конічних – не більше 3000 мм.

Гідравлічний опір циклонів визначають за формулою:

$$\Delta P_{\text{ц}} = \xi \rho v^2 / 2, \quad (1.18)$$

де v – швидкість газів у довільному перерізі апарату, щодо якого розрахована величина коефіцієнта опору ξ , м/с.

Коефіцієнт опору:

$$\xi = 0,00513 \cdot K_1 \cdot h_1 \cdot b / D_{\text{тр}}^2, \quad (1.19)$$

де K_1 – коефіцієнт, що дорівнює 16 для циклонів з тангенціальним входом газу і 7,5 – для циклонів з розетковим входом; h_1 та b – розміри вхідного патрубку; $D_{\text{тр}}$ – діаметр вихлопної труби.

При значних об'ємах газів, що підлягають очищенню, використовують групове розміщення апаратів – групові циклони. Такий підхід дозволяє уникнути збільшення діаметра циклону, що позитивно позначається на ефективності очищення.

Коефіцієнт гідравлічного опору групи циклонів обчислюють за наступною формулою:

$$\xi_{\text{гц}} = \xi_{\text{ц}} + K_2, \quad (1.20)$$

де $\xi_{\text{ц}}$ – коефіцієнт гідравлічного опору одиночного циклону; K_2 – коефіцієнт, що враховує додаткові втрати тиску, пов'язані з компонованням циклонів у групу (визначають дослідним шляхом). Іноді велика кількість малих циклонів (мультициклонів) поєднують у групу (батареїні циклони). Вони використовуються для очищення великих мас (витрат) газів. Однак, через перетікання газів між елементами циклонів, ефективність очищення батарейних циклонів нижче одиночних.

Ступінь очищення аерозолів з частинками, що перевищують 10 мкм,

варіюється від 80 до 95 %, а для дрібніших частинок – значно гірша. Підвищення ефективності осадження частинок шляхом зменшення діаметра циклону та збільшення швидкості потоку обмежене.

Існують різні конструкції циліндричних та конічних циклонів. Найбільш поширені – циліндричні.

Циліндричні циклони можуть бути змонтовані поодиночі або групами по два, чотири, шість, вісім циклонів залежно від необхідної продуктивності.

Циклони мають видовжену конічну частину та спіральний вхідний патрубок. Вони характеризуються високою ефективністю очищення, призначені для уловлювання сажі, пилу тощо.

Під час проектування циклона визначають його геометрію, розміри, фракційну ефективність, перепад тиску та необхідну потужність. Ці розрахунки базуються на заданих швидкості потоку газу, його складі, температурі, тиску, концентрації пилу, а також на даних про дисперсний склад пилу. Ці дані також потрібні для визначення вимог до пристрою для вторинного уловлювання пилу, якщо його передбачається використовувати.

Далі розраховують критичний (мінімальний) діаметр частинок $d_{кр}$, що повністю вловлюються апаратом, ефективність уловлювання пилу η та гідравлічний опір циклона $\Delta P_{ц}$.

Критичний розмір частинок може бути знайдений, наприклад, за такою залежністю:

$$d_{кр} = 3 \left\{ V \mu D (D + b) / [\rho_z (v_{вх}^2)^2] \right\} \cdot [1 - (D + b) / 2D]^{0.5}, \quad (1.21)$$

де V – об'ємна витрата газу, $\text{м}^3 / \text{с}$; $v_{вх}$ – швидкість газу на вході в циклон, $\text{м} / \text{с}$; D, b – характерні розміри циклона.

Ефективними методами є електричні методи очищення (електрофільтри).

Електрофільтри у теплоенергетиці розраховані на функціонування за швидкості газового потоку 1,5 м/с та температури 130-150 °С. Висота осаджувальних електродів – 7,5 м та 12 м. Запиленість газів на виході з електрофільтра – від 0,3 до 0,5 г/м³, струшування електродів здійснюється

автоматично з інтервалом у 2-4 хвилини, не перериваючи подачу газів.

Розгляньмо принцип роботи електрофільтра (рисунок 1.2), що застосовується для електростатичного очищення газових потоків.

Електрофільтр з трубчастим електродом – це циліндр, всередині якого проходить дрітятий електрод «-». По трубці проходить потік забрудненого дисперсними частинками повітря. Частинки пилу заряджаються в неоднорідному електричному полі електрофільтра та осаджуються на внутрішній стінці циліндра, електричний знак заряду якого «+». В результаті регулярного струшування тверді частинки золи випадають на дно фільтра [6, 7, 28-30].

Ступінь очищення газів від дисперсних часточок визначається кількістю цих частинок у газі до того, як він потрапить в електрофільтр, та після виходу з нього.

$$\eta = \frac{Z_1 - Z_2}{Z_1} = 1 - \frac{Z_2}{Z_1},$$

де Z_1, Z_2 – концентрації частинок золи до входу та після виходу з пристрою. Маса пилу в об'ємі між електродами завдовжки dx , на віддалі x від входу, складає:

$$g = Z_{\text{хсер}} \cdot 2b \cdot d \cdot dx,$$

де b – ширина осаджувального електрода, d – відстань між коронуючим і осаджувальним електродами.

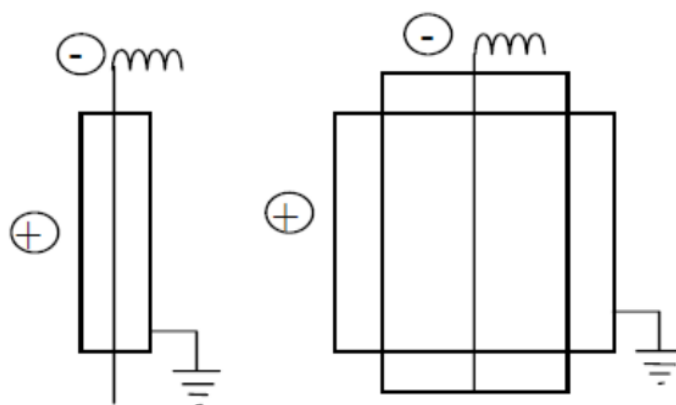


Рис. 1.2 Електрофільтри з трубчастими та пластинчастими електродами

Зменшення маси пилу dg при осадженні за час $d\tau$ на поверхню електродів площиною $2b \cdot dx$ дорівнюватиме

$$dg = -Z_x \cdot v \cdot 2b \cdot dx \cdot d\tau,$$

де v – швидкість дрейфу під дією поля у осаджувального електрода.

Об'єднуючи записані вирази і позначаючи

$$\chi = \frac{Z_x}{Z_{xcep}},$$

отримаємо

$$\frac{dg}{g} = -\frac{v\chi d\tau}{d} \quad \text{або} \quad \frac{dz}{z_{xcep}} = -v\chi \frac{d\tau}{d}.$$

Інтегруючи отриманий на попередньому етапі вираз, маємо змогу визначити закон зменшення концентрації частинок золи, що відходять з електрофільтра:

$$Z_2 = Z_1 e^{-v\chi\tau/d}$$

Час перебування газу в електрофільтрі становить $\tau = l/u$, де l – довжина пристрою, а u – швидкість газової суміші. Якщо позначити функцією $f=l/ud$, то отримаємо ступінь очищення газів у фільтрі.

$$\eta = 1 - e^{-\chi v f}.$$

Отже, ступінь очищення димових газів збільшується зі зростанням довжини електродів і швидкості часток у напрямку до осаджувального електрода, та зменшується зі збільшенням відстані між електродами й швидкості газу.

Приклади розв'язання задач

Приклад 1.1

Визначити тиск повітря на висоті $h = 3250$ м над рівнем моря, де розташована обсерваторія. Температуру повітря вважати незмінною та такою, що дорівнює $t = 5$ °С. Молярна маса повітря $\mu = 0,029$ кг/моль. Тиск повітря на рівні моря $p_0 = 101,3$ кПа.

Розв'язання:

Зміна тиску газу в ізотермічній атмосфері в полі сили тяжіння описується барометричною формулою.

$$p = p_0 \cdot e^{-\frac{\mu g h}{RT}}$$

Підставляючи у формулу чисельні дані умови задачі, отримаємо, що $p=67,2$ кПа.

Відповідь: на висоті h тиск дорівнює $p=67,2$ кПа

Приклад 1.2

На якій висоті тиск повітря досягає 75 % від тиску на рівні моря? Припустимо, що температура повітря не змінюється, дорівнюючи $t = 0$ °С.

Розв'язання

Змінення тиску газу в ізотермічній атмосфері у полі сили тяжіння надає барометрична формула

$$p = p_0 \cdot e^{-\frac{\mu g h}{RT}}, \text{ звідки}$$

$$\frac{p}{p_0} = e^{-\frac{\mu g h}{RT}}.$$

Логарифмуючи обидві частини рівняння, отримаємо

$$\ln \frac{p}{p_0} = -\frac{\mu g h}{RT}, \text{ звідки } h = \frac{\ln \frac{p}{p_0} RT}{\mu g} = \frac{(-0,29) \cdot 8,31 \cdot 273}{0,029 \cdot 9,8}; \quad h=2296 \text{ м.}$$

Відповідь: тиск повітря становить 75 % від тиску на рівні моря на висоті $h=2296$ м

Приклад 1.3

Літак мчить на висоті $h_1 = 8300$ м. Всередині повітряного судна, завдяки компресору, утримується сталий тиск, еквівалентний висоті $h_2 = 2700$ м. Визначити різницю між тиском всередині та зовні літака. Температуру зовнішнього повітря вважати рівною $t_1 = 0$ °С.

Розв'язання

$$\text{Згідно з барометричною формулою } p = p_0 \cdot e^{-\frac{\mu g h}{RT}},$$

де $p_0 = 10^5$ Па – тиск на рівні моря. Молярна маса повітря $\mu=29 \cdot 10^{-3}$ кг/моль. Тоді

$$p_1 = p_0 \cdot e^{-\frac{\mu g h_1}{RT_1}}; \quad p_1 = 35,3 \text{ кПа.}$$

Температура повітря у літаку відповідає тиску на висоті $h_2 =$

2700 м, тобто $T_2 = 273 \text{ К.}$, тоді

$$p_2 = p_0 \cdot e^{-\frac{\mu g h_2}{RT_2}}; \quad p_2 = 71,3 \text{ кПа.} \quad \text{Звідси } \Delta p = p_2 - p_1; \quad \Delta p = 36 \text{ кПа.}$$

Відповідь: різниця тисків усередині та зовні літака $\Delta p = 36 \text{ кПа.}$

Приклад 1.4

Знайти у попередній задачі, у скільки разів густина ρ_2 повітря в кабіні більша за густину ρ_1 повітря поза нею, якщо температура зовнішнього повітря $t_1 = -20 \text{ }^\circ\text{C}$, а температура повітря в кабіні $t_2 = +20 \text{ }^\circ\text{C}$.

Розв'язання

З рівняння Менделєєва- Клапейрона

$$pV = \frac{m}{\mu} RT$$

маємо

$$\rho = \frac{p\mu}{RT} \quad . \quad \text{Тоді відношення густин}$$

$$\frac{\rho_2}{\rho_1} = \frac{p_2 T_1}{p_1 T_2} = \frac{0,713 \cdot 253}{0,353 \cdot 293} = 1,7$$

Відповідь: густина повітря в кабіні літака більша за густину повітря поза нею у 1,7 рази.

Приклад 1.5

Знайти густину ρ повітря: а) поблизу Землі; б) на висоті $h = 4 \text{ км}$ над Землею. Температуру повітря вважати сталою й такою, що дорівнює $t = 0 \text{ }^\circ\text{C}$. Атмосферний тиск поблизу Землі $p_0 = 100 \text{ кПа.}$

Розв'язання

Густина повітря біля землі на рівні моря дорівнює

$$\rho_1 = \frac{p_0 \mu}{RT}, \quad \text{а на висоті } h \text{ дорівнює}$$

$$\rho_2 = \frac{p_0 \mu}{RT} \exp\left(-\frac{\mu g h}{RT}\right).$$

Підставляючи у ці формули чисельні дані

$$\mu = 29 \cdot 10^{-3} \frac{\text{кг}}{\text{моль}} \quad T = 273 \text{ К,} \quad \text{отримаємо}$$

$$\rho_1 = \frac{100 \cdot 10^3 \cdot 29 \cdot 10^{-3}}{8,31 \cdot 273} = 1,28 \text{ кг/м}^3$$

$$\rho_2 = 1,28 \cdot \exp\left(-\frac{29 \cdot 10^{-3} \cdot 10 \cdot 4 \cdot 10^3}{8,31 \cdot 273}\right) = 1,28 \cdot \exp(-0,5) = 0,78 \text{ кг/м}^3.$$

Відповідь: густина повітря дорівнює 1,28 кг/м³ і 0,78 кг/м³.

Приклад 1.6

На якій висоті h густина атмосферного повітря буде вдвічі меншою за його густину на рівні моря? Прийmemo температуру повітря постійною, $t=0^\circ\text{C}$.

Розв'язання

Густина повітря на рівні моря і на рівні h відповідно дорівнюють

$$\rho_1 = \frac{p_0 \mu}{RT} \quad \rho_2 = \frac{p_0 \mu}{RT} \exp\left(-\frac{\mu g h}{RT}\right).$$

За умови задачі $\frac{\rho_1}{\rho_2} = 2$, тоді

$$\exp\left(\frac{\mu g h}{RT}\right) = 2, \text{ або } \frac{\mu g h}{RT} = \ln 2.$$

Звідси знаходимо h

$$h = \ln 2 \frac{RT}{\mu g}.$$

$$\text{Для повітря } \mu = 29 \cdot 10^{-3} \frac{\text{кг}}{\text{моль}} \text{ і } h = 5,53 \text{ км}$$

Відповідь: густина повітря вдвічі менша за його густину на рівні моря на висоті $h = 5,53$.

Приклад 1.7

За допомогою іонізаційного манометра, що його розмістили на штучному супутнику Землі, було виявлено, що на висоті $h = 300$ км над Землею, концентрація частинок газу в атмосфері $n = 10^{15} \text{ м}^{-3}$. Потрібно визначити середню довжину вільного пробігу молекул газу на цій висоті. Діаметр частинок газу становить 0,2 нм.

Розв'язання:

Середня довжина вільного пробігу молекул газу розраховується як:

$$\lambda_{\text{сер}} = \frac{1}{\sqrt{2} \sigma^2 n \pi};$$

$$\lambda_{\text{сер}} = 5,6 \text{ км.}$$

Відповідь: на висоті і $h = 300 \text{ км}$ середня довжина вільного пробігу молекул газу дорівнює $\lambda_{\text{сер}} = 5,6 \text{ км}$

Приклад 1.8

За допомогою мікроскопа можна спостерігати, як змінюється концентрація малих суспендованих частинок в залежності від висоти шару рідини. Використовуючи барометричну формулу, можна експериментально дослідити значення сталої Авогадро N_A . В одному з дослідів встановлено, що при відстані між двома шарами $\Delta h = 100 \text{ мкм}$, кількість завислих частинок в одному шарі вдвічі більша, ніж в іншому при температурі $t = 20 \text{ }^\circ\text{C}$. Завислі дисперсні частинки мають діаметр $0,3 \text{ мкм}$, густина рідини на $\Delta \rho = 0,2 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ менша, ніж густина частинок. Виходячи з наведених даних обчислити значення сталої Авогадро N_A .

Розв'язання

Запишемо барометричну формулу:

$$p = p_0 \cdot e^{-\frac{\mu g h}{RT}}$$

Кількість частинок в одиниці об'єму

$$n = \frac{p}{kT}, \text{ звідки } p = nkT.$$

Підставимо останній вираз у барометричну формулу та отримаємо:

$$n_1 = n_0 \cdot e^{-\frac{\mu g h_1}{RT}};$$

$$n_2 = n_0 \cdot e^{-\frac{\mu g h_2}{RT}},$$

Звідси

$$\frac{n_1}{n_2} = e^{\frac{\mu g \Delta h}{RT}},$$

Логарифмуючи даний вираз, враховуючи, що $\mu = m \cdot N_A$, отримаємо

$$\ln \frac{n_1}{n_2} = \frac{m N_A g \Delta h}{RT},$$

Звідки, враховуючи закон Архімеда, отримаємо

$$N_A = \frac{RT \ln \frac{n_1}{n_2}}{g V \Delta \rho \Delta h}; \quad N_A = 6,1 \cdot 10^{23}, \text{ моль}^{-1}.$$

Відповідь: значення постійної Авогадро N_A у вказаному досліді Перрена дорівнює ; $N_A = 6,1 \cdot 10^{23}$, моль⁻¹.

Приклад 1.9

Яку температуру набуде об'єм повітря, що має температуру 17 °С, що переміщується адіабатично з рівня 900,0 гПа до рівня 800,0 гПа?

Розв'язання

$$\frac{290,0}{T} = \left(\frac{900,0}{800,0} \right)^{0,286} = \frac{290,0}{T_1} = (1,125)^{0,286}$$

$$T_1 \approx \frac{290,0}{(1,125)^{0,286}} = 285,9 \text{ K} = 12,9^\circ \text{C}$$

Рівняння Пуассона можна розв'язати графічно із застосуванням аерологічної діаграми, використовуючи з цією метою систему кривих "сухі адіабати".

Відповідь: значення температури дорівнюватиме 12,9°С.

Приклад 1.10

Визначте, якою буде температура об'єму сухого повітря, що перемістився адіабатично з вершини гори до підніжжя, якщо висота гори 1500 м, а температура об'єму повітря на вершині становила 10 °С.

Розв'язання

Для характеристики повного запасу енергії (кінетичної або потенційної) об'ємів повітря, що знаходилися за різних значень тиску, використовують потенційну температуру (θ). Це термодинамічна температура, яку прийме об'єм повітря, якщо його суходіабатично призвести до рівня $P_{00}=1000,0$ гПа. Потенційна температура обчислюється за формулою

$$\theta = T \left(\frac{P_{00}}{P} \right)^{0,286}$$

де $T=10^\circ + 1500 \text{ м} \cdot 1^\circ/100 \text{ м} = 25,0^\circ \text{C}$.

Потенційну температуру можна приблизно обчислити за формулою:

$$\theta_{\text{я}} = t_z + \gamma_a z \pm \Delta P / 12,5 ,$$

де $\Delta P = P_{00} - P_0$, P_0 – тиск біля поверхні землі.

Третій спосіб визначення потенційної температури – графічно (за аерологічною діаграмою). У цьому випадку з точки з координатами T і P слід переміщатися сухою адіабатою до ізобари $P=1000,0$ гПа.

Відповідь: значення температури дорівнюватиме $25\text{ }^{\circ}\text{C}$

Приклад 1.11

Запускається зонд у вигляді повітряної кулі, яка швидко підіймається вгору. На початку тиск повітря в кулі відповідає атмосферному тиску на поверхні Землі 1000 гПа. Визначити температуру повітря в кулі, якщо тиск в неї досяг $950,0$ гПа, а температура всередині кулі дорівнює $56\text{ }^{\circ}\text{C}$; Вважаємо, що при швидкому підніманні кулі термодинамічний процес в кулі є адіабатичним.

Розв’язання

Зміни температури об’єму повітря при сухоадіабатичних процесах характеризуються рівнянням Пуассона:

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{0,286}.$$

де T_1 – температура об’єму повітря на даному рівні, це молекулярно-кінетична температура, яка в умові задачі дорівнює $56\text{ }^{\circ}\text{C}$; T_2 – потенційна температура, P_1 – тиск на поверхні Землі.

Підставляючи у формулу Пуассона дані з умови задачі, отримаємо, що повітря у кулі під час піднімання охолонуло на $5\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Відповідь: значення температури становить $51\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Приклад 1.12

Під час зондування атмосфери отримані такі дані розподілу температури з висотою, які наведені в таблиці 1.1:

Таблиця 1.1

Розподіл температури атмосферного повітря з висотою

Висота, м	0	100	300	500	700	1000
Температура, $^{\circ}\text{C}$	20,0	18,6	16,6	15,0	15,0	13,6

Визначити характер рівноваги кожного шару стосовно вертикальних переміщень сухого повітря.

Розв'язання

В першому шарі (0 – 100 м) маємо

$$\gamma = -\Delta t / \Delta z = 1,4^{\circ}\text{C}/100 \text{ м}; \quad \gamma > \gamma^a$$

значить, перший шар «сухонестійкий».

У другому шарі $\gamma = 1^{\circ}\text{C}/100 \text{ м}; \gamma = \gamma^a$.

Отже, другий шар «сухобайдужий».

В третьому шарі $\gamma = 1,6^{\circ}\text{C}/200 = 0,8^{\circ}\text{C}/100 \text{ м}; \gamma < \gamma^a$

Отже, третій шар «сухостійкий».

Аналогічно, четвертий і п'ятий шари є також «сухостійкими».

Відповідь: третій, четвертий і п'ятий шари є «сухостійкими», перший шар є «сухонестійким».

Приклад 1.13

Знайти кількість дисперсних частинок N розміром $d=10^{-6}$ м густиною $\rho = 2,7 \cdot 10^{-3} \text{ г}/\text{см}^3$ і концентрацією пилу $C=10^{-9} \text{ кг}/\text{м}^3$ в 1 м^3 повітря

Розв'язання: $m_0 \cdot N = C$, де m_0 – маса однієї частинки

$$m_0 = \rho \frac{\pi d^3}{6}$$

$$m_0 = 2,7 \cdot \frac{3,14}{6} \cdot 10^{-18}$$

$$m_0 = 1,3 \cdot 10^{-18} \text{ г}$$

$$N = \frac{C}{m_0}$$

Відповідь: N дорівнює $0,8 \cdot 10^9$.

Приклад 1.14

Знайти найбільшу швидкість v , яку може досягти крапля дощу діаметром $d=0,6$ мм, якщо динамічна в'язкість повітря $\eta = 1,2 \cdot 10^{-5} \text{ Па} \cdot \text{с}$.

Розв'язання

Під час падіння на каплю діють дві протилежно спрямовані сили. Сила тяжіння mg і сила опору повітря $\vec{F}$ (силу Архімеда не враховуємо). При підвищенні швидкості падіння сила опору зростає.

Максимальну швидкість падіння крапля досягне, коли сила тяжіння та сила опору повітря стануть рівними. Сила тяжіння

$$F = mg .$$

За законом Стокса

$$F_c = 6\pi\eta r v$$

Тоді

$$3\pi\eta d v = mg .$$

Так як маса

$$m = \rho V = \rho \frac{\pi d^3}{6} ,$$

де ρ – густина води, то

$$3\pi\eta d v = \rho g \frac{\pi d^3}{6} .$$

Звідки

$$v = \frac{\rho g d^2}{18\eta} ;$$

$$v = \frac{10^3 \cdot 10 \cdot 36 \cdot 10^{-8}}{18 \cdot 1,2 \cdot 10^{-5}} = 16,4 \text{ м/с}$$

Відповідь: швидкість 16,4 м/с .

Приклад 1.15

Визначити розмір дисперсних частинок при ефективності осадження їх 50% в пилеосаджувальній камері, якщо вона має довжину $L = 10$ м, висоту $H = 1$ м, ширину $B = 2$ м. Витрата повітря через камеру $V = 3600$ м³ / год, густина частинок 500 част./м³, в'язкість газу $\mu = 18 \cdot 10^{-6}$ Па·с.

Розв'язання

Знайдемо відносну швидкість осадження дисперсних частинок в осаджувальній камері з ефективністю 50 %:

$$w_{oc} = 1,5 \frac{H}{L} = 1,5 \frac{1}{10} = 0,15$$

Знайдемо швидкість осадження дисперсних частинок $(w_{oc})_{50}$

$$(w_{oc})_{50} = 0,075 \text{ м/с}$$

За знайденою швидкістю осадження, заданими густиною та в'язкістю газу визначимо розмір частинок, що осідають у камері при ефективності 50 %

$$d_{50} = \sqrt{\frac{18\mu w_{oc}}{g(\rho_k - \rho)}} = \sqrt{\frac{18 \cdot 10^{-6} \cdot 0,075}{10(500 - 1,25)}} = 7 \cdot 10^{-5} \text{ м} = 70 \text{ мкм.}$$

Відповідь: діаметр частинок дорівнює 70 мкм.

Приклад 1.16

При русі у повітрі частинка зустрічає опір середовища, який може бути визначений за законом Ньютона

$$F_c = \zeta S w^2 \rho / 2 .$$

Показати, що при ламінарному русі, діюча на частинку сила опору описується законом Стокса.

Розв'язання

Прийнявши значення коефіцієнта опору ζ для випадку ламінарного руху в області $Re < 2$:

$$\zeta = 24/Re,$$

підставимо значення його у формулу Ньютона

$$F_c = (24/Re)(\pi d^2 / 4)(w^2 \rho / 2) = 24 \mu \pi d^2 w^2 \rho / (8 w d \rho)$$

і отримаємо

$$F_c = 3\pi \mu d w.$$

Ця формула описує закон Стокса: сила, яка чинить опір кулястому твердому тілу під час повільного руху в безмежному в'язкому середовищі, прямо пропорційна швидкості поступального переміщення, діаметру тіла та коефіцієнту в'язкості середовища.

Закон Стокса застосовується при ламінарному русі частинок, коли $Re < 0,5$ при діаметрах частинок $d < 30$ мкм; за умови $d=1,6$ мкм неточність становить 1 %.

Відповідь: $F_c = 3\pi\mu dw$

Приклад 1.17

У повітрі кімнати об'ємом 200 м^3 присутній 0,15 % вуглекислого газу (CO_2). Вентилятор постачає щохвилини 20 м^3 повітря, яке містить 0,04 % CO_2 . За який час кількість вуглекислого газу в повітрі кімнати зменшиться втричі?

Розв'язання

Прийmemo за незалежний змінний час t , а за потрібну функцію $y(t)$ – кількість CO_2 в кімнаті на час t . Знайдемо, на скільки зміниться кількість CO_2 за проміжок часу від моменту t до $t + \Delta t$. За хвилину надходить $20 \cdot 0,04 \cdot 10^{-2} \text{ м}^3$ вуглекислого газу, а Δt хвилин – $20 \cdot 0,04 \cdot 10^{-2} \Delta t$ кубічних метрів. З іншого боку, за час Δt із кімнати витікає $20 \cdot y(t) \cdot \Delta t / 200$ кубічних метрів. У момент t у кімнаті міститься $200 \cdot y(t) \text{ м}^3$ вуглекислого газу. Так як вміст CO_2 за час Δt змінюється на величину α , нескінченно малу, то $\alpha \rightarrow 0$ при $\Delta t \rightarrow 0$.

Складемо рівняння

$$\Delta y = 20 \cdot 4 \cdot 10^{-4} \Delta t - 20 \Delta t \frac{y + \alpha}{200}$$

Розділимо на Δt і перейдемо до межі при $\Delta t \rightarrow 0$. У лівій частині вийде похідна $y'(t)$, а правій отримаємо $80 \cdot 10^{-4} - 0,1y(t)$, так як $\alpha \rightarrow 0$ при $\Delta t \rightarrow 0$.

Отже, маємо диференціальне рівняння:

$$dy/dt = 80 \cdot 10^{-4} - 0,1 y(t)$$

Це рівняння типу

$$\frac{dy}{dx} + ay = ce^{bx},$$

де $a=0,1$, $b=0$, $c=0,008$.

Вирішуючи його, отримаємо:

$$y(t) = \frac{c}{a} + Ce^{-0,1t}$$

Для знаходження постійної C скористуємося початковими умовами.

При $t=0$: $y(0)=200 \cdot 0,15 \cdot 10^{-2} \text{ м}^3$.

Отже $200 \cdot 0,15 \cdot 10^{-2} = 0,08 + C$

Звідси $C=0,3 - 0,08 = 0,22$. Підставляючи це значення C в рівняння, отримаємо

$$y(t)=0,08 + 0,22e^{-0,1t}$$

При $t=\tau$ у кімнаті буде

$$y(\tau)=200 \cdot 0,15/3 = 0,1 \text{ м}^3$$

$$0,1 - 0,08 = 0,22e^{-0,1\tau}$$

Звідки $\tau=10 \ln \frac{22}{2}=24 \text{ хв.}$

Відповідь: кількість вуглекислого газу повітря кімнати зменшиться втричі за час 24 хвилини.

Приклад 1.18

Обчислити концентрацію шкідливої речовини q у повітрі приміщення, маючи інформацію, що кількість виділень шкідливої речовини в приміщенні $G = 0,5 \text{ мг/м}^3$, а гранично допустима концентрація шкідливої речовини $q_{\text{пдк}} = 2 \text{ мг/м}^3$. Відомий також об'єм приміщення $V_{\text{п}} = 300 \text{ м}^3$ та кратність повітрообміну $K = 5$. Кратність повітрообміну K вказує, скільки разів упродовж однієї години повітря в приміщенні підлягає повній заміні:

$$K = 3600 \frac{V}{V_{\text{п}}}, \text{ год}^{-1}.$$

Об'єм повітря V , який необхідно подати в приміщення, щоб розвести шкідливі речовини до безпечної концентрації, обчислюється за формулою:

$$V = G / (q_{\text{пдк}} - q_0), \text{ м}^3/\text{с},$$

де G – кількість шкідливих речовин, що виділяються, $\text{мг} / \text{с}$; $q_{\text{пдк}}$ – гранично допустима концентрація, $\text{мг} / \text{м}^3$; q – концентрація шкідливої речовини у вступнику повітрі, $\text{мг} / \text{м}^3$ (не повинна перевищувати 30 % від ГДК).

Розв'язання

У ситуаціях, коли складно встановити обсяг шкідливих домішок в повітрі приміщень, дозволяється визначати необхідний об'єм вентиляційного повітря за кратністю повітрообміну [26], згідно з відомчими нормативними документами. Визначимо об'єм повітря V , який потрібно подати до

приміщення, щоб розвести шкідливі речовини до безпечного рівня концентрації. Концентрація шкідливої речовини в припливному повітрі, мг/м^3 , буде дорівнювати

$$q_o = q_{\text{пдк}} - \frac{G}{V}$$

Підставивши чисельні значення, знайдемо q

$$q_o = 2 \text{ мг/м}^3 - \frac{0,5}{0,5} = 1 \text{ мг/м}^3$$

Відповідь: концентрація шкідливої речовини в повітрі приміщення q дорівнює 1 мг/м^3 .

Приклад 1.19

Розрахувати гідравлічний опір циклонів з тангенціальним входом, якщо швидкість повітря v у довільному перерізі апарату, щодо якого розрахована величина коефіцієнта опору ξ , дорівнює 20 м/с , а розміри вхідного патрубку h_1 та b і діаметр вихлопної труби $D_{\text{тр}}$ дорівнюють по $0,1 \text{ м}$.

Розв'язання

Гідравлічний опір циклонів визначають за формулою:

$$\Delta P_{\text{ц}} = \xi \rho v^2 / 2 ,$$

де $v_{\text{г}}$ – швидкість газів у довільному перерізі апарату, ξ – коефіцієнт опору,

$$\xi = 0,00513 \cdot K_1 \cdot h_1 \cdot b / D_{\text{тр}}^2 ,$$

де K_1 – коефіцієнт, що дорівнює 16 для циклонів з тангенціальним входом газу; h_1 та b – розміри вхідного патрубку; $D_{\text{тр}}$ – діаметр вихлопної труби. Тоді формула для розрахунку гідравлічного опору матиме наступний вигляд

$$\Delta P_{\text{ц}} = 0,00513 \cdot 16 \cdot 0,1 \cdot 0,1 \cdot \rho v^2 / 2 D_{\text{тр}}^2 .$$

Підставляючи у формулу чисельні дані та враховуючи, що густина повітря при нормальних умовах дорівнює $\rho = 1,29 \text{ кг/м}^3$, отримаємо

$$\Delta P_{\text{ц}} = 0,00513 \cdot 16 \cdot 0,1 \cdot 0,1 \cdot 1,29 \cdot 400 / 2 \cdot 0,01 = 21 \text{ (Па)}$$

Відповідь: гідравлічний опір дорівнює 21 Па .

Приклад 1.20

Який ступінь очищення газів від дисперсних часток в електрофільтрі, якщо концентрація золи до входу і виходу з пристрою становить 30 г/см^3 та

0,3 г/см³ повітря відповідно?

Розв'язання

Ступень очистки η газів від дисперсних частинок визначається вмістом частинок в газі до поступлення в електрофільтр і після виходу з нього за формулою

$$\eta = \frac{Z_1 - Z_2}{Z_1} = 1 - \frac{Z_2}{Z_1},$$

де Z_1, Z_2 – концентрація частинок золи до входу та після виходу з апарата.

Підставляючи в цю формулу дані умови задачі, отримаємо

$$\eta = 1 - \frac{0,3 \text{ г/см}^3}{30 \text{ г/см}^3} = 0,99$$

Відповідь: ступень очистки газів від дисперсних частинок 99 %.

Приклад 1.21

Як зміниться ступень очистки газів в електрофільтрі з пластинчастими електродами, якщо довжину електрофільтра збільшити з 7,5 м до 12 м при інших незмінних параметрах.

Розв'язання

Ступень очистки η газів в електрофільтрі

$$\eta = 1 - e^{-\chi v f},$$

Отже, $f = \tau / d$, де τ є часом, протягом якого газ перебуває в електрофільтрі. Цей час, τ , визначається як l / u , де l – довжина електрофільтра, а u – швидкість газу.

Тобто $f = l/ud$ і ступень очистки димових газів росте із збільшенням довжини електродів.

$$l_2 = 12 \cdot l_1 / 7,5 = 1,6 \cdot l_1$$

Звідси: $f_1 = l_1/ud$, а : $f_2 = l_2/ud = 1,6 \cdot f_1$

$$\eta_1 = 1 - e^{-\chi v f_1};$$

$$\eta_2 = 1 - e^{-\chi v f_2} = 1 - e^{-\chi v 1,6 f_1} = e^{1,6}$$

$$\eta_2 = 1 + (\eta_1 - 1)$$

Відповідь: ступень очистки димових газів росте із збільшенням довжини електродів згідно з залежністю $\eta_2 = 1 + (\eta_1 - 1)$.

Завдання для самостійного розв'язання

1.1 Припускаючи, що температура повітря та прискорення вільного падіння не залежать від висоти, визначити, на якій висоті над рівнем моря густина повітря вдвічі менша за її значення на рівні моря. Температура повітря $0\text{ }^{\circ}\text{C}$.

1.2 Враховуючи, що температура повітря стала і дорівнює $t = 15\text{ }^{\circ}\text{C}$, визначити тиск повітря на висоті $h = 1300\text{ м}$ над рівнем моря. Молярна маса повітря $\mu = 0,029\text{ кг/моль}$. Тиск повітря на рівні моря $p_0 = 101,3\text{ кПа}$.

1.3 Кисень масою 12 кг охолоджують від $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$. При цьому тиск збільшується від 1 до 60 бар . Обчисліть зміну ентропії, якщо молярна ізобарна теплоємність кисню становить $29,2\text{ Дж/(моль}\cdot\text{K)}$.

1.4 Визначити потенційну температуру повітря, молекулярно-кінетична температура якого $6,0\text{ }^{\circ}\text{C}$, тиск $820,0\text{ гПа}$. Чому в даному випадку потенційна температура повітря вища за молекулярно-кінетичну?

1.5 У землі температура $20,0\text{ }^{\circ}\text{C}$, тиск 1000 гПа , точка роси $0,7\text{ }^{\circ}\text{C}$. Знайти тиск і температуру на рівні конденсації та її висоту.

1.6 Фреон, холодоагент холодильних систем, витікаючи, потрапляє в атмосферу, де піддається впливу світлового потоку потужністю 1500 кВт з ККД $40\text{ \%}$. Визначити масу фреону COCl_2 (в кг), що утвориться за 15 хв , якщо енергія зв'язку C-Cl , яка розривається в основі процесу, становить $3,04\text{ еВ}$, а квантовий вихід реакції – $0,9$.

1.7 Знайти температуру, яку прийме повітря з ненасиченою парою при температурі $2,7\text{ }^{\circ}\text{C}$, якщо її тиск адіабатичне зменшується від $970,0$ до $822,0\text{ гПа}$.

1.8 Кисень перебуває за температури 300 К та тиску $1,00\cdot 10^5\text{ Па}$. Необхідно обчислити середню довжину вільного пробігу молекул кисню. Ефективний діаметр молекул кисню становить $d=0,35\text{ нм}$.

1.9 Під час зондування атмосфери отримано:

$P\text{ гПа}$	1000	890	800	710	600
$t^{\circ}\text{C}$	15,0	2,0	-6,0	-13,0	-20,7

Знайти по діаграмі тиск на рівні конвекції ($P_{\text{конв}}$) (вирівнювання температур) та висоту цього рівня ($Z_{\text{конв}}$) для одиничного об'єму сухого повітря, що почало свій підйом; а) без перегріву щодо навколишньої атмосфери, б) для об'єму повітря, перегрітого на початковому рівні на 5°C .

1.10 Як змінюються специфічні поверхні порошкових левоміцетинів від трьох виробництв, якщо їхня дисперсність частинок становить 0,0461; 0,0476; 0,0565 мкм^{-1} відповідно? Частинки сферичні, щільність 1,52 г/см^3 .

1.11 На скільки дисперсність частинок сульфадимезину, що подрібнений у струменевому млині, перевищує дисперсність фармакопейного сульфадимезину, якщо питомі поверхні їх порошоків становлять 3800 та 230 $\text{м}^2/\text{кг}$ відповідно? Припускаємо сферичну форму частинок та щільність 1,80 г/см^3 .

1.12 У приміщенні об'ємом 200 м^3 концентрація вуглекислого газу (CO_2) у повітрі складає 0,3 %. Вентиляційна система подає 25 м^3 повітря за хвилину, де вміст CO_2 дорівнює 0,04 %. За який проміжок часу кількість вуглекислого газу в кімнаті зменшиться вдвічі?

1.13 Визначити величину сили Стокса, що впливає на алюмінієву сферичну частинку, яка рівномірно опускається в повітрі.

1.14 Яка швидкість падіння частинки алюмінію в повітрі, за якої сила тяжіння дорівнює силі Стокса?

1.15 Розрахувати площу зони можливого хімічного ураження та час досягнення населеного пункту (на відстані 20 км) хмарою зараженого повітря внаслідок аварійного виливу аміаку (об'ємом 150 т) при швидкості вітру 4 м/с .

1.16 При якій лінійній швидкості повітряного потоку у циклоні з радіусом 0,1 м відцентрова сила, що впливає на частинки пилу, буде відповідати силі тяжіння?

1.17 Визначити силу Стокса, яка діє на сферичну частинку з радіусом 0,5 мм, що падає в повітрі з константною швидкістю 0,5 м/с .

1.18 Яка лінійна швидкість повітряного потоку в циклоні з радіусом 0,2 м необхідна, щоб відцентрова сила, що впливає на частинки пилу, зрівнювалася із силою тяжіння?

1.19 Якщо в циклоні лінійна швидкість повітряного потоку становить $v=1$ м/с, а відцентрові сили, що впливають на частинки пилу, дорівнюють силам тяжіння, обчисліть радіус циклона.

1.20 Визначити величину відцентрової сили в циклоні з радіусом 0,1 м, що діє на частинки пилу з густиною $2 \cdot 10^3$ кг/м³ та радіусом 0,5 мм, які рухаються зі швидкістю 2 м/с.

1.21 Обчислити число Рейнольдса (Re), яке характеризує падіння дощової краплі, що має діаметр $d=0.5$ мм, знаючи динамічну в'язкість повітря, що складає 12 мкПа·с.

1.22 Розрахуйте швидкість $W_{\text{ч}}$ гравітаційного осадження дисперсної частинки з діаметром 20 мкм у повітрі. Густина матеріалу частинки дорівнює 1 г/см³, абсолютна температура – 293 К, в'язкість повітря становить $1,82 \cdot 10^{-4}$ пуази.

1.23 З'ясуйте концентрацію шкідливої речовини q в повітрі приміщення, якщо відомо, що кількість виділених шкідливих речовин у приміщенні $G = 0,3$ мг/м³, гранично допустима концентрація шкідливих речовин $q_{\text{пдк}} = 2$ мг/м³, об'єм приміщення $V_{\text{п}} = 500$ м³, а кратність повітрообміну $K = 5$.

1.24 Обчисліть гідравлічний опір циклона з тангенціальним входом, за умови, що швидкість повітря v у вибраному перерізі апарата, для якого розраховується величина коефіцієнта опору ξ , дорівнює 15 м/с, а розміри вхідного патрубку h_1 та b складають по 0,05 м, та діаметр вихлопної труби $D_{\text{тр}}$ дорівнює 0,1 м.

1.25 Визначте відсоток очищення газів від дисперсних частинок в електрофільтрі, враховуючи концентрації частинок золи на вході та виході з апарата, які відповідно дорівнюють 30 г/см³ та 0,3 г/см³ повітря.

1.26 Як зміниться ступінь очищення газів в електрофільтрі, якщо довжина електрофільтра буде подвоєна, за умови незмінності інших параметрів?

РОЗДІЛ 2

ФІЗИКО-ХІМІЧНІ ПРОЦЕСИ У ГІДРОСФЕРІ ТА ҐРУНТАХ. ФІЗИЧНІ МЕТОДИ ТА ТЕХНОЛОГІЇ ОЧИЩЕННЯ ВОДНИХ ОБ'ЄКТІВ ПРИРОДНОГО СЕРЕДОВИЩА ТА ҐРУНТІВ

Для створення замкнутих систем водопостачання промислові стічні води очищають до необхідної якості застосовуючи механічні, хімічні, фізико-хімічні, біологічні та термічні методи. Ці методи поділяються на рекупераційні та деструктивні.

Рекупераційні методи передбачають вилучення зі стічних вод та подальшу переробку усіх цінних речовин. У деструктивних методах забруднюючі речовини руйнують шляхом окислення або відновлення, а продукти руйнування видаляють з води у вигляді газів або опадів.

Основні методи очищення різної природи застосовуються як для очищення стічної води від різних домішок, так і для видалення розчинених домішок. В свою чергу, перша група очищення гетерогенних систем поділяється на методи очищення від грубодисперсних домішок, включаючи відстоювання, проціджування, фільтрацію, флотацію, відцентрове осадження; і на методи очищення від дрібнодисперсних домішок шляхом коагуляції, флокуляції та електрофлотації.

Механічні методи видалення завислих частинок зі стічних вод ґрунтуються на законах гідромеханічних процесів. Фізико-хімічні методи очищення стічних вод використовують для видалення з них тонкодисперсних твердих і рідких частинок, розчинних газів, мінеральних та органічних речовин. Механізми цих методів засновані на застосуванні законів фізико-хімічної гідромеханіки, фізичної та колоїдної хімії, електрохімії, а також процесів хімічної технології.

Рівняння гідродинаміки усталеного руху ідеальної рідини, що не стискається, яке передає зміст рівняння збереження механічної енергії, – це рівняння Бернуллі [8, 9]:

$$P + \frac{\rho v^2}{2} + \rho gh = const, \quad (2.1)$$

де ρ – густина рідини, v – швидкість руху рідини у даному перерізі труби, h – висота даного перерізу над деяким рівнем і P – тиск.

Рівняння Бернуллі показує, що швидкість рідини, яка витікає крізь малий отвір, дорівнює:

$$v = \sqrt{2gh} ,$$

де h – висота поверхні рідини над отвором.

Так як крізь будь-який переріз труби проходять рівні об'єми рідини, то

$$S_1 \cdot v_1 = S_2 \cdot v_2 ,$$

де v_1 і v_2 – швидкості рідини в двох перерізах труби площиною поперечного перерізу S_1 і S_2 . Закон Архімеда:

$$F_A = \rho_1 V g \quad (2.2)$$

де F_A – сила Архімеда; ρ_1, ρ_2 – густина рідини і твердої фази частинки, m – маса частинки.

$$m = \rho_2 V = \rho_2 \frac{\pi d^3}{6}$$

При обтіканні або ж при падінні частинки, що має діаметр d , у рідині, на неї чиниться сила опору Стокса.

$$F = 3\pi\eta dv \quad (2.3)$$

2.1 Відстоювання стічних вод

Відстоювання стічних вод згідно з санітарними нормами очищення води [18, 21-23, 26-28] здійснюється у відстійниках, що мають вигляд прямокутних резервуарів, схожих на звичайні басейни. Вода переміщується від одного краю відстійника до іншого. Глибина відстійника, як правило, становить від 1,5 до 4 м, довжина 12 - 48 м, ширина каналу 3 - 6 м [1, 2, 3].

Для усунення завислих частинок із стічних вод застосовують періодичні

та безперервні гідромеханічні процеси проціджування, гравітаційного та відцентрового відстоювання, а також фільтрування. Вибір методу визначається розміром частинок домішок, фізико-хімічними властивостями, концентрацією завислих частинок, об'ємом стічних вод та необхідним рівнем очищення.

Перш ніж перейти до більш тонкого очищення, стічні води направляють на проціджування через решітки та сита, котрі розташовують перед відстійниками, щоб видалити з них великі домішки.

Відстоюванням називають розподіл рідких неоднорідних систем шляхом відокремлення з рідкої фази твердих або рідких завислих частинок під дією сили тяжіння або відцентрової сили. Осадження відстоюванням відбувається під впливом сили тяжіння.

Розглянемо переміщення кульки під впливом сили тяжіння у в'язкій рідині.

При рівномірному русі за другим законом Ньютона

$$mg - F_A - F = 0, \quad (2.4)$$

де маса кульки $m = \rho_2 V = \rho_2 \frac{\pi d^3}{6}$; сила Архімеда $F_A = \rho_1 V g = \rho_1 \cdot g \frac{\pi d^3}{6}$; сила опору

$F = 3\pi\eta dv$ за законом Стокса. Підставляючи рівняння (2.2)-(2.3) в (2.4), після нескладних перетворень отримаємо

$$18\eta v = d^2 g (\rho_c - \rho_1),$$

звідки

$$v = \frac{d^2 g (\rho_2 - \rho_1)}{18\eta}. \quad (2.5)$$

Формула Пуазейля, відома як (2.5), визначає швидкість, з якою частинка осідає у в'язкому середовищі. Такий процес називають седиментацією. Напрямок руху змінюється, коли $\rho_1 > \rho_2$ змінюються місцями.

Фізичне моделювання таких явищ вкрай важливе під час розрахунків систем водопідготовки, щоб покращити їхню функціональність.

Осідання монодисперсної суспензії під впливом гравітаційних сил

Розгляньмо процес очищення води від суспензії твердих монодисперсних часточок у прямокутній посудині заввишки h і площею дна S . Якщо густина матеріалу частинок більша за густину води, тоді під дією сили тяжіння всі частинки суспензії рухаються вниз і за одиницю часу ($1c$) проходять шлях, який дорівнює $X=V_S \cdot 1c$. За цей час повністю очищується верхній шар посудини завтовшки X , а на дно посудини за час Δt випадають частинки, кількістю

$$\Delta N = n \cdot V_S \cdot S \cdot \Delta t, \quad (2.6)$$

де V_S – швидкість гравітаційного осадження частинок, яка визначається формулою Пуазейля (2.5).

Розрахунки відстійників. Відстоювання стічних вод реалізують в установках, що звуться відстійниками або згущувачами.

Виділяють горизонтальні, радіальні, вертикальні, трубчасті, пластинчасті відстійники зі скошеними перегородками. Горизонтальні відстійники – це прямокутні резервуари, які мають два або більше відділень, що працюють одночасно. Вода переміщується з одного краю відстійника до протилежного. Горизонтальні відстійники використовуються при витраті стічної води понад 15000 м^3 на добу. Ефективність відстоювання може сягати 60 %.

Відстійники проектується з розрахунком на осідання найменших частинок, що присутні у стічній воді. З огляду на це, час перебування стічної води в установці повинен перевищувати час осідання крейджаних частинок, або бути співмірним із часом, потрібним для обмеженого осідання частинки меншого розміру на дно установки з визначеної висоти.

Продуктивність відстійника по очищеній воді $Q_{оч}$ ($\text{м}^3/\text{с}$) визначається рівнянням

$$Q_{очв} = v_n \cdot B \cdot H; \quad (2.7)$$

де v_n – швидкість потоку стічної води уздовж апарату, $\text{м}/\text{с}$; B – ширина відставника, м ; H – висота шару освітленої води, м .

Швидкість розділення неоднорідних систем у полі відцентрової сили перевищує швидкість розділення тих самих систем у полі гравітації.

Відношення відцентрової сили до сили тяжіння можна встановити, порівнюючи прискорення частинок домішок у відцентровому та гравітаційному полях, оскільки для частинки фіксованої маси сили пропорційні прискоренням.

Хімічні методи використовуються для усунення розчинених речовин у замкнених системах водопостачання. Біохімічні методи застосовуються для очищення господарсько-побутових та промислових стічних вод від розчинених органічних і неорганічних речовин. Процес біохімічної очистки базується на здатності мікроорганізмів використовувати забруднюючі речовини як джерело живлення в процесі своєї життєдіяльності.

До фізико-хімічних методів очистки належать коагуляція, флотація, адсорбція, іонний обмін, екстракція, ректифікація, випаровування, дистиляція, зворотний осмос та ультрафільтрація, кристалізація, десорбція та інші. Ці методи застосовують для видалення з стічних вод тонкодисперсних завислих твердих та рідких частинок, розчинних газів, мінеральних та органічних речовин [1, 2]. До фізико-хімічних методів обробки забрудненої води відносять методи коагуляції, флотації, хлорування та озонування, опромінення ультразвуком та ультрафіолетовим випромінюванням.

Для очищення води від нафтопродуктів застосовують гідроциклони, фільтри, флотаційні апарати, де, залежно від складу та концентрації води, здійснюється її очищення (відстоюванням, відділення твердих частинок у циклонах, фільтрація).

Коагуляція – це процес злипання дрібних дисперсних частинок та їх об'єднання в агрегати в результаті взаємодії.

Відповідно до закону Стокса, швидкість осідання частинок збільшується зі збільшенням їх розміру. Тому для прискорення відстоювання використовують явище коагуляції частинок. За допомогою коагулянтів, що вводяться в суспензію, під впливом молекулярних сил відбувається злипання дрібних частинок у великі конгломерати (пластівці, флокули).

Ефективність процесу коагуляції є максимальною при видаленні з води колоїдних частинок, тобто частинок розміром від одного до ста мкм.

Флокуляцією є процес злипання розсіяних у розчині частинок у присутності високомолекулярних речовин. Ці високомолекулярні речовини називаються флокулянтами. Флокуляція відрізняється від коагуляції тим, що під час флокуляції агрегація відбувається внаслідок взаємодії молекул високомолекулярних сполук – флокулянтів, адсорбованих на поверхні дисперсних частинок.

Флотація – це процес на межі газ-рідина, коли відбувається прилипання розсіяних завислих частинок до поверхневої плівки на межі газ-рідина. Тобто, флотація базується на поверхневих явищах та молекулярних силах на поверхні розділу двох фаз.

Термічні методи використовують для знешкодження стічних вод, що містять мінеральні солі. Вибір методу очищення залежить від санітарних та технологічних вимог до якості води, об'єму стічних вод, наявності необхідних енергетичних і матеріальних ресурсів, ефективності знешкодження.

Зворотний осмос та ультрафільтрація – це процеси фільтрування розчинів крізь напівпроникні мембрани, які вибірково пропускають розчинник та повністю або частково затримують молекули розчинених речовин під тиском, що перевищує осмотичний тиск.

В основі цих методів лежить феномен осмосу – перехід розчинника (води) в розчин через напівпроникну мембрану.

Тиск π в розчині, що змушує розчинник проходити крізь мембрану, зветься осмотичним. Створивши над розчином тиск P_1 , який дорівнює осмотичному, осмос зупиняється і настає стан рівноваги. Якщо над розчином створити надлишковий тиск P_2 , що більший за осмотичний тиск π на величину Δp , то перехід розчинника відбуватиметься у зворотному напрямку. Величина осмотичного тиску π (в Паскалях) для розчинів обчислюється за рівнянням Вант-Гоффа:

$$\pi = \beta R T C / M$$

2.2 Фільтрування осадів стічних вод

Фільтрація необхідна для відокремлення з відпрацьованої води найдрібніших твердих чи рідких частинок. Розділення здійснюється за допомогою пористих або зернистих роздільників, що пропускають рідину, але затримують дисперсну фазу. Процес відбувається під впливом гідростатичного тиску стовпа рідини, підвищеного тиску над роздільником або вакууму за ним. Вибір роздільників визначається властивостями стічних вод, температурою, тиском під час фільтрації та конструкцією фільтрувального пристрою.

Як роздільники використовуються металеві перфоровані листи та сітки, тканинні перегородки з натурального, штучного та синтетичного волокна. Фільтрувальні перегородки повинні мати мінімальний гідравлічний опір, достатню механічну міцність, хімічну стійкість, не повинні набухати або руйнуватися за вказаних умов фільтрації.

Різницю тисків по обидва боки фільтрувальної перегородки створюють різними способами. Або простір над суспензією сполучають з джерелом стиснутого газу, або ж простір під фільтрувальною перегородкою з'єднують з вакуумним насосом, тоді відбувається фільтрування за сталої різниці тисків.

При цьому швидкість процесу зменшується через збільшення опору шару осаду, що товщає. Коли суспензія подається на фільтр поршневим насосом з постійною продуктивністю, відбувається процес фільтрування, при якому різниця тисків зростає внаслідок збільшення опору шару осаду, що товщає.

Якщо суспензія подається на фільтр відцентровим насосом, продуктивність якого зменшується зі збільшенням опору осаду, що спричиняє підвищення різниці тисків, відбувається процес фільтрування зі змінними різницями тиску та швидкості.

Фільтрування проводять за таких перепадів тиску:

- під вакуумом – $5 \cdot 10^4 \dots 9 \cdot 10^4$ Па;

- під тиском стисненого повітря – не більше $3 \cdot 10^5$ Па;
- при подачі поршневим або відцентровим насосом – до $5 \cdot 10^5$ Па;
- під гідростатичним тиском – до $5 \cdot 10^4$ Па.

У технології знезараження питної води застосовують фільтри з активованим вугіллям.

2.3 Конвективно-дифузійний механізм поширення домішок у водному середовищі

Фізичні явища, що супроводжують переміщення радіонуклідів у водному середовищі, включають гравітаційне осадження дисперсних частинок або їхнє спливання під впливом сили Архімеда, дію сили Коріоліса, а також включають процес броунівської дифузії дисперсних частинок, що можуть призвести до їхньої коагуляції.

Конвективно-дифузійний механізм розподілу домішок у водному середовищі передбачає перенесення забруднюючої речовини внаслідок поєднання конвекції та дифузії у воді.

Потік маси води визначається вектором.

$$\vec{J}_v = \vec{v} \cdot C.$$

Переніс може здійснюватися течією річки або морськими течіями. В цьому випадку він носить назву адвективного.

Молекулярний перенос маси $\vec{J}$ здійснюється під дією градієнта концентрації (закон Фіка), градієнта температури (закон Соре) та градієнта тиску P:

$$\vec{J} = -D \text{grad} C - K_T \text{grad} T - K_P \text{grad} P ,$$

де K_T – термодифузійний коефіцієнт, бародифузійний коефіцієнт, пов'язаний із зміненням хімічного потенціалу в ізотермічному процесі.

Основне рівняння в конвективно-дифузійній моделі, що охоплює перелічені вище механізми, має вигляд:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -\nabla(vC) + D(\nabla^2 C + \frac{K_T}{T} \nabla^2 T + \frac{K_P}{P} \nabla^2 P) + I, \quad (2.8)$$

де: C – концентрація домішки, t – час, v – швидкість конвекції (переміщення середовища), I – джерела або стоки забруднення (наприклад, викиди з джерела), D – коефіцієнт дифузії.

Визначимо розподіл концентрації речовини вздовж заданого напрямку, який визначається водним потоком (морською течією чи річкою) за певних крайових умов. Припустимо, що викид речовини здійснюється з циліндричної трубки, розміщеної вздовж потоку. Прийmemo, що адвективний (молярний) механізм перенесення маси переважає над молекулярним. Тобто, $\vec{j}_v \gg \vec{j}$.

Підґрунтям для цього є мізерність величин коефіцієнтів дифузії. Значення коефіцієнтів дифузії для водних розчинів вважатимемо за даними [1], вони сягають порядку $10^{-9} \text{ м}^2/\text{с}$. Для завислих частинок розміром 0,1 мкм величину коефіцієнта дифузії візьмемо порядку $10^{-10} - 10^{-11} \text{ м}^2/\text{с}$ за даними [10].

Припустимо, що під час витікання речовини зі швидкістю u з труби радіуса R , в ній після вирівнювання швидкостей потоків (v) та (u) формується трубка струму радіусом r , крізь бокову поверхню якої відбувається молярна дифузія.

Задля спрощення знехтуємо молекулярним перенесенням, термодифузією та бародифузією й запишемо рівняння перенесення маси у такому вигляді

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -\nabla(vC) + I, \quad (2.9)$$

У якості крайових умов покладемо, що на поверхні трубки струму механізм масообміну є виключно молярним і густина потоку домішки має вигляд

$$j|_r = \beta(C - C_0)$$

та при $C_0=0$:

$$j|_r = \beta C,$$

де β - коефіцієнт масообміну.

Внаслідок стаціонарності усталеного процесу $\frac{\partial C}{\partial t} = 0$.

Направимо вісь ОХ системи координат Декарта вздовж потоку води. Тоді в циліндричних координатах з віссю ОХ у якості циліндричної осі з урахуванням радіальної симетрії:

$$\text{grad}C = \frac{\partial C}{\partial r} \vec{e}_r + \frac{\partial C}{\partial x} \vec{e}_x$$

$$\text{div} \vec{j} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \vec{j}) + \frac{\partial j}{\partial x}$$

Для $j = \beta C$:
$$\text{div} \vec{j} = \frac{\beta C}{r} + \beta \frac{\partial C}{\partial x}$$

З урахуванням наведених виразів при що $\beta \ll v$ рівняння (2.9) у випадку радіоактивної домішки ($I=\lambda C$) отримає вигляд:

$$v \frac{\partial C}{\partial x} = -\frac{\beta C}{r} - \lambda C, \quad (2.10)$$

де λ – постійна радіоактивного розпаду.

Коефіцієнт масообміну β може бути визначено з критеріального співвідношення

$$Nu_D = \frac{\beta r}{D}.$$

Тоді на великих відстанях від місця викиду розв'язок рівняння (2.10) можна представити

$$C = C_0 e^{-\frac{x}{v}(b+\lambda)} \quad (2.11)$$

де b – фактор розбавлення,

$$b = \frac{\beta}{r} = \frac{Nu_D \cdot D}{r^2}$$

Отже, зміна концентрації радіонукліда у потоці відбувається за експоненціальним законом, показник степені якого визначається параметром, що є сумою константи розпаду λ і швидкості масообміну β .

2.4 Знешкодження мінералізованих стоків. Методи захисту літосфери

У цьому розділі важливо зосередити увагу на питаннях переробки твердих відходів та утилізації сміття.

Утилізація твердих відходів передбачає їх розділення на складові з подальшими переробкою розсортованих матеріалів та наданням їм конкретної форми.

Після подрібнення та сортування, відходи трансформуються у вироби, готові до подальшого використання. Твердий матеріал може бути подрібнений до частинок потрібного розміру шляхом роздавлювання, розколювання, розламування, різання, розпилювання, стирання та різних комбінацій цих методів.

Студентам слід розглянути проблему металобрухту в довкіллі, причини забруднення металами та методи його утилізації.

Водночас слід звернути увагу на методи знешкодження та захоронення твердих промислових відходів, на рівень токсичності усіх твердих промислових відходів, враховуючи їхній вплив на ґрунти, підземні води, атмосферу та здоров'я людини.

Потрібно підкреслити, що низькотемпературний та високотемпературний піроліз є перспективними напрямками термічної обробки твердих промислових відходів, що дозволяє успішно використовувати піролізні продукти як сировину для виробництва органічного синтезу або як паливо.

Потрібно розглянути питання методів та принципів захисту літосфери, пов'язуючи їх з питаннями фізики ґрунтів та фізики гранульованих систем. Це питання тісно пов'язане з численними проблемами забруднення ґрунту промисловими та побутовими відходами, питаннями будівництва сміттєпереробних заводів, хімічним та радіаційним забрудненням внаслідок аварій на підприємствах хімічної промисловості та ядерних технологій.

Приклади розв'язання задач

Приклад 2.1

Знайти швидкість гравітаційного осідання дисперсної частинки діаметром $d = 60$ мкм у воді. Густина речовини частинки становить 2 г/см^3 , абсолютна температура – 293 К .

Розв'язання:

Швидкість гравітаційного осідання дисперсної частинки визначимо за формулою Пуазейля (2.5):

$$v = \frac{d^2 g (\rho_c - \rho_m)}{18\eta}.$$

В'язкість води за температури 293 К становить $1,0019 \cdot 10^{-3} \text{ Па} \cdot \text{с}$.

Вносячи у формулу Пуазейля числові значення, обчислюємо, що швидкість осідання часточок розміром 60 мкм дорівнює.

$$v = \frac{d^2 g (\rho_c - \rho_m)}{18\eta} = 0,2 \cdot 10^{-2} \text{ м/с}.$$

Відповідь: швидкість гравітаційного осадження дисперсної частинки діаметром $d = 60$ мкм у воді дорівнює $0,2 \cdot 10^{-2} \text{ м/с}$.

Приклад 2.2

Кулька спливає з фіксованою швидкістю v у рідині, густина якої у 4 рази перевищує густину матеріалу кульки. У скільки разів сила тертя F , що впливає на кульку, котра спливає, більша за силу тяжіння mg , що діє на неї?

Розв'язання:

Запишемо рівняння руху кульки у вигляді (2.4)

$$F_A - mg - F_{mp} = 0,$$

Сила Архімеда та маса частинки дорівнюють:

$$\begin{aligned} F_A &= \rho_1 V g \\ m &= \rho_2 V \end{aligned}.$$

Звідси $V = \frac{m}{\rho_2}$, тоді силу Архімеда можна записати

$$F_A = 4\rho_2 \frac{m}{\rho_2} g = 4mg .$$

Підставимо цей вираз для сили Архімеда в рівняння (2.4) і отримаємо

$$F_{mp} = 3mg ,$$

Остаточно знайдемо відношення сили опору до сили тяжіння

$$\frac{F_{mp}}{mg} = 3.$$

Відповідь: Сила тертя у 3 рази більше сили тяжіння.

Приклад 2.3

У посудині, заповненій трансформаторною оливою, густина якої 950 кг/м³, а динамічна в'язкість дорівнює 1,0 Па·с, опускається сталеві кулька. Враховуючи, що закон Стокса дійсний при числі Рейнольдса < 0,5 (за умови використання діаметра кульки D під час розрахунку Re), визначити граничне значення діаметра D кульки. Густина сталі 7,9 кг/м³.

Розв'язання:

Оскільки кулька рухається з постійною швидкістю, тоді, відповідно до другого закону Ньютона $mg - F_A - F = 0$, де маса кульки $m = \rho_c V = \rho_c \frac{\pi d^3}{6}$; сила

Архімеда $F_A = \rho_m V g = \rho_m \cdot g \frac{\pi d^3}{6}$; сила опору оливи $F = 3\pi\eta dv$ за законом Стокса.

Рівняння руху: $18\eta v = d^2 g (\rho_c - \rho_m)$, звідки витікає формула Пуазейля

$$v = \frac{D^2 g (\rho_2 - \rho_1)}{18\eta} .$$

Число Рейнольда визначається відношенням $Re = \frac{Dv\rho_m}{\eta}$. За умовою $\frac{Dv\rho_m}{\eta} \leq 0.5$

або, з урахуванням формули Пуазейля,

$$\frac{D^3 g (\rho_c - \rho_m) \rho_m}{18\eta^2} \leq 0,5 .$$

Звідси

$$D \leq \sqrt[3]{\frac{0,5 \cdot 18\eta^2}{g\rho_m(\rho_c - \rho_m)}} .$$

Підставив чисельні дані, знайдемо, що граничний діаметр кульки $D = 5$ мм.

Відповідь: Граничний діаметр кульки $D = 5$ мм.

Приклад 2.4

Знайти швидкість спливання дисперсної частинки діаметром 60 мкм у воді. Густина речовини частинки – $0,5 \text{ г / см}^3$, абсолютна температура - 293 К.

Розв'язання:

Швидкість спливання дисперсної частинки обчислимо за формулою (2.5):

$$v = \frac{d^2 g (\rho_c - \rho_m)}{18\eta} .$$

В'язкість води при температурі 293 К становить $1,0019 \cdot 10^{-3} \text{ Па} \cdot \text{с}$.

Підставляючи відповідні значення в рівняння Пуазейля, виявимо, що швидкість осідання часточок з діаметром 60 мкм дорівнює...

$$v = \frac{d^2 g (\rho_c - \rho_m)}{18\eta} = 0,1 \cdot 10^{-2} \text{ м/с}.$$

Відповідь: швидкість гравітаційного осадження дисперсної частинки діаметром $d = 60$ мкм у воді дорівнює $0,1 \cdot 10^{-2} \text{ м/с}$.

Приклад 2.5

За який час у посудині з водою висотою 1,0 м, під впливом гравітаційних сил, відбувається повне осідання монодисперсної суспензії з частинками трьох монодисперсних фракцій: 60 мкм, 20 мкм, 5 мкм, густина матеріалу яких становить 2 г/см^3 , а абсолютна температура води - 293 К? Побудувати графік залежності кількості осаджених частинок від часу.

Розв'язання:

Розглянемо процес очищення води від суспензії твердих монодисперсних частинок у прямокутній ємності заввишки $h=1\text{м}$ з площею дна S . Під дією гравітаційних сил усі частинки суспензії рухаються донизу, і за одиницю часу (1 с) проходять шлях, що дорівнює $X=V_s \cdot 1\text{с}$. За цей час повністю очищається верхній шар ємності товщиною X , а на дно ємності за час Δt випадають частинки, кількістю

$$\Delta N = n \cdot V_S \cdot S \cdot \Delta t,$$

де V_S - швидкість гравітаційного осадження частинок.

Кількість частинок в прямокутній ємності, дорівнює $N_0 = n \cdot S \cdot h$.

Кількість частинок, що через час Δt залишаються у воді, дорівнює

$$N = N_0 - \Delta N,$$

тоді

$$N = n \cdot S \cdot (h - V_S \Delta t).$$

Час повного осадження частинок дорівнює

$$\tau = h / V_S.$$

На рисунку 2.1 зображені графіки осідання монодисперсних суспензій, які мають вигляд прямих ліній.

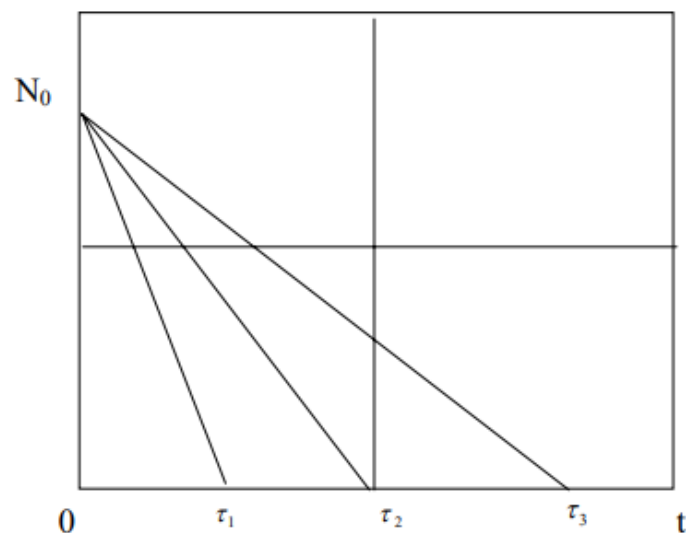


Рис. 2.1 Графіки осадження у часі 3-х монодисперсних суспензій

Частинки, діаметром d_1 , характеризуються часом осідання τ_1 , тоді як частинки з діаметром d_2 мають час осідання τ_2 . Варто зазначити, що $d_1 > d_2$. Чим більший розмір частинки (а отже, її маса), тим менший час, потрібний для осідання. Цей зв'язок має лінійний характер.

Швидкості падіння v_S для частинок фракцій 60 мкм, 20 мкм, 5 мкм становлять: $0,20 \cdot 10^{-2}$, $2,2 \cdot 10^{-4}$, $1,4 \cdot 10^{-5}$ відповідно. Час осідання розраховується як: $\tau_1 = 1/0,2 \cdot 10^{-2} = 500$ с, $\tau_2 = 1/2,2 \cdot 10^{-4} = 4545$ с, $\tau_3 = 1/1,4 \cdot 10^{-5}$

$=71,4 \cdot 10^3 \text{ с} \approx 20 \text{ годин.}$

Висновок: час осідання для частинок трьох монодисперсних фракцій дорівнює: 500 с, 4545 с та приблизно 20 годин.

Приклад 2.6

У посудину, де вже є 10 л води, постійно надходить розчин зі швидкістю 2 л за хвилину. В кожному літрі розчину міститься 0.3 кг солі. Розчин, що надходить, змішується з водою, а суміш витікає з тією ж швидкістю. Скільки солі буде в посудині через 5 хвилин?

Розв'язання:

За незалежну змінну візьмемо час t , а за функцію $y(t)$ – кількість солі в посудині через t хвилин від початку спостереження.

З'ясуємо, як зміниться кількість солі за проміжок часу від t до $t + \Delta t$. За хвилину надходить 2 л розчину, отже за Δt хвилин надійде $2\Delta t$ літрів.

У цих $2\Delta t$ літрах міститься $0,3 \cdot 2\Delta t = 0,6\Delta t$ кг солі. З іншого боку, за час Δt з посудини витікає $2\Delta t$ літрів розчину. В момент часу t у всій посудині (10 л) міститься $y(t)$ кг солі, тобто в $2\Delta t$ літрах розчину, що витікає, було б $0,2 \Delta t * y(t)$ кг солі, якби за час Δt вміст солі в посудині не змінювався.

Проте вміст змінюється на величину, що є нескінченно малою при $\Delta t \rightarrow 0$, тому у $2\Delta t$ літрах, що витікають, міститься $0,2 \Delta t (y(t) + \alpha)$ кг солі, де $\alpha \rightarrow 0$ при $\Delta t \rightarrow 0$.

Відтак, у розчині, що надходить за інтервал часу $(t, t + \Delta t)$, міститься $0,6 \cdot \Delta t$ кг солі, а у тому, що витікає – $0,2 \cdot \Delta t (y(t) + \alpha)$ кг. Приріст кількості солі за цей час, $y(t + \Delta t) - y(t)$, дорівнює різниці цих значень, тобто $y(t + \Delta t) - y(t) = 0,6 \Delta t - 0,2 \Delta t (y(t) + \alpha)$.

Поділимо на Δt і перейдемо до границі при $\Delta t \rightarrow 0$. У лівій частині отримаємо похідну $y'(t)$, а в правій – $0,6 - 0,2y(t)$, оскільки $\alpha \rightarrow 0$ при $\Delta t \rightarrow 0$.

Таким чином, отримаємо диференціальне рівняння:

$$dy/dt = 0,6 - 0,2 y(t)$$

Вирішуючи його, отримаємо:

$$y(t) = 3 - Ce^{-0,2t}$$

Оскільки при $t=0$ солі в посудині не було, то $y(0)=0$. Вважаючи $t=0$, знайдемо $y(0)=3 - C$, звідки $C=3$. Підставляючи це значення C в останнє рівняння, отримаємо

$$y(t)=3 - 3e^{-0,2t}$$

При $t=5$ у посудині буде

$$y(5)=3 - 3e^{-0,2 \cdot 5} = 3 - 3e^{-1} = 1,9 \text{ кг.}$$

Відповідь: у посудині залишиться 1,9 кг солі.

Приклад 2.7

В процесі розділення рідини її поміщають в циліндричний контейнер, котрий після цього обертають зі сталою кутовою швидкістю ω . Довести, що відкрита поверхня рідини, котра перебуває під сталим тиском, отримає форму параболоїда обертання.

Розв'язання:

Візьмемо до уваги незначний елемент об'єму рідини неподалік поверхні. Його потенціальна енергія на одиницю об'єму дорівнює

$$V = \rho g y - \frac{\rho \omega^2 x^2}{2}$$

Рівняння поверхні отримаємо, прирівнявши потенціальну енергію константі (у разі через спеціального вибору початку координат ця константа дорівнює нулю). Отже,

$$y = \frac{\omega^2 x^2}{2g}$$

Відповідь: рівняння свідчить, що $y \sim x^2$, тобто поверхня рідини утворює параболоїд.

Приклад 2.8

При очищенні стічних вод, витрата їх перевищує $15000 \text{ м}^3 / \text{добу}$. Якою має бути глибина відстійника, враховуючи, що швидкість течії стічної води по довжині апарату становить $0,5 \text{ м/с}$; B - ширина відстійника дорівнює 5 м , а довжина каналу $L= 50 \text{ м}$?

Розв'язання:

Висоту шару очищеної води H можливо розрахувати за формулою

$$Q_{ocb} = v_n \cdot B \cdot H,$$

$$Q_{ocb} = \frac{15000}{604800} \cdot \frac{L}{v_n} = 2,5 \text{ м}^3 / \text{с}$$

Звідси

$$H = \frac{Q_{ocb}}{v_n B} = \frac{2,5}{0,5 \cdot 5} = 1 \text{ м}$$

Якщо глибина відстійника становить 2 м, ефективність відстоювання буде сягати лише $\frac{1}{2}$, отже 50%.

Відповідь: висота шару освітленої води Н становитиме 1 м.

Приклад 2.9

Здійснити розрахунки параметрів відстійника для очищення стічної води від дисперсних часточок діаметром 5 мкм з густиною при температурах 273К та 323К. Визначити швидкість потоку стічної води вздовж апарату, якщо відома довжина каналу $L = 48$ м.

Розв'язання:

Для очищення стічної води час її перебування в апараті має бути більшим за час осадження частинок критичного діаметра або в межах часу, необхідному для осадження їх на дно апарату з заданої висоти. Тобто, для розрахунків осадження частинок з діаметром понад критичний використовуємо модель стоксівського осадження. Припускаючи, що висота шару освітленої води $H=2$ м, знайдемо час осідання частинок діаметром 5 мкм з густиною при температурах 273К та 323К.

Час повного осадження частинок дорівнює

$$\tau = h / V_s$$

При температурі $T=273$ К час осідання $\tau_{273} = 250 \cdot 10^3 \text{с} = 69$ годин, а при $T=323$ К час осідання $\tau_{323} = 40 \cdot 10^3 \text{с} = 22$ години, тобто у 3 рази менше.

Знайдемо швидкість потоку стічної води уздовж апарату, якщо відомо, що довжина каналу $L = 48$ м. Швидкість потоку стічної води уздовж апарату, дорівнюватиме

$$v_{n273} = \frac{L}{\tau_{273}} = \frac{48}{69} = 0,7 \text{ м/год}, \quad v_{n323} = \frac{L}{\tau_{323}} = \frac{48}{22} = 2,2 \text{ м/год}.$$

Розрахунки свідчать, що сезонні чи кліматичні коливання температури суттєво впливають на функціонування відстійників, де швидкість процесу повинна змінюватися втричі.

Відповідь: $v_{n273} = 0,7 \text{ м/год}$, $v_{n323} = 2,2 \text{ м/год}$.

Час осідання частинок у гравітаційних системах зменшується майже втричі, якщо температура зростає на 50 К.

Приклад 2.10

Тіло, прямуючи у воді, сповільнює свій поступ під впливом водного спротиву, що прямо пропорційний швидкості цього тіла. Початкова швидкість тіла дорівнює 1,5 м/с, а через 4 секунди його швидкість стає 1 м/с. За який часовий проміжок швидкість зменшиться до 1 см/с? Який шлях зможе подолати тіло до повної зупинки?

Розв'язання:

Сформулюємо рівняння руху:

$$\frac{dv}{dt} = kv$$

Інтеграл рівняння

$$\int_{v_0}^v \frac{dv}{v} = k \int_0^t dt$$

$$\ln \frac{v}{v_0} = kt$$

Підставимо в отримане рівняння дані задачі:

$$\ln \frac{1}{1,5} = k \cdot 4$$

Звідси

$$k = \frac{\ln 1 - \ln 1,5}{4} = \frac{\ln \frac{2}{3}}{4}$$

Швидкість

$$v(t) = \left(\frac{2}{3}\right)^{\frac{t}{4}-1}$$

Знайдемо час, за який швидкість зменшиться до 1 см/с

$$v(t)=0,001 \text{ при } t=4\left(\frac{2}{\lg 1,5} + 1\right) \approx 50 \text{ с, путь } S = \frac{6}{\ln 1,5} \approx 15 \text{ м}$$

Відповідь: швидкість впаде до 1 см/с за період 50 секунд; відстань, яку здатне подолати тіло до повної зупинки, S=15 м.

Приклад 2.11

Визначити взаємозв'язки коефіцієнта дифузії броунівських часточок у воді та температури для частинок діаметром 5 мкм, 2 мкм, 1 мкм та 0,5 мкм. Проаналізувати кінетичну стабільність гравітаційних систем очищення, розглядаючи як приклад суспензію піску у воді, або емульсію олійних частинок у воді.

Розв'язання:

Осіданню (чи спливанню) дисперсних часточок протидіє броунівський рух, який прагне зірвати механізм стоксівського осідання, забезпечуючи рівномірний розподіл частинок у всьому об'ємі. Тепловий рух молекул води впливає на швидкість осідання надзвичайно малих часточок, тобто, має бути певний мінімальний розмір частинок, котрий наближений до середньої довжини вільного пробігу молекул води. Менше цього розміру має спостерігатися хаотичний броунівський рух частинок з відхиленням від закону Стокса. Коли дисперсна фаза за нетривалий час осідає на дно або впливає на поверхню, система є кінетично нестабільною. У випадку, якщо частинки дисперсної фази досить малі, і броунівський рух повністю унеможлиблює їхнє осідання, система знаходиться у кінетично стабільному стані. За таких умов очищення системи має відбуватися дуже повільно або взагалі не відбуватися.

В'язкість води будемо визначати за довідковими даними. Розрахунки середнього броунівського зміщення частинок та коефіцієнтів дифузії виконаємо згідно класичної теорії Смолуховського, яка описує тепловий

хаотичний рух дисперсних частинок у рідині або газі:

$$\Delta x^2 = \frac{2RTt}{6\pi\eta N_A \cdot r}, \quad (2.12)$$

де Δx – середнє зміщення частинки за час t ; η - коефіцієнт в'язкості середовища; r - радіус частинки; T - температура в K^0 ; N_A - число Авогадро ($N_A=6,02 \cdot 10^{23}$ моль⁻¹); R - універсальна газова стала.

За формулою Ейнштейна для теплового руху броунівських частинок

$$\Delta x = \sqrt{2Dt}, \quad (2.13)$$

де D – коефіцієнт дифузії частинок, які перебувають у броунівському русі, t – час, за який відраховується зміщення Δx .

З порівняння формул (2.12) та (2.13) може бути знайдено коефіцієнт дифузії

$$D = \frac{RT}{3\pi\eta N_A d}, \quad (2.14)$$

де $d=2r$ - діаметр частинок.

У таблиці 2.1 представлені результати обчислень коефіцієнта броунівської дифузії для різних частинок. Аналізуючи ці дані, стає зрозуміло, що відчутні значення коефіцієнта спостерігаються виключно для частинок, чий розмір не перевищує 1 мкм.

Відповідь: Коефіцієнт броунівської дифузії демонструє значущі показники лише для частинок, розмір яких є меншим за 1 мкм.

Приклад 2.12

Розрахувати середнє переміщення броунівських частинок суспензії у воді та коефіцієнти дифузії їх у воді

Розв'язання:

Розрахунки середнього броунівського зсуву частинок і коефіцієнтів дифузії здійснимо згідно класичної теорії Смолуховського, котра описує тепловий хаотичний рух дисперсних частинок в рідині чи в газі:

$$\Delta x^2 = \frac{2RTt}{6\pi\eta N_A \cdot r}, \quad (2.15)$$

де Δx – середнє зміщення частинки за час t ; η - коефіцієнт в'язкості середовища; r - радіус частинки; T - температура в K^0 ; N_A - число Авогадро ($N_A=6,02 \cdot 10^{23}$ моль $^{-1}$); R - універсальна газова стала.

За формулою Ейнштейна для теплового руху броунівських частинок

$$\Delta x = \sqrt{2Dt}, \quad (2.16)$$

де D – коефіцієнт дифузії частинок, які перебувають у броунівському русі, t – час, за який відрховується зміщення Δx .

В таблиці 2.1 приведені дані розрахунків коефіцієнта броунівської дифузії частинок. З таблиці видно, що коефіцієнт броунівської дифузії має достатньо суттєві значення тільки для частинок розміром менше 1мкм.

Таблиця 2.1

Коефіцієнти дифузії броунівських частинок

Тем- пера- тура Т, К	В'язкіс- ть води $\eta, 10^{-3}$ Па·с	Коефіцієнт дифузії сферичних частинок діаметром d в броунівському русі у воді $D, 10^{-10} \text{ см}^2/\text{с}$			
		d=5 мкм	d=2 мкм	d=1 мкм	d=0,5 мкм
273	1,7865	30,7	76,7	153,4	306,7
278	1,5138	32,5	81,2	162,4	324,8
283	1,3037	38,4	96,0	192,0	384,0
288	1,1369	44,6	111,4	222,8	445,6
293	1,0019	51,7	129,2	258,4	516,8
298	0,8909	59,1	147,7	295,4	590,8
303	0,7982	66,8	167,0	334,0	668,1
313	0,6540	84,9	212,4	424,7	849,4
323	0,5477	99,7	249,2	498,4	996,9

З порівняння формул (2.15) та (2.16) може бути знайдено коефіцієнт дифузії

$$D = \frac{RT}{3\pi\eta N_A d}, \quad (2.17)$$

де $d=2r$ - діаметр частинок.

В таблиці 2.2 приведені дані розрахунків швидкості осадження і броунівського зміщення малих частинок.

Таблиця 2.2.

Швидкості осадження і броунівського зміщення малих частинок

Діаметр частинок $d_{\text{ч}}$, мкм	Критерій Рей-нольдса	Швидкість осадження, см/с	Броунівське зміщення за 1 с, см
20	13,2	1,2	$1,54 \cdot 10^{-4}$
6	0,366	0,11	$2,84 \cdot 10^{-4}$
2	$1,43 \cdot 10^{-2}$	$1,3 \cdot 10^{-2}$	$5,07 \cdot 10^{-4}$
0,6	$4,62 \cdot 10^{-2}$	$1,39 \cdot 10^{-3}$	$1,0 \cdot 10^{-3}$
0,2	$2,45 \cdot 10^{-5}$	$2,23 \cdot 10^{-4}$	$2,1 \cdot 10^{-3}$
0,06	$1,37 \cdot 10^{-6}$	$4,16 \cdot 10^{-5}$	$5,5 \cdot 10^{-3}$
0,02	$1,26 \cdot 10^{-7}$	$1,14 \cdot 10^{-5}$	$1,06 \cdot 10^{-2}$

Відповідь: Для частинок, що мають розмір 0,05...0,02 мкм, броунівський рух переважає шлях, пройдений частинкою під час вільного падіння, у два-три рази.

Приклад 2.13

Знайти залежність швидкості осідання дисперсних частинок у воді від їх діаметру.

Розв'язання:

Розглянемо гравітаційний механізм осідання (спливання) дисперсних частинок. На завислу у воді частинку діаметра діють сила тяжіння, що спрямована вертикально вниз:

$$G = m_q \cdot g = \pi \cdot \frac{d_q^3}{6} \cdot \rho_q \cdot g$$

та відштовхувальна (архімедова) сила, що дорівнює вазі рідини в об'ємі частинки і спрямована, відповідно, вертикально вгору,

$$A = mg = \pi \rho_0 g d_q^3 / 6 ,$$

де ρ_0 - густина води.

Рівнодіюча цих двох сил дорівнює

$$G - A = \pi \frac{d_q^3}{6} g (\rho_q - \rho_0) ,$$

де ρ_q - густина речовини частинки.

Швидкість осідання визначається з умови рівності сумарної сили, що діє, та сили опору водного середовища:

Як силу опору виберемо відому силу Стокса F_c . Вона дорівнює

$$F_c = 6\pi\eta r v.$$

Відповідну швидкість седиментації v_s знаходимо за формулою:

$$v_s = \frac{g d^2 (\rho_q - \rho_0)}{18\eta} .$$

Відповідь: швидкість седиментації пропорційна квадрату діаметра частинок.

Приклад 2.14

Обчислити, використовуючи конвективно-дифузійну модель великомасштабного перенесення забруднюючої речовини в річці, у скільки разів знизиться концентрація домішки у воді на відстані 100 км. Прийняти, що швидкість течії становить 0,5 м/с, а коефіцієнт розбавлення $b = 0.5 \cdot 10^{-5} \text{с}^{-1}$.

Розв'язання:

На великих відстанях від точки випуску забруднення розв'язок рівняння (2.10) можна зобразити.

$$C = C_0 e^{-\frac{x}{v}b}$$

де b – фактор розбавлення,

$$b = \frac{\beta}{r} = \frac{Nu_D \cdot D}{r^2}$$

Отже, коливання концентрації радіонукліда у потоці підпорядковується експоненціальному правилу, а показник ступеня залежить від швидкості потоку, віддаленості від місця скиду забруднювачів та коефіцієнту розведення.

$$\text{Звідси } \frac{C_0}{C} = e^{\frac{xb}{v}}$$

Підставляючи в останню формулу дані умови задачі, отримаємо

$$\frac{C_0}{C} = e^{\frac{100 \cdot 10^3 \cdot 0,5 \cdot 10^{-5}}{0,5}} = e^1 = 2,7 \text{ разів}$$

Відповідь: концентрація домішки у річці на відстані 100 км буде меншою у 2,7 рази.

Задачі до самостійного розв'язання

2.1 Під час очищення стічних вод, їхня витрата становить 25000 м³ на добу. Якою повинна бути глибина відстійника, якщо відомо, що швидкість руху стічної води вздовж апарату рівна 1 м/с; Ширина відстійника (В) дорівнює 5 м, довжина каналу (L) = 40 м.

2. 2 Обчисліть швидкість $W_{\text{ч}}$ гравітаційного осідання дисперсної частки з діаметром = 10 мкм у воді. Густина матеріалу частки – 2 г/см³, абсолютна температура – 293 К, в'язкість води (згідно з довідником).

2.3 Визначте швидкість $W_{\text{ч}}$ гравітаційного осідання дисперсної частки з діаметром = 20 мкм у воді. Густина речовини частинки – 3 г/см³, абсолютна температура – 293 К.

2.4 Розрахуйте швидкість спливання дисперсної частки з діаметром = 60 мкм у воді. Густина речовини частинки – 0,5 г/см³, абсолютна температура – 293 К.

2.5 Кулька рухається вгору з фіксованою швидкістю у рідині, густина якої у 4 рази перевищує густину матеріалу кульки. У скільки разів сила тертя, що впливає на плаваючу кульку, переважає вагу цієї кульки?

2.6 Сталева кулька, діаметром 1 мм, падає зі сталою швидкістю 0,185 см/с в ємності, заповненій олією. Визначити в'язкість олії.

2.7 Суміш свинцевих дробинок діаметром 3 мм та 1 мм помістили в бак з гліцерином, глибина якого 1 м. На скільки пізніше досягнуть дну дробинки меншого діаметра, порівнюючи з дробинками більшого діаметра? Динамічна в'язкість за температури експерименту $1,47 \text{ Па} \cdot \text{с}$

2.8 Коркова кулька з радіусом 5 мм спливає в ємності, наповненій касторовою олією. Чому дорівнюють динамічна та кінематична в'язкості олії за умов експерименту, якщо кулька рухається з фіксованою швидкістю $3,5 \text{ см/с}$?

2.9 Сталева кулька падає у великій ємності з трансформаторною оливою, густина якої $\rho = 900 \text{ кг/м}^3$ та динамічна в'язкість $0,8 \text{ Па} \cdot \text{с}$. Припускаючи, що закон Стокса справедливий при $Re \leq 0,5$ (якщо при обчисленні Re за величину D взяти діаметр кульки), обчислити граничне значення діаметра кульки.

2.10 У днищі циліндричної посудини є круглий отвір діаметром $d = 1 \text{ см}$. Діаметр посудини $D = 0,5 \text{ м}$. Знайти залежність швидкості v зниження рівня води в посудині від висоти цього рівня. Знайти чисельне значення цієї швидкості при висоті $h = 0,2 \text{ м}$.

2.11 При відстоюванні стічних вод витрата їх складає $20000 \text{ м}^3 / \text{добу}$. Якою повинна бути швидкість потоку стічної води уздовж апарату, якщо відомо, що глибина відстійника дорівнює 4 м ; B - ширина відстійника дорівнює 5 м , довжина каналу $L = 40 \text{ м}$.

2.12 Знайти швидкість $W_{\text{ч}}$ гравітаційного осадження дисперсної частинки діаметром $d = 20 \text{ мкм}$ у воді. Густина речовини частинки - 3 г / см^3 , абсолютна температура - 293 К . Динамічна в'язкість води дорівнює $0,001 \text{ Н} \cdot \text{с/м}^2$.

2.13 Враховуючи, що ламінарність течії води у циліндричній трубі має місце при $Re < 2200$, показати, при яких значеннях швидкості вона зберігається для труби діаметром 1 см . Динамічна в'язкість води дорівнює $0,001 \text{ Н} \cdot \text{с/м}^2$

2.14 Крізь перетин труби проходить $0,2 \text{ л}$ води. При якому граничному значенні діаметра труби рух води залишається ламінарним? Динамічна в'язкість води дорівнює $0,001 \text{ Н} \cdot \text{с/м}^2$

2.15 Діаметр перетину труби складає 0,02 м. При якому граничному значенні швидкості рух води залишається ламінарним? Динамічна в'язкість води дорівнює $0,001 \text{ Н}\cdot\text{с}/\text{м}^2$

2.16 Важливою фізико-хімічною характеристикою порошку є його питома поверхня. Від неї залежить стабільність при зберіганні, здатність до пресування і швидкість розчинення порошку. Як відрізняються питомі поверхні порошків левоміцетину, що випускається трьома заводами, якщо дисперсності частинок відповідно рівні 0,0400; 0,0450; 0,0500 мкм (форма частинок сферична, густина $1,52 \text{ г} / \text{см}^3$)?

2.17 При відстоюванні стічних вод витрата їх складає $20000 \text{ м}^3 / \text{добу}$. Якою повинна бути глибина відстійника, якщо відомо, що швидкість потоку стічної води уздовж апарату дорівнює $1 \text{ м} / \text{с}$; В - ширина відстійника дорівнює 6 м, довжина каналу $L = 40 \text{ м}$.

2.18 У посуд ллється вода так, що за 1 с наливається 0,2 л води. Яким має бути діаметр отвору у дні посуду, щоб вода в ньому трималася на постійному рівні $h = 8,3 \text{ см}$?

2.19 З якою швидкістю $W_{\text{ч}}$ дисперсна частинка діаметром $d = 40 \text{ мкм}$ осаджується у воді. Густина речовини частинки - $2 \text{ г} / \text{см}^3$, абсолютна температура - 300 К .

2.20 Знайти швидкість спливання дисперсної частинки діаметром $d = 60 \text{ мкм}$ у воді. Густина речовини частинки – $0,5 \text{ г} / \text{см}^3$, абсолютна температура - 293 К .

2.21 У скільки разів швидкість спливання дисперсної частинки діаметром 150 мкм у воді більше швидкості спливання такої ж частинки діаметром 50 мкм ? Густина речовини частинки – $0,5 \text{ г}/\text{см}^3$, абсолютна температура - 293 К .

2.22 Знезараження води після технологічного циклу здійснюється хлором. Визначити довжину хвилі світла, яким треба обробити 1 моль хлору, щоб розірвати зв'язок $\text{Cl}-\text{Cl}$, якщо енергія її розриву $E = 239\,000 \text{ Дж}/\text{моль}$.

2.23 В технології знезараження питної води використовують фільтри з активованого вугілля. Яку питому поверхню має фільтр з масою $0,1 \text{ кг}$ вуглецю з середнім діаметром частинок 50 мкм , якщо густина частинок $1,7 \cdot 10^3 \text{ кг}/\text{м}^3$.

2.24 Розрахувати, користуючись конвективно-дифузійною моделлю масштабного перенесення забруднюючої домішки у річці, у скільки разів зменшиться концентрація домішки у воді на відстані 50 км. Вважати, що швидкість течії дорівнює 0,5 м/с, коефіцієнт дифузії домішки $D = 10^{-9} \text{ м}^2/\text{с}$, а коефіцієнт розбавлення $b = 0.5 \cdot 10^{-5} \text{ с}^{-1}$.

2.25 Знайти швидкість $W_{\text{ч}}$ гравітаційного осадження дисперсної частинки діаметром $d = 5 \text{ мкм}$ у воді. Густина речовини частинки - 2 г/см^3 , абсолютна температура - 293 К .

2.26 Знайти, у скільки разів зменшиться концентрація домішки у воді на відстані 100 км. Вважати, що швидкість течії дорівнює 1 м/с, коефіцієнт дифузії домішки $D = 10^{-10} \text{ м}^2/\text{с}$, а коефіцієнт розбавлення $b = 0.3 \cdot 10^{-5} \text{ с}^{-1}$.

РОЗДІЛ 3

ВІБРАЦІЇ, ЇХ ОЦІНЮВАННЯ ТА НОРМУВАННЯ. ЗАХИСТ ЕЛЕМЕНТІВ ДОВКІЛЛЯ ВІД МЕХАНІЧНИХ І АКУСТИЧНИХ КОЛИВАНЬ

За останні роки спостерігається погіршення стану навколишнього середовища через зростання негативного впливу промислових енергетичних випромінювань, зокрема вібрації та шуму.

Вібрація та шум представляють собою пружні коливання, які виникають у твердих тілах, газах та рідинах. Вібрація – це механічні коливальні рухи, що мають гармонійний характер в механічній системі. Причиною вібрації стають неузгоджені силові впливи, що виникають під час функціонування машин та механізмів.

Основними характеристиками вібрації є: частота (Гц); амплітуда зміщення (м); віброшвидкість (м/с); віброприскорення (м/с²); період коливань (с).

В області віброакустики робочий діапазон частот вібрації розподіляється на октавні діапазони. У кожному октавному діапазоні верхня межа частоти у два рази перевищує нижню, а середня частота діапазону обчислюється як квадратний корінь з добутку верхньої та нижньої частот. Середні геометричні частоти октавних діапазонів стандартизовані та лежать у межах від 1 до 2000 Гц (загалом 12 середньочастотних діапазонів).

Найбільшу небезпеку для здоров'я людини представляють коливання з частотою 6...9 Гц, оскільки ці частоти збігаються з частотою вібрації внутрішніх органів людини.

Вібраційні системи складаються з елементів, які характеризуються масою, пружністю та демпфуванням. В таких системах діють сили інерції, тертя, пружності та сили, що викликають вібрацію.

Сила інерції визначається як добуток маси m на її прискорення dv/dt :

$$F_M = - m dv/dt, \quad (3.1)$$

де v – віброшвидкість.

Похідна від швидкості вібрації визначає прискорення вібрації.

Сила інерції F_M направлена у бік, що суперечить прискоренню.

Сила взаємодії пружного компонента, інакше кажучи відновлювальна сила, орієнтована у протилежному напрямку, дорівнює

$$F_G = -Gx, \quad (3.2)$$

де G - коефіцієнт жорсткості пружного елемента, Н/м; $x = (x_1 - x_0)$ – зміщення кінця пружного елемента, м.

При вібрації пружних систем енергія розсіюється в навколишнє середовище, а також у матеріал пружних складових та в місцях з'єднання частин конструкції. Такі втрати виникають через сили тертя (дисипативні сили), на подолання яких безповоротно втрачається енергія від джерела вібрації.

Якщо енергія розсіюється у елементі демпфування, тобто в середовищі з в'язкісним опором, то дисипативна сила F_S , яка демпфує, прямо пропорційна віброшвидкості v :

$$F_S = S \cdot v, \quad (3.3)$$

де S - імпеданс (опір) елемента демпфування, Н·м/с.

Імпеданс вібросистеми формується імпедансами елементів демпфування, маси та пружності. Найменше значення імпеданс вібросистеми демонструє в резонансній області, де визначається опором елемента демпфування. У зоні високих частот коливання визначаються вібруючою масою m , а на низьких частотах - жорсткістю системи G .

Коефіцієнт втрат енергії зважаючи на імпеданс дорівнює:

$$\eta = \omega S / G \quad (3.4)$$

За наявності сил тертя ($F_S \neq 0$) вільна вібрація згасає. Амплітуда віброшвидкості при цьому з часом зменшується. Відношення потоку енергії на вході в захисний пристрій (ЗП) та на виході з нього W_+/W_- називають силовим коефіцієнтом захисту при віброізоляції:

$$k_F = W_+/W_- \quad (3.5)$$

Ступінь захисту визначається і динамічним коефіцієнтом захисту k_X , що відповідає відношенню амплітуди зміщення джерела до амплітуди зміщення приймача. Загалом, енергетичний коефіцієнт захисту може бути виражений як

$$k_W = k_F k_X. \quad (3.6)$$

Загалом ефективність віброізоляції дорівнює

$$e = 10 \lg k_W = 10 \lg [\eta^2 + (\omega^2/\omega_0^2 - 1)^2] - 10 \lg(1 + \eta^2). \quad (3.7)$$

Якщо в захисному пристрої втрати відсутні ($\eta = 0$), то ефективність віброізоляції дорівнює

$$e = 20 \lg(\omega^2/\omega_0^2 - 1). \quad (3.8)$$

Шум - це хаотичне нагромадження звуків різних частот і сили, які з'являються внаслідок механічних коливань у твердих, рідких та газоподібних середовищах. За природою виникнення шуми класифікуються на механічні, аеродинамічні, гідродинамічні та електромагнітні.

Запровадження нових технологічних процесів у промисловості, збільшення потужності та швидкості технологічного устаткування, а також механізація виробничих процесів призвели до того, що людина, як на виробництві, так і в побуті, постійно зазнає впливу шумів високого рівня.

Шум наносить серйозну шкоду здоров'ю людини. За останні роки середній рівень шуму від транспорту зріс на 12-14 децибел. Ось чому проблема боротьби з шумом у місті стає все більш нагальною.

Звук – це коливання частинок у пружних середовищах, що поширюються у формі поздовжніх хвиль, частота яких лежить в межах, які сприймаються людським вухом, тобто в середньому від 16 до 20000 Гц. У повітрі при температурі 0°C і нормальному атмосферному тиску звук розповсюджується зі швидкістю 330 м/с, у морській воді - близько 1500 м/с, у деяких металах швидкість звуку може сягати 7000 м/с. Пружні хвилі з частотою менше 16 Гц називають інфразвуком, а хвилі, частота яких перевищує 20000 Гц, - ультразвуком. Звук може поширюватися в газоподібному та рідкому середовищах тільки як поздовжні хвилі, а в твердих тілах, окрім поздовжніх, виникають також і поперечні хвилі.

Для всіх живих організмів, в тому числі й для людини, звук є одним з факторів навколишнього середовища. У природі гучні звуки трапляються рідко, а шум зазвичай слабкий і короточасний. Поєднання звукових подразників дає час тваринам та людям для оцінки його характеру та формування відповідної реакції. Однакові звуки тварини і людина сприймають з різною частотою.

До шуму відносяться тривалі або короткі звуки, які являють собою сукупність різних тонів, частот, форм, інтенсивність і тривалість дії яких безладно змінюються. Шум, що містить усі частоти у широкому спектрі приблизно однакової інтенсивності, називається білим шумом. Джерела шуму в місті надзвичайно різноманітні, але головним з них є транспорт, який спричиняє 60 - 80% всіх шумів.

Шум має певну частоту, або спектр, що виражається в герцах, та інтенсивність - рівень звукового тиску, вимірюваний у децибелах. Джерела шуму можуть бути як виробничі, так і невиробничі.

Існують електронні вимірювальні прилади, які реагують на звук аналогічно людському слуху і забезпечують об'єктивне вимірювання рівня звуку або звукового тиску. Їх називають шумомірами

Шумомір перетворює звук, який він сприймає, мікрофоном у пропорційний електричний сигнал.

Рівень шуму вимірюється у одиницях, що виражають ступінь звукового тиску, - децибелах (дБ). Цей тиск не сприймається безмежно. Рівень шуму в 20-30 децибел практично нешкідливий для людини, це природний шумовий фон.

Шум у 50-60 дБ призводить до підвищення порогу слухової чутливості і до погіршення функціонального стану центральної нервової системи, тому допустимий рівень шуму для класних приміщень не повинен перевищувати 40 дБ.

Допустимий рівень шуму у житлових приміщеннях у денний час не повинен перевищувати 40 дБ, а у нічний - 30 дБ.

Встановлено, що якщо рівні інтенсивності сприйманих звуків незначні й перебувають в межах можливостей людської мови (до 70 дБ), то такі звуки не

спричинять змін і будуть сприйматися як звичний звуковий образ. Звуки та шуми понад 70 дБ неприємні для слуху, а звуки інтенсивністю понад 130 дБ (гуркіт грому, зліт реактивного літака) мають травмуючі властивості.

Нормальна людська мова має гучність 40-70 дБ. Шум вуличного транспорту – 60-80 дБ. Шум у заводських цехах – 90 дБ. Двигун мотоцикла без глушника – 100 дБ. Ще більше - гуркіт музики на дискотеці (110 дБ). А рівень звукового тиску на рок-концерті може скласти 120 дБ, що можна порівняти з ревом реактивного двигуна. А больовий поріг людини – 140 дБ.

При цьому звуки гучністю 85 дБ і вище вже мають шкідливий вплив на слух.

Дуже високий рівень і промислових шумів. На багатьох виробництвах він сягає 90-110 децибелів і більше. Зростає шум і на вулиці. Якщо в 60-70 роки минулого століття шум на вулицях не перевищував 80 децибел, то зараз він досягає 100 децибел і більше. На багатьох жвавих магістралях навіть вночі шум не буває нижчим за 70 децибел, в той час як за санітарними нормами він не повинен перевищувати 40 децибел.

За даними фахівців, шум у великих містах щорічно збільшується приблизно на 1 децибел.

Гучна музика притуплює слух, викликає нервові захворювання. Рівень шуму на дискотеці 80-100дБ, гучність звуку плеєра 100-114дБ. Здорові барабанні перетинки витримують гучність плеєра в 110 дБ максимум протягом 1,5 хв.

Одним із видів шуму є так званий «шкільний шум». Рівень інтенсивності шуму на уроках переважно коливається в межах від 50 до 80 дБ, з частотою від 500 до 2000 Гц. Шум до 40 дБ не викликає негативних змін, вони стають вираженими при впливі шуму в 50 і 60 дБ. Розв'язування арифметичних прикладів потребує при шумі в 50 дБ на 15-55%, а в 60 дБ - на 80-100% більше часу. При шумі в 65 дБ у школярів відзначено зниження уваги на 12-16%. Рівень шуму понад 80-100 дБ призводить до збільшення кількості помилок і, знижуючи продуктивність праці приблизно на 10 - 15% і одночасно значно

погіршуючи його якість. Від надмірного рівня шуму посилюється стан дискомфорту.

В таблиці 3.1 наведено допустимі рівні шуму в приміщеннях житлових та громадських будинків і на території житлової забудови (на території шкіл) під час різних видів діяльності відповідно до Державних санітарних норм (Наказ МОЗ України від 22.02.2019 N463).

Таблиця 3.1

Допустимі рівні звуку в приміщеннях житлових і громадських будинків та на території житлової забудови

№ з/п	Призначення приміщень та територій	Час доби*	Рівні звуку, дБ
1.	Спальні приміщення в дитячих дошкільних закладах і школах-інтернатах	день	40
		ніч	30
2.	Лекційні та класні приміщення, навчальні кабінети, кімнати викладачів, конференц-зали, аудиторії	цілодобово	40
3.	Музичні класи	цілодобово	35
4.	Бібліотеки	цілодобово	45
5.	Зали багатоцільового призначення	цілодобово	35
6.	Спортивні зали, плавальні басейни	цілодобово	55
7.	Приміщення, обладнані персональними комп'ютерами та/або технікою для бізнесу	цілодобово	50
8.	Території, які безпосередньо прилягають до дитячих дошкільних закладів, шкіл та інших навчальних закладів, бібліотек	день	55
		ніч	45
9.	Майданчики дитячих дошкільних	цілодобово	45

	закладів, шкіл та інших навчальних закладів (незалежно від форм власності)		
--	--	--	--

Загалом, методи протидії шуму поділяються на такі: законодавчі, будівельно-планувальні, організаційні, техніко-технологічні, конструкторські та профілактичні.

Шуми в умовах міської забудови регулюються Державними санітарними нормами допустимих рівнів шуму в приміщеннях житлових і громадських будівель та на території житлової забудови (Наказ МОЗ України від 22.02.2019 N463), а також Державними будівельними нормами України «Захист територій, будинків і споруд від шуму ДБН В.1.1-31:2013». Міждержавні стандарти також визначають гранично допустимі рівні шуму для автомобілів, наприклад: ГОСТ 17187-81 (Шумоміри. Загальні технічні умови та методи випробувань.); ГОСТ 27435-87 (Внутрішній шум автотранспортних засобів); ГОСТ 27436-87 (Зовнішній шум автотранспортних засобів).

Зовнішній шум від легкових автомобілів та автобусів не повинен бути вище 85-92 дБ, для мотоциклів – 80-86 дБ. Внутрішній шум для легкових автомобілів обмежений до 80 дБ, для вантажівок та автобусів – до 85 дБ, а в пасажирських салонах автобусів – 75-80 дБ.

При виявленні перевищення допустимих показників рівня шуму, необхідно вживати наступних заходів для їх зменшення:

- Зменшення шуму в його джерелі (через використання спеціальних технологічних процесів або нового, менш шумного обладнання);
- Блокування шляхів розповсюдження звукових хвиль шляхом використання звуконепроникних покриттів або акустичних екранів, встановлення віброізоляційних пристроїв;
- Обмеження часу роботи або повна зупинка роботи шумного обладнання.

Для оцінки звукового тиску P (Па), інтенсивності I (Вт/м²) та звукової потужності W (Вт) різних джерел, їх рівні L_i прийнято виражати в безрозмірних одиницях (дБ) – децибелах:

$$L_p = 10 \lg (P/P_0)^2; \quad (3.9)$$

$$L_I = 10 \lg (I/I_0); \quad (3.10)$$

$$L_W = 10 \lg (W/W_0), \quad (3.11)$$

де $P_0 = 2 \cdot 10^{-5}$ Па - стандартний звуковий тиск, що відповідає границі чутливості; $I_0 = 10^{-12}$ Вт/м² - інтенсивність звуку на границі чутливості; $W_0 = 10^{-12}$ Вт - опорна звукова потужність.

Зростання гучності звуку в 10 разів відповідає одному белу (Б): 1Б = 10дБ.

Розгляньмо енергетичний баланс захисного пристрою, що володіє такими властивостями: відбивати, поглинати, бути прозорим для потоку енергії.

З загального потоку енергії W_+ , що надходить до захисного пристрою, частина W_α поглинається, частина W_- відбивається і частина $W_\sim$ проходить крізь пристрій. Отже, захисний пристрій можна описати такими енергетичними коефіцієнтами: коефіцієнтом поглинання $\alpha = W_\alpha/W_+$, коефіцієнтом відбиття $\rho = W_-/W_+$, коефіцієнтом передачі $\tau = W_\sim/W_+$.

При цьому має місце рівність

$$\alpha + \rho + \tau = 1.$$

Сума $\alpha + \tau = 1 - \rho = v$ (де $v = W_\sim/W_+$) описує невідбитий потік енергії W_v , який пройшов через захисний пристрій. Якщо $\alpha = 1$, то пристрій поглинає всю енергію, що надходить від джерела. За умови $\rho = 1$ може відбиватися 100% потоку, що падає. Рівність $\tau = 1$ означає абсолютну прозорість захисного пристрою, тобто енергія проходить через пристрій без втрат.

Принципи захисту:

- 1) принцип: $\rho \rightarrow 1$; захист забезпечується завдяки відбивальній здатності ЗП;
- 2) принцип: $\alpha \rightarrow 1$; захист реалізується шляхом поглинання ЗП
- 3) принцип: $\tau \rightarrow 1$; захист враховує властивості прозорості ЗП.

На практиці принципи поєднують, отримуючи різноманітні методи захисту. Найбільшого розповсюдження набули методи захисту ізоляцією та поглинанням.

При вивченні розповсюдження коливань разом із коефіцієнтом α застосовують коефіцієнт втрат η , який характеризує кількість розсіяної ЗП енергії:

$$\eta = W_S/\omega. \quad \varepsilon = E_S/(2\pi\varepsilon), \quad (3.12)$$

де W_S та E_S – середні за період коливань T потужність втрат та розсіяна водночас енергія; $\omega = 2\pi/T$ – циклічна частота; ε – енергія, запасена системою.

Якісна оцінка ступеня реалізації цілей захисту може здійснюватися двома способами:

1) визначають коефіцієнт захисту K_W як відношення

$$K_W = \frac{\text{потік енергії за наявності ЗП}}{\text{потік енергії за відсутності ЗП}}$$

2) визначають коефіцієнт захисту у вигляді відношення:

потік енергії на виході із ЗП

$$K_W = \frac{\text{потік енергії на вході ЗП}}{\text{потік енергії на виході ЗП}}.$$

Ефективність захисту (дБ) оцінюють за співвідношенням:

$$E = 10 \lg K_W. \quad (3.13)$$

Ефективність звукоізоляції оцінюється в децибелах:

$$E = 10 \cdot \lg(1/\tau) = 10 \cdot \lg(W_+/W_{\sim}) = 10 \cdot \lg(I_{\text{пад}}/I_{\text{пр}}). \quad (3.14)$$

Приклади розв'язання задач

Приклад 3.1

Визначити ефективність звукоізоляції екрану в децибелах та коефіцієнт проходження τ , якщо інтенсивність звуку від джерела, що падає, становить

$$I = 10^{-10} \text{ Вт/м}^2,$$

а інтенсивність звуку на порозі чутності $I_0 = 10^{-12} \text{ Вт/м}^2$.

Розв'язання:

Ефективність звукоізоляції обчислюється за формулою (3.14):

$$E = 10 \cdot \lg(1/\tau) = 10 \cdot \lg(W_+/W_{\sim}) = 10 \cdot \lg(I_{\text{пад}}/I_{\text{пр}}).$$

коефіцієнт (передачі) проходження $\tau = I_{\text{пр}}/I_{\text{пад}} = 10^{-12}/10^{-10} = 10^{-2}$

Підставляючи дані умови задачі в цю формулу, отримаємо

$$E = 10 \cdot \lg(I_{\text{пад}}/I_{\text{пр}}) = 10 \cdot \lg 10^2 = 20$$

Відповідь: ефективність звукоізоляції екрану складає 20 дБ, а коефіцієнт проходження $\tau = 10^{-2}$.

Приклад 3.2

Розрахувати ефективність захисту (дБ) і коефіцієнт захисту екрану, якщо потік енергії після проходження екрану у 100 разів менша потоку енергії перед екраном.

Розв'язання:

Коефіцієнт захисту K_W дорівнює відношенню потоків енергії після і до екрану

$$K_W = \frac{\text{потік енергії на вході ЗП}}{\text{потік енергії на виході ЗП}}$$

Підставляючи дані умови задачі в цю формулу, отримаємо

$$K_W = 100/1 = 10^2,$$

а ефективність захисту буде дорівнювати

$$E = 10 \lg K_W = 20 \text{ дБ}$$

Відповідь: ефективність захисту складає 20 дБ, а коефіцієнт захисту 10^2 .

Приклад 3.3

Чому дорівнює коефіцієнт передачі τ , якщо із загального потоку енергії W_+ , що надходить до захисного пристрою ЗП, частина $W_\alpha = 0,2 W_+$ поглинається, а частина $W_- = 0,3 W_+$ відбивається?

Розв'язання:

Знайдемо, яка частина енергії $W_\sim$ проходить крізь захисний пристрій. Розглянемо енергетичний баланс захисного пристрою, який має властивості: відбивати, поглинати та бути прозорим по відношенню до потоку енергії.

Із загального потоку енергії W_+ , що надходить до захисного пристрою ЗП, частина W_α поглинається, частина W_- відбивається і частина $W_\sim$ проходить крізь ЗП. Тоді ЗП можна охарактеризувати такими енергетичними коефіцієнтами:

коефіцієнтом поглинання $\alpha = W_{\alpha}/W_{+}$, коефіцієнтом відбиття $\rho = W_{-}/W_{+}$, коефіцієнтом передачі $\tau = W_{\sim}/W_{+}$.

При цьому виконується рівність, що характеризує енергетичний баланс захисного пристрою

$$\alpha + \rho + \tau = 1.$$

Звідси знаходимо коефіцієнт передачі $\tau = W_{\sim}/W_{+}$.

$$\tau = 1 - (\alpha + \rho) = 1 - (0,2 + 0,3) = 0,5$$

Відповідь: коефіцієнт передачі дорівнює 0,5.

Приклад 3.4

Людина може приймати звук частотою приблизно від $\nu_1 = 20$ Гц до $\nu_2 = 20000$ Гц. Між якими довжинами хвиль лежить інтервал чутності звукових коливань? Швидкість поширення звуку у повітрі $c = 340$ м/с

Розв'язання:

Довжина хвиль звукових коливань дорівнює

$$\lambda_1 = \frac{c}{\nu_1} = \frac{340}{20} = 17 \text{ м}$$

$$\lambda_2 = \frac{c}{\nu_2} = \frac{340}{20 \cdot 10^3} = 17 \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

Відповідь: інтервал чутності звуку лежить в межах від $17 \cdot 10^{-3}$ м до 17 м.

Приклад 3.5

За допомогою ехолота вимірюється глибина моря. Яка є глибина моря, якщо проміжок часу між виникненням звуку та його прийомом дорівнює $t = 2,5$ с? Стисливість води $\beta = 4,6 \cdot 10^{-10}$ Па⁻¹, густина морської води $1,03 \cdot 10^3$ кг/м³.

Розв'язання:

Швидкість поширення акустичних коливань визначається формулою

$$v = \sqrt{\frac{E}{\rho}},$$

де E – модуль Юнга, ρ - густина води.

Між модулем Юнга та стисливістю води існує співвідношення

$$E = \frac{1}{\beta}$$

Підставляючи це співвідношення у формулу для швидкості v , отримаємо

$$v = \sqrt{\frac{1}{\beta\rho}}$$

Знаючи швидкість v , визначимо глибину моря h

$$h = \frac{v \cdot t}{2} = \frac{t}{2\sqrt{\rho\beta}}$$

Підставляючи в кінцеву формулу дані умови задачі, отримаємо

$$h = \frac{t}{2\sqrt{\rho\beta}} = 1815 \text{ м}$$

Відповідь: глибина дорівнює 1815 м.

Приклад 3.6

Знайти швидкість поширення звуку в сталі.

Розв'язання:

Швидкість поширення акустичних коливань визначається формулою

$$v = \sqrt{\frac{E}{\rho}},$$

де E – модуль Юнга, ρ – густина. Для сталі густина дорівнює $7,7 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$, а модуль Юнга дорівнює $E = 216 \text{ ГПа}$. Підставляючи чисельні дані у формулу для швидкості v , отримаємо її значення для сталі.

$$v = \sqrt{\frac{216 \cdot 10^9}{7,7 \cdot 10^3}} = 5296 \text{ м/с}$$

Відповідь: швидкість поширення акустичних коливань в сталі 5296 м/с.

Приклад 3.7

Знайти швидкість поширення звуку в повітрі при температурах t , рівних -20°C та $+20^\circ\text{C}$.

Розв'язання:

Швидкість поширення акустичних коливань визначається формулою

$$v = \sqrt{\frac{\gamma RT}{\mu}},$$

де μ – молярна маса газу, γ – показник адіабати, T – температура, R – універсальна газова стала.

Для повітря значення молярної маси дорівнює $\mu=0,029$ кг/моль, а показник адіабати двохатомного газу $\gamma=1,4$. Підставляючи у формулу чисельні дані, розраховуємо значення швидкості при заданих температурах і розміщуємо результати розрахунків у таблиці

T, К	253	273	293
V, м/с	321	333	345

Відповідь: швидкість поширення акустичних коливань в повітрі при температурах 253К, 273 К і 293 К дорівнює 321, 333 і 345 м/с відповідно.

Приклад 3.8

Знайти показник заломлення n звукової хвилі на кордоні скло - повітря. Модуль Юнга для скла $E = 6,9 \cdot 10^{10}$ Па, густина скла $\rho = 2,6 \cdot 10^3$ кг/м³, температура повітря $t = 20$ °С.

Розв'язання:

Швидкість поширення акустичних коливань у твердому v_1 і газоподібному v_2 середовищах визначається формулами

$$v_1 = \sqrt{\frac{E}{\rho}}, \quad v_2 = \sqrt{\frac{\gamma RT}{\mu}},$$

де E - модуль Юнга, ρ – густина скла, μ – молярна маса повітря, γ – показник адіабати.

За визначенням показник заломлення

$$n = \frac{v_1}{v_2} = \sqrt{\frac{E \cdot \mu}{\rho \cdot \gamma \cdot RT}}.$$

Підставляємо в останню формулу чисельні дані з умови задачі, отримаємо $n=1,5$.

Відповідь: показник заломлення n звукової хвилі на кордоні скло - повітря дорівнює 1,5.

Приклад 3.9

Два звуки відрізняються за рівнем гучності на $\Delta L = 1$ фон. Знайти відношення - I_2/I_1 інтенсивностей цих звуків.

Розв'язання:

Рівень гучності в фонах L_I пов'язаний з інтенсивністю I співвідношенням

$$L_I = 10 \lg \frac{I}{I_0},$$

де I_0 - поріг чутності звуку. $I_0 = 10^{-12}$.

Для першого та другого звуків маємо

$$L_{I_1} = 10 \lg \frac{I_1}{I_0}, \quad L_{I_2} = 10 \lg \frac{I_2}{I_0}$$

Тоді

$$\Delta L_I = L_{I_2} - L_{I_1} = 10 \left(\lg \frac{I_2}{I_0} - \lg \frac{I_1}{I_0} \right) = 10 \lg \frac{I_2}{I_1}, \text{ або}$$

$$\lg \frac{I_2}{I_1} = \frac{\Delta L_I}{10}.$$

Звідси

$$\frac{I_2}{I_1} = 10^{\frac{\Delta L_I}{10}} = 1,26$$

Відповідь: $=1,26$

Приклад 3.10

Два звуки відрізняються за рівнем звукового тиску $\Delta L_p = 1$ Дб. Знайти відношення p_2/p_1 амплітуд звукового тиску.

Розв'язання:

Рівень звукового тиску ΔL_p в децибелах L_I пов'язаний з амплітудою звукового тиску співвідношенням

$$L_p = 20 \lg \frac{p}{p_0},$$

Для першого та другого звуків маємо

$$L_{p_1} = 20 \lg \frac{p_1}{p_0}, \quad L_{p_2} = 20 \lg \frac{p_2}{p_0}$$

Тоді

$$\Delta L_p = L_{p_2} - L_{p_1} = 20 \left(\lg \frac{p_2}{p_0} - \lg \frac{p_1}{p_0} \right) = 20 \lg \frac{p_2}{p_1},$$

або

$$\lg \frac{p_2}{p_1} = \frac{\Delta L_p}{20}$$

Звідси

$$\frac{P_2}{P_1} = 10^{\left(\frac{L_P}{20}\right)} = 1,12$$

Відповідь: $\frac{P_2}{P_1} = 1,12$

Задачі до самостійного розв'язання

3.1 Людське вухо може приймати звук частотою приблизно від $\nu_1 = 20$ Гц до $\nu_2 = 20000$ Гц. Між якими довжинами хвиль лежить інтервал чутності звукових коливань? Швидкість поширення звуку у повітрі $v = 340$ м/с.

3.2 За допомогою ехолота вимірювалася глибина моря. Яка була глибина моря, якщо проміжок часу між виникненням звуку та його прийомом дорівнював $t = 2,5$ с? Стисливість води $\beta = 4,6 \cdot 10^{-10}$ Па⁻¹, щільність морської води $1,03 \cdot 10^3$ кг/м³.

3.3 Знайти швидкість поширення звуку в сталі

3.4 Знайти швидкість поширення звуку в міді

3.5 У скільки разів швидкість c_1 поширення звуку в повітрі влітку ($t = +27$ °C) більша за швидкість c_2 розповсюдження взимку ($t = -33$ °C)?

3.6 Знаючи, що середня квадратична швидкість v молекул двоатомного газу в умовах досвіду $v = 461$ м/с, знайти швидкість поширення звуку в газі.

3.7 Знайти показник заломлення n звукової волі на кордоні повітря – скло. Модуль Юнга для скла $E = 6,9 \cdot 10^{10}$ Па, густина скла $\rho = 2,6 \cdot 10^3$ кг/м³, температура повітря $t = 20$ °C.

3.8 Знайти граничний кут повного внутрішнього відображення звукових хвиль на кордоні повітря - скло. Скористатися необхідними даними із попереднього завдання 3.7.

3.9 Два звуки відрізняються за рівнем гучності на $\Delta L = 1$ фон. Знайти відношення – I_2/I_1 інтенсивностей цих звуків.

3.10 Два звуки відрізняються за рівнем звукового тиску $\Delta L_p = 2$ дБ. Знайти відношення амплітуд звукового тиску p_2/p_1 .

3.11 Шум на вулиці з рівнем гучності $L_{I1} = 70$ фон чути в кімнаті так, як шум з рівнем гучності $L_{I2} = 40$ фон. Знайти відношення I_1/I_2 інтенсивностей звуків на вулиці та кімнаті.

3.12 Інтенсивність звуку збільшилася у 1000 разів. Наскільки збільшилась амплітуда звукового тиску?

3.13 Інтенсивність звуку $I = 10$ мВт/м². Знайти рівень гучності L і амплітуду p звукового тиску.

3.14 На скільки збільшився рівень гучності звуку L_1 . Якщо інтенсивність звуку зросла: а) у 3000 разів; б) у 30000 разів?

3.15 Розрахувати ефективність захисту (дБ) і коефіцієнт захисту екрана, якщо потік енергії після проходження екрана у 50 разів менша потоку енергії перед екраном.

3.16 Визначити ефективність звукоізоляції екрана в децибелах та коефіцієнт проходження τ , якщо інтенсивність звуку, що падає від джерела, дорівнює $I = 10^{-8}$ Вт/м², а інтенсивність звуку на порозі чутності $I_0 = 10^{-10}$ Вт/м².

РОЗДІЛ 4

ЕЛЕКТРОМАГНІТНЕ ВИПРОМІНЮВАННЯ. ВПЛИВ ТА НОРМУВАННЯ (ЕНЕРГЕТИЧНЕ ЗАБРУДНЕННЯ ДОВКІЛЛЯ. НЕБЕЗПЕЧНІ ВИПРОМІНЮВАННЯ)

Вплив електромагнітного поля на навколишнє середовище відбувається в залежності від частоти випромінювача електромагнітного поля (ЕМП), його інтенсивності, віддаленості та способу роботи. Основні характеристики ЕМП – його потужність і частота електромагнітних хвиль.

В залежності від відстані між джерелом випромінювання і об'єктом довкілля, на який здійснюється негативний вплив ЕМП підбираються певні методи захисту.

Серед об'єктів довкілля є штучні і природні елементи навколишнього середовища, включаючи живі організми, у тому числі і людину. Серед штучних об'єктів є технічні засоби передачі енергії та інформації.

Під "близькою зоною" розуміють ділянку, де електромагнітне поле ще остаточно не сформоване на дистанції $r \leq \lambda/2\pi$ від передавача, де λ – довжина електромагнітної хвилі. У близькій зоні ЕМП визначається електричною складовою поля E .

У випадку одночасної роботи кількох джерел в цій зоні формується сумарне значення квадратів напруженості поля:

$$E^2 = \sum E_i^2$$

У віддаленій області існує та розповсюджується електромагнітне поле. ЕМП визначається інтенсивністю випромінювання. Граничним значенням опромінення для населення вважаються такі показники електромагнітних полів, що при щоденному впливі не спричиняють у людей променевих хвороб чи інших змін у здоров'ї.

4.1 Захист елементів довкілля від електромагнітних полів і випромінювань

Основний критерій безпеки для населення встановлений на рівні не більше 500 В/м при частоті 50 Гц в місцях постійного перебування людей.

Захист відстанню – це основний спосіб захисту довкілля від дії ЕМП.

При розміщенні радіотехнічних споруд, наприклад, антени радіолокатора, з метою отримання рівнів дії ЕМП, що не перевищують, потрібно враховувати перш за все:

- потужність та частотний діапазон джерела ЕМП;
- діаграму спрямованості і висоту розташування антени випромінювача.

З метою зменшення впливу електромагнітного поля промислової частоти, збільшують висоту підвісу високовольтних ліній, віддаляють житлову забудову від лінії електропередачі, використовують екрануючі конструкції.

Метод захисту екрануванням від електромагнітного випромінювання ґрунтується на процесах відбиття та поглинання електромагнітних хвиль.

Екранування повністю унеможливорює проникнення електромагнітних хвиль у навколишнє середовище. На відкритих територіях, розташованих у зонах з підвищеними рівнями ЕМП, застосовуються екрануючі пристрої, наприклад, залізобетонні огорожі, екрануючі сітки, високі дерева.

Під час взаємодії електромагнітної хвилі, що падає, з радіопоглинаючим матеріалом (РПМ) відбувається її поглинання, розсіювання, а також, у деяких випадках РПМ – інтерференція. Внаслідок цих процесів енергія хвилі, що падає, розсіюється в поглинаючому покритті, а відбита хвиля стає незначною.

Для забезпечення мінімального відбиття хвилі, яка падає, від поглинаючого покриття, необхідні умови, щоб його властивості не сильно відрізнялися від властивостей вільного простору, тобто середовища, де поширюється хвиля.

На межі розподілу "середовище – поверхня РПМ" не повинно бути помітного стрибка коефіцієнтів заломлення. За таких обставин хвиля, яка падає, проникає в поглинаюче покриття з подальшим поглинанням та розсіюванням.

Важливо, щоб комплексний хвильовий опір поглинаючого покриття наближався за абсолютною величиною до хвильового опору вільного простору.

Для ефективного поглинання хвилі, необхідно, щоб середовище мало значні втрати. При цьому уявні складові комплексної діелектричної та магнітної проникності повинні мати високі показники. За виконання цих умов хвильовий опір суттєво відрізняється від хвильового опору вільного простору, а коефіцієнт відбиття збільшується.

В об'ємних поглиначах реалізується об'ємне поглинання електромагнітної енергії за рахунок включення електричних або магнітних втрат. Як наповнювачі використовуються порошки графіту, вугільної та ацетиленової сажі, порошки карбонільного заліза, ферити, тонкі металеві волокна. Потрібно досягти високого поглинання енергії ЕМП з малим коефіцієнтом відбиття в широкому діапазоні частот.

Резонансні поглиначі є композицією шарів діелектрика та провідних плівок металу. Товщина діелектрика складає чверть довжини хвилі випромінювання, що падає, або кратна непарному числу.

Принцип дії таких систем заснований на інтерференції хвилі, що падає, та утворенні в них стоячих хвиль. Такі поглиначі мають низький коефіцієнт відбивання, але недостатньо широкопосмугові.

В результаті антропогенної діяльності зростає вплив фізичних забруднень, до яких відносяться шум, вібрація, електромагнітні поля, іонізуюче випромінювання радіоактивних речовин, теплове та ультрафіолетове випромінювання

Природне середовище, яке нас оточує має джерела, які утворюють шумовий, електростатичний та електромагнітний природний фон Землі. До основних джерел, які утворюють електромагнітний та шумовий фон, відноситься Сонце, магнітосфера, атмосферна електрика.

Значна частина енергії з верхніх шарів сонячної корони транспортується потоками сонячного вітру. Ці потоки є плазмою, яка радіально поширюється в міжпланетний простір. Виникнення сонячного вітру обумовлене енергетичними потоками з глибших сонячних шарів.

Атмосферна електрика – суттєвий абіотичний чинник у біосфері, що відіграє важливу роль в екології. Електростатичні сили, визначені кулонівською взаємодією між двома фіксованими зарядами, значно перевищують гравітаційну взаємодію. Якщо в атмосфері виникає електричний заряд певного знаку, завжди виникає рівна кількість заряду протилежного знаку. Немає жодного явища, за якого створюється або зникає заряд одного знаку. Завжди відбувається перерозподіл заряду між об'єктами. Під час іонізації атомів виникають вільні електрони, але одночасно з'являються позитивно заряджені іони.

Джерела атмосферної електрики в локальних областях – це виверження вулканів, торнадо, снігові замети, пилові бурі, розбризкування морських хвиль та водоспадів, хмари, опади, парові й димові утворення природного та техногенного походження. При цьому електризація атмосфери відбувається інтенсивно, що призводить до грозових явищ.

Загальний струм до земної поверхні від однієї грозової хмари становить приблизно 0,1 А (у наших широтах) та сягає 1 А в екваторіальних районах.

Електричні процеси в атмосфері зумовлені не лише статичною електрикою та електромагнітним, космічним і сонячним випромінюванням, але й самі хмари є джерелами радіохвиль. Атмосферна електрика проявляється різноманітно, з блискавками, що займають особливе місце.

При напруженості електричного поля понад 500 В/м поблизу земної поверхні в атмосфері виникає світіння, яке спостерігається в гострих частинах собору святого Ельма, тому його називають вогні Ельма.

Джерела УФ випромінювання – це зорі та інші космічні об'єкти. У діапазоні довжин хвиль 0,02 - 0,09 мкм випромінювання цих об'єктів поглинається міжзоряним воднем та частково верхніми шарами атмосфери.

Значна частина джерел УФ випромінювання має техногенне походження. Будь-яке тіло, нагріте до 3000 K та вище, містить ультрафіолетову складову у своєму спектрі. Чим вища температура тіла, тим виразніша ультрафіолетова складова спектру. Високотемпературна плазма є джерелом УФ випромінювання. Вона має лінійчатий та безперервний спектри.

Зі зростанням електронної температури збільшується і інтенсивність УФ випромінювання, з'являється рентгенівське випромінювання.

Завдяки великій енергії, кванти УФ випромінювання здатні викликати руйнування молекулярних та міжмолекулярних зв'язків, а також безпосередньо впливати на внутрішньоклітинні тканини з утворенням радикалів.

Великі дози УФ випромінювання можуть призвести до опіків шкіри та канцерогенних реакцій, пошкодження очей та інших небажаних наслідків.

УФ випромінювання з довжиною хвилі 0,24 - 0,28 мкм особливо небезпечне для організму та спричиняє смертельний і мутагенний вплив, оскільки цей спектр збігається з спектром поглинання нуклеїнових кислот.

4.2 Захист інформаційних і інформаційно-комунікаційних систем та мереж як елементів довкілля від впливу зовнішніх сил, у тому числі ЕМ-випромінювань

Одним із найважливіших завдань при вивченні впливу ЕМ полів на різні електротехнічні системи є дослідження стійкості силових кабельних ліній (КЛ) високої та низької напруги, а також захисту інформаційних каналів систем управління енергетичними об'єктами по відношенню до дії зовнішніх електромагнітних випромінювань.

При цьому під зовнішніми розуміються випромінювання, що генеруються у широкому діапазоні частот зовнішніми по відношенню до КЛ джерелами найрізноманітнішої природи.

В якості таких джерел, можуть виступати різні елементи електротехнічних систем, що генерують ЕМ поля, наприклад, близько

розташовані лінії електропередачі, комутаційні пристрої і струмообмежувачі, приймачі і перетворювачі електричної енергії низької і високої напруги, а також електричні розряди блискавки, різного роду потужні випромінювачі ЕМ енергії (наприклад, потужні НВЧ-системи, радіопередавачі та локаторні системи), джерела іонізуючого випромінювання.

При екрануванні КЛ, значно знижується ступінь впливу зовнішнього ЕМ поля, амплітуди наведеної напруги в жилах КЛ.

З цим доводиться рахуватися, коли йдеться, наприклад, про питання якості електричної енергії. Крім того, проблема захисту КЛ має особливу значимість при вирішенні питань ефективного захисту інформаційних потоків в системах управління, зв'язку та телекомунікації.

Необхідно оцінювати ступінь впливу зовнішніх ЕМ полів на показники якості електричної енергії, КЛ та вторинних ланцюгів, і достовірність переданої інформації.

Всілякі електронні апарати захисту, засоби комп'ютерного контролю та управління енергетичними системами використовують кабельні та радіоканали передачі інформації.

Лінії, що використовуються для обміну керуючими (інформаційними) сигналами, та живлять таке обладнання, вимагають екранування.

Дослідження зовнішнього ЕМ впливу на провідники, зокрема КЛ передбачає аналіз залежності наведеної напруги від параметрів падаючої хвилі: кута їх падіння на провідник, частоти і амплітуди. Важливим завданням є дослідження впливу наведеного сигналу на корисний сигнал в кабелі.

Приклади розв'язання задач

Приклад 4.1

Розрахувати зони енергетичної експозиції в діапазоні частот 30 кГц...300 МГц, якщо час впливу на людину протягом доби (24 год). Вважати, що напруженість електростатичного поля E складає 60 В/м.

Розв'язання

Позначимо енергетичну експозицію електростатичного поля ε_E , а енергетичну експозицію магнітного поля ε_H .

Енергетична експозиція електростатичного поля знаходиться за формулою

$$\varepsilon_E = E^2 T,$$

а енергетична експозиція магнітного поля знаходиться за формулою

$$\varepsilon_H = H^2 T,$$

де H – напруженість магнітного поля, яка знаходиться по формулі

$$H = E/c,$$

де $c = 3 \cdot 10^8$ м/с – швидкість світла у вакуумі.

Підставляючи чисельні дані умови задачі, знаходимо

$$\varepsilon_E = 60^2 \cdot 24 = 3600 \cdot 24 = 86,4 \cdot 10^3 \text{ (В/м)}^2 \cdot \text{год.}$$

$$\varepsilon_H = (60/3 \cdot 10^8)^2 24 = 4 \cdot 10^{-14} \cdot 24 = 96 \cdot 10^{-14} \text{ (А/м)}^2 \cdot \text{год}$$

Відповідь: енергетична експозиція електростатичного поля $\varepsilon_E = 86,4 \cdot 10^3 \text{ (В/м)}^2 \cdot \text{год.}$, а для магнітного поля $\varepsilon_H = 96 \cdot 10^{-14} \text{ (А/м)}^2 \cdot \text{год}$

Приклад 4.2

Екранування кабелю телевізійної антени від непотрібного електромагнітного випромінювання здійснюється захисним його покриттям у вигляді металевго обплетення. Хвильовий опір кабелю складає 75 Ом. Якою є індуктивність L одиниці довжини кабелю, якщо ємність її складає 100 пФ.

Розв'язання: хвильовий опір ρ дорівнює [25]

$$\rho = \sqrt{\frac{L}{C}}.$$

Звідси $L = \rho^2 \cdot C = 75^2 \cdot 10^{-10} = 0,5 \cdot 10^{-6}$ Гн

Відповідь: індуктивність кабелю $L = 0,5$ мкГн

Приклад 4.3

Для виключення зовнішнього ЕМ впливу на дротові лінії застосовують радіопоглинаючі матеріали, які захищають ці лінії від поширення в них

наведених хвиль струму і напруги. Розрахувати хвильовий опір радіопоглинаючого матеріалу, якщо відомі індуктивність та ємність цього матеріалу $L = 1 \text{ мкГн}$, а $C = 200 \text{ пФ}$.

Розв'язання:

Хвильовий опір ρ радіопоглинаючого матеріалу дорівнює

$$\rho = \sqrt{\frac{L}{C}}.$$

Підставляючи дані умови задачі, отримаємо

$$\rho = \sqrt{\frac{10^{-6}}{2 \cdot 10^{-10}}} = \sqrt{50 \cdot 10^2} = 70 \text{ Ом}$$

Відповідь: хвильовий опір радіопоглинаючого матеріалу дорівнює 70 Ом.

Приклад 4.4

Чому дорівнює показник заломлення електромагнітних хвиль у матеріалі радіопоглиначи, якщо швидкість цих хвиль в ньому дорівнює $2 \cdot 10^8 \text{ м/с}$?

Розв'язання

За визначенням показник заломлення електромагнітних хвиль дорівнює

$$n = \frac{c}{v},$$

де $c = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}$ – швидкість світла у вакуумі, v – швидкість електромагнітних хвиль у середовищі.

Підставляючи дані умови задачі у формулу, отримаємо

$$n = \frac{3 \cdot 10^8}{2 \cdot 10^8} = 1,5$$

Відповідь: показник заломлення дорівнює 1,5

Приклад 4.5

Частота електромагнітних хвиль дорівнює $\nu = 10^{12} \text{ Гц}$. Чому дорівнює довжина цих хвиль і швидкість їх в матеріалі поглиначи з показником заломлення 1,6?

Розв'язання

За визначенням показник заломлення електромагнітних хвиль дорівнює

$$n = \frac{c}{v},$$

де $c=3 \cdot 10^8$ м/с – швидкість світла у вакуумі, v – швидкість електромагнітних хвиль у матеріалі радіопоглинача.

$$\text{Звідси } v = \frac{c}{n} = \frac{3 \cdot 10^8}{1,6} = 1,88 \cdot 10^8 \text{ м/с}$$

Довжина електромагнітних хвиль у вакуумі дорівнює

$$\lambda_0 = \frac{3 \cdot 10^8}{10^{12}} = 3 \cdot 10^{-4} \text{ м,}$$

а довжина електромагнітних хвиль у матеріалі поглинача дорівнює

$$\lambda = \frac{\lambda_0}{n} = \frac{3 \cdot 10^{-4}}{1,6} = 1,88 \text{ м}$$

Відповідь: довжина електромагнітних хвиль в матеріалі поглинача з показником заломлення 1,6 дорівнює $\lambda = 1,88$ м, а швидкість їх – $1,88 \cdot 10^8$ м/с.

Приклад 4.6

Пробивною напругою повітря при нормальних умовах вважається значення 10 тисяч вольт на 1 см відстані між провідниками. На якій мінімальній відстані від провідника з струмом при напрузі сучасних ЛЕП 300 тисяч вольт напруженість електричного поля досягне небезпечної величини 500 В/м?

Розв'язання

Вважаючи електричне поле однорідним, знайдемо, при якій напрузі відбудеться електричний пробій повітря між провідниками на відстані 1 м .

$$U = E \cdot 100 = 10^4 \cdot 100 = 10^6 \text{ В.}$$

Тобто на відстані 1 м пробивна напруженість поля складає 10^6 В/м. Відстань між провідниками у випадку пробивної напруги сучасної ЛЕП 300 тисяч вольт буде рівною 0,3 м, а реальна напруженість буде у $1/0,3=3,33\dots$ разів менше за пробивну. Вважаючи напруженість обернено пропорційною квадрату відстані, знайдемо небезпечну відстань з напруженістю 500 В/м

$$L = 0,3 \cdot \sqrt{\frac{10^6}{500}} = 13,5 \text{ м}$$

Значить, для лінії ЛЕП потрібні опори заввишки не менше 15-20 м.

Відповідь: напруженість електричного поля від лінії сучасної ЛЕП з напругою 300 тисяч вольт досягне небезпечної величини 500 В/м на мінімальній відстані 13,5 м.

Приклад 4.7

УФ випромінювання з довжиною хвилі 0,24 – 0,28 мкм особливо сильно впливають на організм і приводять до летальної та мутагенної дії, так як цей спектр співпадає зі спектром поглинання нуклеїнових кислот. Знайти, яким частотам відповідають ці довжини хвиль та яка енергія фотонів УФ випромінювання

Розв'язання

Частота ν визначається формулою

$$\nu = c/\lambda,$$

де $c=3 \cdot 10^8$ м/с – швидкість світла у вакуумі, λ – довжина хвилі.

Знайдемо частоту випромінювання для хвилі з довжиною $\lambda_1=0,24 \cdot 10^{-6}$ м

Частота першої хвилі з довжиною $\lambda_1= 0,24$ м дорівнює $\nu_1=c/\lambda_1=3 \cdot 10^8/24 \cdot 10^{-8}$

$$\nu_1=0,125 \cdot 10^{16} \text{ Гц},$$

а частота другої хвилі дорівнює

$$\nu_2=c/\lambda_2=3 \cdot 10^8/28 \cdot 10^{-8}=0,107 \cdot 10^{16} \text{ Гц}$$

Енергія фотонів розраховується за формулою Планка

$$\varepsilon=h \cdot \nu$$

Для першої хвилі $\varepsilon_1=6,62 \cdot 10^{-34} \cdot 0,125 \cdot 10^{16}=8,3 \cdot 10^{-19}$ Дж або 5,2 еВ.

Для другої хвилі $\varepsilon_2=6,62 \cdot 10^{-34} \cdot 0,107 \cdot 10^{16}=7,1 \cdot 10^{-19}$ Дж або 4,4 еВ.

Відповідь: частота хвиль з довжиною 0,24 – 0,28 відповідають частотам $0,125 \cdot 10^{16}$ Гц та $0,107 \cdot 10^{16}$ Гц , а енергії фотонів дорівнюють 5,2 еВ та 4,4 еВ відповідно.

Приклад 4.8

Знайти об'ємну густину енергії електричного поля в повітрі з напруженістю 100 В/м.

Розв'язання

Об'ємна густина енергії електричного поля дорівнює

$$w = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 E^2}{2},$$

де ε – діелектрична проникність, ε_0 – електрична стала, що дорівнює $8,85 \cdot 10^{-12} \text{Ф/м}$, E – напруженість електричного поля.

Підставляючи в формулу дані умови задачі і враховуючи, що для повітря $\varepsilon=1$, отримаємо

$$w = \frac{8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 10^4}{2} = 4,425 \cdot 10^{-8} \text{ Дж/м}^3$$

Відповідь: об'ємна густина енергії електричного поля з напруженістю 100 В/м дорівнює $4,425 \cdot 10^{-8} \text{ Дж/м}^3$.

Приклад 4.9

Знайти мінімальний радіус дії далекої зони електромагнітних хвиль частотою 10^{12} Гц , у якій поширюється електромагнітне поле і існує вплив інтенсивності випромінювання на елементи довкілля.

Розв'язання

Під ближньою зоною дії слід розуміти простір, де електромагнітне поле ще не набуло остаточної форми на віддалі $r \leq \lambda/2\pi$ від випромінювального пристрою. У цій зоні, ближній, домінує електрична складова поля E . Залежно від параметрів джерела ЕМП, таких як його частота, потужність та робочий режим, підбирають відповідні заходи для захисту від негативного впливу електромагнітних коливань на людський організм.

У безповітряному середовищі, у вакуумі, швидкість поширення електромагнітних хвиль, що позначається як c , визначається як результат множення довжини хвилі λ на частоту коливань.

$$c = \lambda \cdot \nu$$

Звідси довжина хвилі дорівнюватиме

$$\lambda = \frac{c}{\nu} = \frac{3 \cdot 10^8}{10^{12}} = 3 \cdot 10^{-4} \text{ м.}$$

Мінімальний радіус далекої зони r можна визначити з співвідношення $r \leq \lambda/2\pi$, або

$$r \leq 3 \cdot 10^{-4} / 2\pi \approx 5 \cdot 10^{-5} \text{ м}$$

Відповідь: мінімальний радіус далекої зони r для хвилі частоти 10^{12} Гц складає 5 км.

Задачі для самостійного розв'язання

- 4.1** Знайти хвильовий опір кабелю екранування, якщо ємність і індуктивність одиниці його довжини дорівнюють 100 пФ/м і 2 мкГн/м відповідно.
- 4.2** Чому дорівнює ємність 1-го метра антенного кабелю, якщо його хвильовий опір дорівнює 75 Ом, а індуктивність 1 Гн/м?
- 4.3** Захисний пристрій від небезпечного електромагнітного випромінювання має власну частоту коливань $90 \cdot 10^7$ Гц. Знайти хвильовий опір захисного пристрою, якщо електрична ємність його 25 пФ.
- 4.4** Знайти об'ємну густину енергії електричного поля в повітрі з напруженістю 500 В/м.
- 4.5** Знайти, якій частоті відповідає довжина хвилі 0,25 мкм та яка енергія фотонів УФ випромінювання.
- 4.6** Чому дорівнює показник заломлення електромагнітних хвиль у матеріалі радіопоглинача, якщо швидкість цих хвиль в ньому дорівнює $2,5 \cdot 10^8$ м/с?
- 4.7** Розрахувати зони енергетичної експозиції для частоти 300 МГц, якщо час впливу на людину протягом 2 діб (48 год.) Вважати, що напруженість електростатичного поля E складає 50 В/м.
- 4.8** Знайти об'ємну густину енергії електричного поля в матеріалі радіопоглинача з напруженістю 100 В/м та діелектричною проникністю $\epsilon=2$
- 4.9** Знайти об'ємну густину енергії магнітного поля в матеріалі радіопоглинача з напруженістю 10^{-3} А/м.
- 4.10** Знайти мінімальний радіус дії далекої зони електромагнітних хвиль частотою 10^{13} Гц, у якій поширюється електромагнітне поле і існує вплив інтенсивності випромінювання на елементи довкілля.

РОЗДІЛ 5

ЗАХИСТ ВІД ІОНІЗУЮЧИХ ВИПРОМІНЮВАНЬ

Серед способів убезпечення від шкідливих випромінювань ключовим є захист віддаленням (праця з джерелами небезпечного випромінювання за допомогою маніпуляторів та ін.). Достатньо ефективним є також захист часом – зменшений час роботи з небезпечними джерелами.

В умовах підвищеної радіаційної небезпеки одним з ефективних методів захисту є екрани, які блокують високоенергетичні частинки іонізуючого випромінювання. Екрани можливо розраховувати, ґрунтуючись на знанні законів проходження крізь них іонізуючого випромінювання [12-17].

Існують різні види іонізуючого випромінювання: α -випромінювання; β -випромінювання; γ -випромінювання; протони; нейтрони; мезони; уламки атомних ядер. Вони мають різні властивості. Відтак, різноманітними є механізми взаємодії іонізуючого випромінювання з речовиною та різноманітні закони, які описують ці фізичні процеси [3, 8, 9, 15, 16, 24].

Радіоактивність – це процес спонтанної зміни нестабільних атомних ядер в ядра інших елементів, що супроводжується іонізуючим випромінюванням.

Явище радіоактивності описує закон радіоактивного розпаду.

$$N = N_0 \cdot e^{-\lambda t}, \quad (5.1)$$

де N і N_0 – кількість радіоактивних ядер в момент часу t і початкова їх кількість відповідно, λ – константа розпаду.

Активність a – це швидкість радіоактивного розпаду.

$$a = -\frac{dN}{dt} = \lambda \cdot N. \quad (5.2)$$

Одиниця активності в системі SI – 1 Бк = 1 розпад/с. Позасистемна одиниця 1 Ки = $3.7 \cdot 10^{10}$ Бк.

Період напіврозпаду $T_{1/2}$ – це час, за який розпадається половина початкової кількості ядер

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0,693}{\lambda} . \quad (5.3)$$

З поняттям активності пов'язане поняття питомої активності. Питома активність q – це відношення активності радіоактивної речовини до її маси m

$$q = \frac{a}{m} , \quad (5.4)$$

З вимірювань питомої активності можливо визначити період напіврозпаду речовини. Якщо радіоактивний ізотоп А вмістити в герметичний контейнер і в цьому посуді внаслідок розпаду ізотопу А з'явиться радіоактивний ізотоп В, то після значного проміжку часу кількість ізотопу В може бути встановлена з певного співвідношення.

$$N_A \cdot \lambda_A = N_B \cdot \lambda_B \quad (5.5)$$

Ця пропорція визначає стан радіоактивної рівноваги. Ізотоп В, зазнаючи розпаду, перетворюється на інший радіоактивний ізотоп С, і так далі. У такий спосіб формується ланцюжок або ряд радіоактивних елементів. Відомі чотири радіоактивні ряди, з яких три мають природне походження, а один – це ряд елементів Np-237, створений штучним шляхом.

З формул (5.2) і (5.3) витікає

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2 \cdot N}{a} . \quad (5.6)$$

Кількість радіоактивних ядер дорівнює

$$N = N_A \cdot \frac{m}{M} , \quad (5.7)$$

де N_A – число Авогадро, M – молярна маса.

Отже з формул (5.6) і (5.7) можна знайти період піврозпаду

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2 \cdot N_A}{M \cdot q} . \quad (5.8)$$

5.1 Проходження іонізуючого випромінювання крізь речовину

Під час взаємодії заряджених частинок іонізуючого випромінювання (скажімо, α - або β -частинок) з речовиною, ключовими процесами є іонізація та збудження атомів. Втрати енергії цих частинок на іонізацію розраховуються за формулою Бора.

$$-\frac{dE}{dx} = \frac{2\pi \cdot Z^2 \cdot e^4 \cdot n \cdot M}{E \cdot m} \cdot \ln \frac{2m \cdot E}{I \cdot M}, \quad (5.9)$$

де E , M – енергія та маса частинки, m – маса електрона в атомі, $I = 13,5$ eV середній потенціал іонізації.

Ще одним властивим механізмом взаємодії легких заряджених частинок з речовиною є гальмівне випромінювання. Воно відповідає за радіаційні втрати енергії легкими частинками.

Для β -частинок з енергією у кілька MeV співвідношення радіаційних втрат енергії до іонізаційних втрат η дорівнює

$$\eta = \frac{E_m \cdot Z}{800}, \quad (5.10)$$

де E_m – максимальна енергія (MeV) β -частинок, Z – атомний номер хімічного елементу, через який проходить β -частинка. За певного значення енергії, радіаційні втрати зрівнюються з іонізаційними. Цю енергію називають критичною, позначуваною $E_{кр}$.

$$E_{кр} = \frac{800}{Z}. \quad (5.11)$$

Пробіг R – це найменша товщина шару речовини, яка зупиняє частинки іонізуючого випромінювання.

Існує кілька емпіричних формул, що використовуються для визначення пробігу. Наприклад, для моноенергетичних електронів максимальний масовий пробіг дорівнює

$$R_m = 0,526 \cdot E(\text{MeV}) - 0,24, \text{ г/см}^2. \quad (5.12)$$

Усі заряджені частинки, які гальмуються, перетворюються на джерела електромагнітного випромінювання, причому його енергія напряму залежить від прискорення у четвертому степені. Отже, таке випромінювання слід брати до уваги для легких зарядів; проте ним можна знехтувати у випадку важких частинок. Втрати енергії на це випромінювання, які відбуваються в речовині, називають радіаційними.

Питомі радіаційні втрати на одиницю шляху, який пройдено часточкою, прямо пропорційні її енергії. Коефіцієнт пропорційності, відповідно, має розмірність 1/см. Обернену величину цього коефіцієнта (запишемо його як l_0) називають радіаційною довжиною.

Лінійні радіаційні втрати енергії можливо виразити у вигляді

$$\left(-\frac{dE}{dx} \right)_{рад.} = \frac{E}{l_0}, \quad (5.13)$$

де l_0 – радіаційна довжина. Розв'язавши це рівняння відносно енергії, можна отримати

$$E = E_0 \exp(-x/l_0). \quad (5.14)$$

З цього виразу стає очевидним значення радіаційної довжини: це дистанція, на якій енергія іонізуючої частинки в речовині падає в e разів, що приблизно дорівнює трикратному зменшенню. Ця довжина залежить виключно від атомного номера елементів речовини та щільності електронів в ній, і може бути обчислена за допомогою формули.

$$l_0 = \frac{4.31 \cdot 10^{26}}{n_e \cdot Z^2 \ln(183/Z^{1/3})} \text{ (см)}. \quad (5.15)$$

5.2 Екранування небезпечних енергетичних випромінювань

Ослаблення потоку β -частинок, що мають безперервний спектр енергій, підкоряється експоненційному правилу.

$$J = J_0 e^{-\mu x}, \quad (5.16)$$

де μ – масовий коефіцієнт загасання в одиницях $\text{см}^2/\text{г}$; x – товщина захисту в $\text{г}/\text{см}^2$. Масовий коефіцієнт в алюмінії обчислюється емпіричною формулою

$$\mu = 22/E_{\text{макс.}}^{1.33}, \text{ см}^2/\text{г} \quad (0.5 \leq E_{\beta} \leq 6 \text{ MeV}).$$

Розглянемо проникнення бета-частинок у алюмінієвий матеріал.

Послаблення бета-випромінювання у алюмінії описується характеристикою, яку називають шаром напівпослаблення. Це показник, який вказує на товщину алюмінієвого шару, потрібну для зменшення інтенсивності бета-випромінювання вдвічі.

Значення цього шару залежить від енергії бета-частинок: чим вища енергія, тим більша товщина алюмінію потрібна для половини послаблення.

Цей параметр є важливим при проектуванні захисту від бета-випромінювання, допомагаючи визначити необхідну товщину матеріалу для досягнення безпечного рівня радіації.

Таким чином, шар напівпослаблення в алюмінії дозволяє оцінити ефективність цього металу як екрана для бета-частинок.

$$\Delta_{1/2} = 0.032 E_{\beta}^{1.33} (\text{г}/\text{см}^2) \quad (5.17)$$

Поглинання речовини описують за допомогою лінійного та масового пробігів, плюс враховують величину шару половинного послаблення. Лінійний пробіг R – це відстань, яку проходить частинка до повної зупинки, або ж мінімальна товщина поглинача, що необхідна для повного поглинання іонізуючого випромінювання. Він залежить від властивостей поглинача та його фізичного стану, також важливо враховувати тип та енергію випромінювання.

Пробіг зростає з підвищенням енергії іонізуючих частинок, він прямо пропорційний їх масі та обернено пропорційний квадрату заряду. Масовий пробіг – пробіг частинки на одиницю маси, вимірюється в грамах на квадратний сантиметр та пов'язаний з лінійним пробігом через просте співвідношення:

$$R_m = \rho R. \quad (5.18)$$

На практиці часто застосовують емпіричні формули для пробігу іонізуючих частинок крізь речовину.

Зокрема, пробіг α -частинок у повітрі можливо обчислити за емпіричною наближеною формулою.

$$R_{\alpha}^{\text{пов.}} = 0.31 \cdot E^{3/2} (\text{см}) \quad (5.19)$$

Для проходження крізь речовину з масовим числом A , інша відома емпірична формула представляє:

$$R_m = 0.56 R^{\text{пов.}} A^{1/3} \text{ (в одиницях мг/см}^2\text{)}. \quad (5.20)$$

Проходження фотонного випромінювання крізь речовину

При проходженні фотонного випромінювання через речовину відбувається перетворення енергії фотонів в елементарних актах їхньої взаємодії з атомами й електронами середовища. В області середніх енергій фотонів (приблизно до 10 MeV) найбільш істотне значення мають фотоефект, комптон-ефект і ефект утворення пар.

Фотоефект. При фотоелектричній взаємодії фотон поглинається атомом і утворюється фотоелектрон. Якщо енергія фотона E_{γ} перевершує енергію зв'язку K -електронів, фотоелектричне поглинання з більшою імовірністю відбувається на K -оболонці. При меншій енергії найбільш ймовірним буде звільнення тих електронів, що мають найбільшу енергію зв'язку E_i . Баланс енергії при фотоелектричному поглинанні має вид

$$E_{\gamma} = E_i + E_e \quad (5.21)$$

де E_e - кінетична енергія фотоелектрона.

Електрон, що вилетів з атома, звільняє місце на відповідному енергетичному рівні, що може бути зайняте менш зв'язаним електроном; при цьому виділиться квант характеристичного випромінювання. При переході менш зв'язаних електронів на вакантні рівні надлишок енергії може безпосередньо привести до вильоту з атома одного з електронів верхніх оболонок (ефект Оже). Таким чином, при фотоефекті частина енергії первинних фотонів перетвориться в кінетичну енергію електронів (фотоелектронів і електронів Оже).

Комптон-ефект. У випадку комптон-ефекту частина енергії первинних фотонів перетворюється в кінетичну енергію електронів віддачі, а частина – в енергію розсіяних фотонів. Позначивши τ лінійний коефіцієнт комптоновської взаємодії, напишемо

$$\sigma = \sigma_k + \sigma_s \quad (5.22)$$

де σ_k і σ_s частина коефіцієнта комптоновської взаємодії, що характеризує перетворення енергії первинного фотона в енергію електронів віддачі й енергію розсіяних фотонів відповідно.

Ефект утворення пар. Для цього ефекту необхідно, щоб енергія первинного фотона була більше $2m_0c^2$ – енергії спокою електрона. При зіткненнях замість первинного фотона утворюються дві частинки – електрон і позитрон. Позитрон взаємодіє із одним з електронів речовини. У результаті утворюються два фотони анігіляційного випромінювання із сумарною енергією $2m_0c^2$. Таким чином, при цьому ефекті енергія первинних фотонів перетворюється в кінетичну енергію іонізуючих частинок (електронів і позитронів) і в енергію анігіляційного випромінювання.

Пройходження гамма-випромінювання крізь екрани. Під час проходження квантів через речовину, їх енергія не змінюється, проте внаслідок зіткнень поступово зменшується інтенсивність пучка I . Закон ослаблення інтенсивності пучка обумовлений характерними для випромінювання механізмами взаємодії з речовиною. До цих механізмів належать: 1) фотоефект, 2) ефект Комптона, 3) народження електрон-позитронних пар. Для першого та третього механізмів взаємодії характерним є експоненціальний закон ослаблення інтенсивності пучка.

$$I = I_0 \cdot e^{-\mu x}, \quad (5.23)$$

де I – первісна інтенсивність, x – товщина шару матеріалу, μ – коефіцієнт поглинання.

Масовий коефіцієнт поглинання становить

$$\mu_m = \mu / \rho, \quad (5.24)$$

де ρ – густина речовини.

Товщина шару, що знижує інтенсивність випромінювання вдвічі, дорівнює

$$x_{1/2} = \ln 2 / \mu = 0,693 / \mu \quad (5.25)$$

Товщина шару десятикратного ослаблення l_{10}

$$l_{10} = \ln 10 / \mu = 2,3 / \mu \quad (5.26)$$

Наприклад, людина на робочому місці працює t годин на тиждень. Гранично допустима еквівалентна доза гамма-випромінювання становить P . Потрібно визначити мінімальну товщину захисного екрана, якщо доза за робочий час дорівнює 100 мР/рік.

Згідно з нормами, гранична допустима доза за один тиждень не повинна перевищувати 100 мР/48 тиж = 2,04 мР/тиж.

Якщо фактична доза перевищує гранично допустиму в N разів, екранування радіації повинно зменшити її також у N разів.

Під час проходження гамма-квантів крізь матеріал їхня енергія не змінюється, але в результаті взаємодій поступово зменшується інтенсивність пучка I .

З закону поглинання
$$\ln \frac{I_0}{I} = \mu \cdot x,$$

Якщо з умов праці
$$\frac{I_0}{I} = 100.$$
 Значить товщина шару поглинання

дорівнює $x = \frac{\ln 100}{\mu}$. Так товщина екрану з свинцю, у якого коефіцієнт

поглинання $\mu = 80$, складає $\frac{\ln 100}{80} = 0,058$ м, тобто 5,8 см.

Проходження нейтронів крізь екрани. Нейтрони не зазнають кулонівської взаємодії. Єдиний вид витрат енергії, зумовлений їхнім проходженням крізь матерію, пов'язаний з ядерними зіткненнями. Під час таких зіткнень швидкі нейтрони можуть настільки сильно штовхнути ядро, що воно втратить свої власні електрони та рушить вперед, викликаючи іонізацію атомів речовини.

Повільні (теплові) нейтрони з енергією E , меншою за 0,1 MeV, не здатні надати ядру значну швидкість, але вони дуже легко проникають усередину ядра та викликають різноманітні ядерні реакції. Уламки ядра, що виникають в реакції, розлітаються, спричиняючи іонізацію і збудження атомів середовища.

Ефективний переріз взаємодії загалом зменшується зі збільшенням енергії нейтронів, але ця залежність не є монотонною. Вона має резонансний характер.

Зменшення інтенсивності пучка нейтронів речовиною приблизно описується експоненціальним законом.

$$\varphi = \varphi_0 \cdot e^{-\mu x}, \quad (5.27)$$

де μ – коефіцієнт поглинання.

Товщина шару десятикратного ослаблення

$$l_{10} = \ln 10 / \mu = 2,3 \cdot M / \sigma \cdot N_A \cdot \rho. \quad (5.28)$$

Лінійні втрати енергії зазвичай вимірюються в MeV/мкм.

5.3 Дози радіації та дозові навантаження. Міграція радіонуклідів

Дози випромінювання являють собою різноманітні енергетичні параметри іонізуючого випромінювання. Виділяють поглинену, експозиційну та еквівалентну дози.

а) Поглинена доза D_p – це енергія, що поглинається одиницею маси речовини.

Одиниця вимірювання поглиненої дози в системі SI – 1 Грей. $1 \text{ Гр} = 1 \text{ Дж/кг}$

б) Експозиційна доза X – це величина заряду, що генерується в одиниці маси речовини під час проходження іонізуючого випромінювання. Одиниця вимірювання дози в системі SI – 1 Кл/кг, позасистемна одиниця – 1 Рентген.

$$1 \text{ Р} = 2,58 \cdot 10^{-4} \text{ Кл/кг}.$$

а) Еквівалентна доза H_T – це результат множення поглиненої дози на коефіцієнт якості k , котрий демонструє, наскільки сильніше біологічний вплив цього випромінювання у порівнянні з дією рентгенівського.

Доза еквівалентна в організмі чи тканині H_T – величина, що визначається

добутком поглиненої дози в конкретному органі чи тканині на радіаційний фактор w_R :

$$H_T = D w_R$$

Одиниця еквівалентної дози в системі SI – Зіверт (Зв). 1 Зв = 100 бер.

Експозиційна доза в 1 Рентген відповідає поглиненій дозі 8,8 мГр, або еквівалентній дозі фотонного випромінювання 8,8 мЗв.

Розглянемо, як визначити еквівалентну дозу методом дозових коефіцієнтів.

В основі методу лежить пряма залежність між радіоактивністю джерела іонізуючого випромінювання та еквівалентною дозою, що виникає від радіоактивного випромінювання. Еквівалентну дозу H можна визначити за формулою (метод дозових коефіцієнтів)

$$H_T = A_v \cdot B_i \cdot v, \quad (5.29)$$

де A_v – об'ємна активність, B_i – дозовий коефіцієнт, v – швидкість споживання. Дозовий коефіцієнт B_i можна обчислити за допомогою формули

$$B_i = \text{ГД} / \text{ГДР} \quad (5.30)$$

Відповідно до вимог НРБУ-97, ліміт дози ГД становить 1 мЗв/рік. Гранична річна доза надходження ГРП для повітря визначається як 3 Бк/рік. Для води ліміт річної надходження ГРП становить 7,1 Бк/рік.

Отже, коефіцієнт дози для повітря $B_{ih} = 0,33 \cdot 10^{-7}$ Зв/Бк, а для води

$$B_{ig} = 1,4 \cdot 10^{-8} \text{Зв/Бк}.$$

Розрахунки доз опромінення радіонуклідами, що мігрують

Моделювання переносу радіонуклідів в довкіллі пов'язане з розв'язанням диференціальних рівнянь переносу типу

$$\partial C / \partial t + \partial(u_i C) / \partial x_i = \partial / \partial x_i (D_i \partial C / \partial x_i) + \lambda C + \sum_j R_j, \quad (5.31)$$

де C – концентрація радіонуклідів, λ – константа розпаду, x_i – координата, U_i – швидкість потоку вздовж осі x_i , D_i – коефіцієнт дифузії, R_j – потужність джерела викиду.

У ситуації усталеного потоку на великих віддальх від місця скиду для тих радіонуклідів, що захоплені турбулентним потоком, розв'язок рівняння (5.31), має вигляд:

$$C = C_0 \cdot e^{-x(b+\lambda)/u}, \quad (5.32)$$

де b – константа осадження частинок,

$$b = v_s^2 / D_y \cdot u_x,$$

де v_s – швидкість седиментації частинок.

Для обчислення радіоактивності води на відстані x кілометрів від точки скиду радіонукліда, що стає замуленим в річці, необхідно знати активність радіонукліда в цій точці, швидкість течії річки u , коефіцієнт осідання частинок b та константу радіоактивного розпаду λ .

Радіаційна активність води прямо пропорційна концентрації радіоактивного ізотопу у воді. Отже, на відстані X від місця викиду активність A води визначається як:

$$A = A_0 \cdot e^{-\frac{x}{u}(b+\lambda)} \quad (\text{Бк/м}^3) \quad (5.33)$$

Приклади розв'язання задач [26]

Приклад 5.1

Визначити вихідну активність A_0 радіоактивного препарату магнію Mg^{27} з масою $m = 0.2$ мкг, а також його активність A через проміжок часу в 6 годин.

$$m = 0.2 \text{ мкг} = 2 \cdot 10^{-10} \text{ кг}$$

$$T_{1/2} = 10 \text{ хв} = 600 \text{ с}$$

$$T = 6 \text{ год} = 2.16 \cdot 10^4 \text{ с}$$

$$A_0 = ? \quad A = ?$$

Розв'язання

Активність ізотопу A визначає швидкість розпаду:

$$A = \lambda N_0 e^{-\lambda t}.$$

Для початкової активності $t = 0$, тобто $A_0 = \lambda N_0$.

$$\lambda = \ln 2 / T_{1/2}.$$

Кількість радіоактивних ядер: $N = mN_A/\mu$, N_A – число Авогадро, μ – молярна маса. В таблицях знайдемо період напіврозпаду та молярну масу, отже: початкова активність препарату

$$A_0 = \frac{m \cdot \ln 2 \cdot N_A}{\mu T_{1/2}};$$

його активність через час t :

$$A = \frac{m \cdot \ln 2 \cdot N_A}{\mu T_{1/2}} \exp\left(-\frac{\ln 2}{T_{1/2}} t\right);$$

$\mu = 27 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}$; $N_A = 6.02 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}$. Початкова активність дорівнює

$$A_0 = \frac{2 \cdot 10^{-10} \cdot 0.693 \cdot 6.02 \cdot 10^{23}}{27 \cdot 10^{-3} \cdot 600} = 5.13 \cdot 10^{12} \text{ Бк},$$

A активність через 6 годин буде дорівнювати

$$A = \frac{2 \cdot 10^{-10} \cdot 0.693 \cdot 6.02 \cdot 10^{23}}{27 \cdot 10^{-3} \cdot 600} \exp(-0.693 \cdot 2.16 \cdot 10^4 / 600) = 81.3 \text{ Бк..}$$

Відповідь: початкова активність A_0 дорівнює $5.13 \cdot 10^{12}$ Бк, а активність через 6 годин дорівнюватиме 81.3 Бк.

Приклад 5.2

Обчисліть питому активність радіоактивного ізотопу, спираючись на вказану в таблиці 5.1 величину періоду його напіврозпаду $T_{1/2}$.

Таблиця 5.1

Варіанти завдань для прикладу 5.2

Вар. №	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Ізотоп	Sr^{90}	I^{131}	Cs^{137}	C^{14}	Po^{210}	Rn^{222}	Ra^{226}	U^{235}	U^{238}	Pu^{242}
$T_{1/2}$	28 років	8 діб	30 років	5730 років	138 діб	3,82 діб	1590 років	$7,1 \cdot 10^8$ років	$4,5 \cdot 10^9$ р.	$3,8 \cdot 10^5$ років

Розв'язання

Період напіврозпаду $T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda},$

де λ – постійна розпаду.

Питома активність

$$q = \frac{a}{m},$$

де a – активність, m – маса ізотопу.

$$a = \lambda \cdot N,$$

де N – кількість радіоактивних ядер. Звідси

$$q = \frac{\ln 2 \cdot N_A}{A \cdot T_{1/2}}.$$

де N_A – число Авогадро, q – питома активність, A – атомна маса.

Підставляючи в останню формулу значення періоду напіврозпаду, які наведені у таблиці, знаходимо питому активність.

Приклад 5.3

Обчислити період напіврозпаду цезію-137, використовуючи дані вимірювання питомої активності ізотопів q , Бк/кг, що дорівнює $3,2 \cdot 10^{15}$ Бк/кг.

Розв'язання

Період напіврозпаду обчислюється за формулою:

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2 \cdot N}{a},$$

$$\text{де } N = N_A \cdot \frac{m}{M},$$

N_A – число Авогадро, M – молярна маса.

$$\text{Отже } T_{1/2} = \frac{\ln 2 \cdot N_A}{M \cdot q} = \frac{0,693 \cdot 6,02 \cdot 10^{23}}{137 \cdot 10^{-3} \cdot 3,2 \cdot 10^{15}} = 30 \text{ років.}$$

Відповідь: 30 років.

Приклад 5.4

В результаті радіоактивного розпаду урану-238 формується ізотоп свинцю-206. Скільки альфа- та бета-розпадів супроводжують цей процес?

Розв'язання

Кількість альфа-розпадів дорівнює

$$n_{\alpha} = \frac{\Delta A}{4} = \frac{238 - 206}{4} = 8,$$

кількість бета-розпадів дорівнює

$$n_{\beta} = 2n_{\alpha} - \Delta Z = 2 \cdot 8 - (92 - 82) = 6$$

Відповідь: $n_{\alpha} = 8$, $n_{\beta} = 6$.

Приклад 5.5

Визначити співвідношення лінійних іонізаційних втрат енергії альфа-частинки та протона, що мають однакову кінетичну енергію 5 MeV в азоті.

$$M_p = 1.67 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$$

$$M_{\alpha} = 4 M_p$$

$$Z = 7$$

$$E = 5 \text{ MeV} = 5 \cdot 10^6 \text{ eV}.$$

$$L_{\alpha}/L_p = ?$$

Розв'язання

Відношення лінійних іонізаційних втрат енергії альфа-частинки та протона можна знайти, враховуючи, що енергії у частинок однакові. Підставляючи дані умови задачі у формулу іонізаційних втрат, отримаємо:

$$\frac{L_{\alpha}}{L_p} = \frac{B_{\alpha} \ln \frac{2Em}{4M_p I}}{B_p \ln \frac{2Em}{4M_{\alpha} I}} = \frac{16 \ln \frac{5 \cdot 10^6}{2 \cdot 1840 \cdot 94.5}}{\ln \frac{2 \cdot 5 \cdot 10^6}{1840 \cdot 94.5}} = 10.5$$

При розрахунку було враховано, що відношення маси протона до маси електрона $M_p/m_e = 1840$. Потенціал іонізації азоту за формулою:

$$I(Z) = 13.5 \cdot Z \text{ eV} = 13.5 \cdot 7 \text{ eV} = 94.5 \text{ eV}.$$

Під знаком логарифму стоїть відношення енергетичних величин: E та I , вони обидві були визначені в eV.

Таким чином іонізаційні втрати енергії альфа-частинок перевищують іонізаційні втрати енергії протонів.

Відповідь: 10,5

Приклад 5.6

У скільки разів відрізняються енергетичні втрати протонів та K^+ -мезонів з кінетичною енергією $T = 100$ MeB в алюмінієвій фользі завтовшки 1 мм?

Розв'язання

Величина питомих іонізаційних втрат енергії $\frac{dT}{dx}$ для важких заряджених частинок (за умов $E \ll \frac{Mc^2}{m_e}$), де M і m_e – маси важкої частинки й електрона, визначається співвідношенням

$$-\frac{dT}{dx} = 3,1 \cdot 10^5 \frac{Zz^2 d}{A\beta^2} \left(11,2 + \ln \frac{\beta^2}{z(1-\beta^2)} - \beta^2 \right), \frac{\text{eB}}{\text{см}},$$

де $\beta = \frac{v}{c}$, v – швидкість частинки,

z – заряд частинки, Z , A – заряд і масове число ядер речовини середовища, d – густина речовини середовища в $\frac{\text{г}}{\text{см}^3}$.

Так як заряди протона і K^+ -мезона однакові, співвідношення втрат буде залежати тільки від швидкостей частинок, а точніше від $\beta^2 = \frac{v^2}{c^2}$:

$$\begin{aligned} \left(-\frac{dT_p}{dx} / -\frac{dT_{K^+}}{dx} \right) &= \\ &= \frac{\beta_{K^+}^2}{\beta_p^2} \left(\left(11,2 + \ln \frac{\beta_p^2}{Z_{Al}(1-\beta_p^2)} - \beta_p^2 \right) / \left(11,2 + \ln \frac{\beta_{K^+}^2}{Z_{Al}(1-\beta_{K^+}^2)} - \beta_{K^+}^2 \right) \right) \end{aligned}$$

Повна енергія частинки $E = T + mc^2 = \frac{mc^2}{\sqrt{1-\beta^2}}$,

$$\text{звідки } \frac{T}{mc^2} + 1 = \frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}} \text{ и } \beta^2 = \frac{T^2/m^2c^4 + 2T/mc^2}{T^2/m^2c^4 + 2T/mc^2 + 1}.$$

Позначимо α відношення кінетичної енергії частинки T до енергії покою mc^2 , тоді $\beta^2 = \frac{\alpha^2 + 2\alpha}{\alpha^2 + 2\alpha + 1}$

$$\text{Для протонів } \alpha = \frac{100 \text{ MeB}}{938,3 \text{ MeB}} = 0,1066, \beta^2 = \frac{0,1066^2 + 2 \cdot 0,1066}{0,1066^2 + 2 \cdot 0,1066 + 1} = 0,183.$$

$$\text{Для } K^+ \text{ - мезонів } \alpha = \frac{100 \text{ MeB}}{493,6 \text{ MeB}} = 0,2026, \beta^2 = \frac{0,2026^2 + 2 \cdot 0,2026}{0,2026^2 + 2 \cdot 0,2026 + 1} = 0,309.$$

Відношення втрат для протонів і K^+ - мезонів:

$$\begin{aligned} \left(-\frac{dT_p}{dx} / -\frac{dT_{K^+}}{dx} \right) &= \\ &= \frac{0,309}{0,183} \left(\left(11,2 + \ln \frac{0,183}{13(1-0,183)} - 0,183 \right) / \left(11,2 + \ln \frac{0,309}{13(1-0,309)} - 0,309 \right) \right) \\ &= 1,56 \end{aligned}$$

Відповідь: енергетичні втрати відрізняються у 1,56 разів.

Приклад 5.7

Група протонів з кінетичною енергією $T = 500$ MeB і струмом $I = 1$ мА проходить крізь мідну пластину завтовшки $D = 1$ см. Розрахувати потужність W , що розсіюється групою протонів у пластині.

Розв'язання

Визначимо енергію, яку втрачає один протон в пластині. Для протонів з кінетичною енергією $T = 500$ MeB величина α буде дорівнювати:

$$\alpha = \frac{T}{mc^2} = \frac{500 \text{ MeB}}{938,3 \text{ MeB}} = 0,533 \text{ і тоді } \beta_p^2 = \frac{0,533^2 + 2 \cdot 0,533}{0,533^2 + 2 \cdot 0,533 + 1} = 0,574.$$

Питомі іонізаційні втрати протонів в міді будуть

$$\begin{aligned} -\frac{dT_p}{dx} &= 3,1 \cdot 10^5 \frac{Z_{Cu} \cdot z_p^2 D}{A_{Cu} \cdot \beta_p^2} \cdot \left(11,2 + \ln \frac{\beta_p^2}{Z_{Cu} \cdot (1 - \beta_p^2)} - \beta_p^2 \right) = \frac{3,1 \cdot 10^5 \cdot 29 \cdot 1^2 \cdot 8,96}{63,55 \cdot 0,574} \cdot \\ &\left(11,2 + \ln \frac{0,574}{29 \cdot (1 - 0,574)} - 0,574 \right) = 1,67 \cdot 10^7 \frac{\text{eB}}{\text{см}}. \end{aligned}$$

Потужність, що розсіюється групою протонів в пластині

$$W = \frac{D \cdot I \cdot \left(-\frac{dT_p}{dx} \right)}{z_p} = \frac{1 \text{ см} \cdot 1 \cdot 10^{-3} \text{ А} \cdot 1,67 \cdot 10^7 \frac{\text{eB}}{\text{см}} \cdot 1,67 \cdot 10^{-12} \frac{\text{eB}}{\text{eB}}}{1,6 \cdot 10^{-19} \frac{\text{Кл}}{\text{протон}}} = 1,67 \cdot 10^{-11} \frac{\text{eB}}{\text{с}} = 1,67 \cdot$$

10^4 Вт

Відповідь: Потужність, котра розсіюється в пластині $W = 1,67 \cdot 10^4$ Вт

Приклад 5.8

Визначити питомі іонізаційні втрати мюонів в алюмінії, якщо їхня кінетична енергія дорівнює: 1) 50 MeB, 2) 100 MeB, 3) 500 MeB.

Розв'язання

Відношення кінетичної енергії частинки до енергії спокою позначимо α ,

тоді $\beta^2 = \frac{\alpha^2 + 2\alpha}{\alpha^2 + 2\alpha + 1}$, $\rho_{Al} = 2,7 \frac{\text{г}}{\text{см}^3}$. Використаємо формулу (див. попередні задачі)

$$-\frac{dE}{dx} = 3,1 \cdot 10^5 \frac{Z \cdot Z^2 \cdot \rho}{A \beta^2} \left(11,2 + \ln \frac{\beta^2}{Z(1-\beta^2)} - \beta^2 \right), \frac{\text{еВ}}{\text{см}}$$

Тоді, для: 1. $E = 50 \text{ MeV}$: $\beta^2 = 0,539$ і $\frac{dE}{dx} \approx 6,2 \frac{\text{MeV}}{\text{см}}$;

2. для: $E = 100 \text{ MeV}$: $\beta^2 = 0,736$ і $\frac{dE}{dx} \approx 5,1 \frac{\text{MeV}}{\text{см}}$;

3. для: $E = 500 \text{ MeV}$: $\beta^2 = 0,97$ і $\frac{dE}{dx} \approx 4,8 \frac{\text{MeV}}{\text{см}}$.

Відповідь: 1. $E = 50 \text{ MeV}$: $\beta^2 = 0,539$ і $\frac{dE}{dx} \approx 6,2 \frac{\text{MeV}}{\text{см}}$;

2. для: $E = 100 \text{ MeV}$: $\beta^2 = 0,736$ і $\frac{dE}{dx} \approx 5,1 \frac{\text{MeV}}{\text{см}}$;

3. для: $E = 500 \text{ MeV}$: $\beta^2 = 0,97$ і $\frac{dE}{dx} \approx 4,8 \frac{\text{MeV}}{\text{см}}$.

Приклад 5.9

Розрахувати питомі втрати енергії на іонізацію для протонів з енергією 10 MeV в алюмінії.

Розв'язання

Повна енергія частинки $E = T + Mc^2 = \frac{Mc^2}{\sqrt{1-\beta^2}}$,

$$\text{Звідки} \quad \frac{T}{Mc^2} + 1 = \frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}}$$

і

$$\beta^2 = \frac{\frac{T^2}{M^2 c^4} + 2 \frac{T}{Mc^2}}{\frac{T^2}{M^2 c^4} + 2 \frac{T}{Mc^2} + 1}$$

Відношення кінетичної енергії частинки до енергії спокою частинки позначимо

$$\text{як } \alpha = \frac{T}{mc^2}.$$

Тоді $\beta^2 = \frac{\alpha^2 + 2\alpha}{\alpha^2 + 2\alpha + 1}$, $\alpha = \frac{10 \text{ MeV}}{938,3 \text{ MeV}} = 0,0107$, $\beta^2 = 0,021$, $\rho_{Al} = 2,7 \frac{\text{г}}{\text{см}^3}$.

Якщо ці дані підставити в формулу для іонізаційних втрат:

$$-\frac{dE}{dx} = 3,1 \cdot 10^5 \frac{13 \cdot 1^2 \cdot 2,7}{27 \cdot 0,021} \left(11,2 + \ln \frac{0,021}{13 \cdot (1-0,021)} - 0,021 \right) \frac{\text{еВ}}{\text{см}} = 92,314 \frac{\text{MeV}}{\text{см}}.$$

Варто зауважити, що внесок останнього члена в дужках є незначним і його можна знехтувати при малих значеннях кінетичної енергії частинок.

Легко помітити, що при $\beta^2 \ll 1$ два останні члени – це невеликі поправки до першого, які взаємно компенсуються. Дійсно, застосовуючи розклад в ряд Тейлора, маємо:

$$\ln(1 - \beta^2) - \beta^2 = -\left(-\beta^2 + \frac{1}{2}\beta^4 + \dots\right) - \beta^2 \approx -\frac{1}{2}\beta^4 \rightarrow 0 \text{ при } \beta^2 \ll 1.$$

Отримаємо аналогічний результат: 92,314 МеВ/см, при цьому внесок кожного доданку

$$-\left(\frac{dE}{dx}\right)_1 = \frac{4\pi Z^2}{\beta^2} n_e r_0 m_e c^2 \ln\left(\frac{2m_e c^2 \beta^2}{\bar{I}}\right) = 93,310 \text{ МеВ/см}$$

$$-\left(\frac{dE}{dx}\right)_2 = -\frac{4\pi Z^2}{\beta^2} n_e r_0 m_e c^2 \ln(1 - \beta^2) = 0,407 \text{ МеВ/см}$$

$$-\left(\frac{dE}{dx}\right)_3 = -\frac{4\pi Z^2}{\beta^2} n_e r_0 m_e c^2 \beta^2 = -0,403 \text{ МеВ/см}$$

Доведено, що вплив двох останніх доданків стає помітним, коли кінетична енергія перебільшує енергію спокою.

Відповідь: питомі втрати енергії на іонізацію дорівнюють 92,314 МеВ/см,

Приклад 5.10

Обчислити співвідношення питомих іонізаційних втрат α -частинок та протонів з однаковою кінетичною енергією 10 МеВ у залізі.

Розв'язання

Питомі іонізаційні втрати важких частинок пропорційні квадрату їхнього заряду. Отже, для частинок з різними Z , що рухаються в одному середовищі з однаковою швидкістю V_0 (тобто з однаковим β^2), співвідношення питомих втрат енергії визначається виразом:

$$\left(-\left(\frac{dE_1}{dx}\right)_{V_1=V_0} / -\left(\frac{dE_2}{dx}\right)_{V_2=V_0}\right) = \left(\frac{Z_1}{Z_2}\right)^2,$$

де Z_1 і Z_2 – заряди першої і другої частинок.

В разі використання не швидкості, а кінетичної енергії, необхідно враховувати, що квадрати швидкостей перебувають в оберненій залежності від

їхніх мас ($\beta^2 = \frac{2E}{mc^2}$). Тому формула для співвідношення питомих іонізаційних втрат буде дещо складнішою.

Обчислимо величину втрат протонів та альфа-частинок з однаковою кінетичною енергією у залізі. Кінетична енергія дорівнює 10 MeV.

Знехтувавши в формулі для іонізаційних втрат останнім членом (через його незначність при заданих умовах), матимемо:

$$\begin{aligned} & \left(\left(-\frac{dE}{dx} \right)_\alpha / \left(-\frac{dE}{dx} \right)_p \right) \\ &= \frac{Z_\alpha^2 \cdot \beta_p^2}{\beta_\alpha^2 \cdot Z_p^2} \left(11,2 + \ln \frac{\beta_\alpha^2}{Z_{Fe}(1 - \beta_\alpha^2)} \right) / \left(11,2 + \ln \frac{\beta_p^2}{Z_{Fe}(1 - \beta_p^2)} \right) \\ &= \frac{2^2 \cdot 0,021}{0,0053 \cdot 1^2} \\ & \cdot \left(\left(11,2 + \ln \frac{0,0053}{26 \cdot (1 - 0,0053)} \right) / \left(11,2 + \ln \frac{0,021}{26 \cdot (1 - 0,021)} \right) \right) \\ &= 10,5 \end{aligned}$$

Тобто альфа-частинка, що володіє такою ж кінетичною енергією, як протон, і вдвічі більшим зарядом, витрачає на іонізацію в 10 разів більше енергії, ніж протон.

Відповідь

$$\left(\left(-\frac{dE}{dx} \right)_\alpha / \left(-\frac{dE}{dx} \right)_p \right) = 4 \quad (\text{при енергії } 1 \text{ MeV})$$

$$\left(\left(-\frac{dE}{dx} \right)_\alpha / \left(-\frac{dE}{dx} \right)_p \right) = 7 \quad (\text{при енергії } 1000 \text{ MeV})$$

Приклад 5.11

Обчислити відношення питомих іонізаційних втрат для протонів з енергією 10 MeV у вуглецю та свинцю.

Розв'язання

$$\alpha = \frac{10 \text{ MeV}}{938,3 \text{ MeV}} = 0,01066 \quad (\text{визначення } \alpha \text{ див. приклад 5.8})$$

$$\beta^2 = \frac{0,01066^2 + 2 \cdot 0,01066}{0,01066^2 + 2 \cdot 0,01066 + 1} = 0,02098.$$

Якщо вуглець буде у вигляді графіту, то

$$\rho_C = 2,25 \text{ г/см}^3 \quad \rho_{Pb} = 11,34 \text{ г/см}^3.$$

$$\left(\left(-\frac{dT_{PB}}{dx} \right) / \left(-\frac{dT_C}{dx} \right) \right) = \frac{Z_{Pb} \cdot \rho_{Pb} \cdot A_C}{Z_C \cdot \rho_C \cdot A_{Pb}} \cdot \frac{11,2 + \ln \frac{\beta^2}{Z_{Pb}(1-\beta^2)} - \beta^2}{11,2 + \ln \frac{\beta^2}{Z_C(1-\beta^2)} - \beta^2} = 2$$

Відповідь: у свинці питомі іонізаційні втрати у 2 рази більші, ніж у графіті

Приклад 5.12

Визначити питомі іонізаційні втрати та середню кількість іонів на 1 см пробігу в повітрі для α -частинки з енергією 10 МеВ. На утворення одного іона у повітрі необхідно ≈ 35 еВ. Для повітря: $Z = 7$; $A = 14$; густина $\rho = 1,29 \cdot 10^{-3} \frac{\text{г}}{\text{см}^3}$. Маса α -частинки $M = 3727$ МеВ.

Розв'язання:

Використовуючи такі ж позначення, як і в попередніх задачах, отримаємо:

$$\alpha = \frac{10 \text{ МеВ}}{3727 \text{ МеВ}} = 0,0027, \beta^2 = 0,0053.$$

$$\begin{aligned} \left(-\frac{dE}{dx} \right)_{\alpha} &= 3,1 \cdot 10^5 \cdot \frac{7 \cdot 2^2 \cdot 1,29 \cdot 10^{-3}}{14 \cdot 0,0053} \left(11,2 + \ln \frac{0,0053}{7 \cdot (1 - 0,0053)} - 0,0053 \right) \\ &= 6,1 \cdot 10^5 \frac{\text{еВ}}{\text{см}} = 0,61 \frac{\text{МеВ}}{\text{см}} \end{aligned}$$

Середня кількість іонів, що створюються на 1 см пробігу α -частинки:

$$N = \frac{\left(-\frac{dE}{dx} \right)_{\alpha}}{35 \text{ еВ}} = 1,74 \cdot 10^4 \frac{\text{іонів}}{\text{см}}$$

Відповідь: $\left(-\frac{dE}{dx} \right)_{\alpha} = 0,61 \frac{\text{МеВ}}{\text{см}}; \quad N = 1,74 \cdot 10^4 \frac{\text{іонів}}{\text{см}}$

Приклад 5.13

Визначити питомі радіаційні втрати під час проходження електронів з енергією 50 МеВ крізь алюмінієву мішень і порівняти їх із питомими втратами на іонізацію.

Розв'язання:

Для алюмінію $\frac{137}{Z^{1,3}} \approx 58 < \frac{E}{m_e c^2} \approx 98$. Застосовуємо формули для питомих радіаційних втрат

$$\left(\frac{dE}{dx}\right)_{\text{рад}} = -\frac{\rho \cdot N_A}{A} E \frac{Z^2 r_0^2}{137} \left(4 \ln \frac{183}{Z^{1,3}} + \frac{2}{9}\right) = -5,2 \frac{\text{MeV}}{\text{см}}.$$

Для втрат енергії на іонізацію знаходимо (беручи до уваги $\beta^2 \approx 1$ при енергії

електронів MeV): $\left(\frac{dE}{dx}\right)_{\text{іонізац}} = -6 \frac{\text{MeV}}{\text{см}}.$ Отже $\frac{\left(\frac{dE}{dx}\right)_{\text{іонізац}}}{\left(\frac{dE}{dx}\right)_{\text{рад}}} = 1,2.$

Іонізаційні втрати близькі до радіаційних, оскільки енергія 50 MeV для електронів в алюмінії наближена до критичної. Критична енергія $E_{\text{кр}}(\text{Al}) \approx 42,7 \text{ MeV}.$

Відповідь: відношення іонізаційних втрат до радіаційних втрат енергії дорівнює 1,2.

Приклад 5.14

Електрони та протони з енергією $E = 100 \text{ MeV}$ падають на алюмінієву пластинку товщиною $\Delta x = 5 \text{ мм}.$ Визначити енергію електронів і протонів на виході із пластинки.

Розв'язання

Використовуючи дані задач 5.10 і 5.13, отримаємо такі сумарні втрати енергії (іонізаційні + радіаційні) електронів при проходженні пластинки:

$$\Delta E_e = \left(\left| \left(\frac{dE}{dx} \right)_{\text{іонізац}} \right| + \left| \left(\frac{dE}{dx} \right)_{\text{рад}} \right| \right) \cdot \Delta x = (6,4 + 2 \cdot 5,2) \cdot 0,5 = 8,4 \text{ MeV}$$

Питомі іонізаційні втрати протонів з $E \text{ MeV}$ при проходженні пластинки з алюмінію було отримано $\left| \frac{dE_p}{dx} \right|_{\text{іоніз}} = 15 \frac{\text{MeV}}{\text{см}}.$ Тому $\Delta E_p = 15 \cdot 0,5 = 7,5 \text{ MeV}.$

Тоді

$$(E_e)_{\text{вих}} = E - \Delta E_e = 100 - 8,4 = 91,6 \text{ MeV}$$

$$(E_p)_{\text{вих}} = E - \Delta E_p = 100 - 7,5 = 92,5 \text{ MeV}$$

Відповідь: енергії електронів та протонів на виході з пластинки дорівнюють 91,6 MeV і 92,5 MeV відповідно.

Приклад 5.15

Обчислити значення еквівалентної дози для дорослих та дітей, якщо зафіксовано об'ємну активність у повітрі 100 Бк/м. Тривалість перебування в зоні становить 1 добу.

Розв'язання

Дозовий коефіцієнт для повітря дорівнює

$$B_{ih} = 0,33 \cdot 10^{-7} \text{ Зв/Бк.}$$

Швидкість споживання повітря v – це середня швидкість дихання. Для дорослих її вважають рівною 23 м³/добу, а для дітей - 13 м³/добу, або 8,4·10³ м³/рік і 5,5·10³ м³/рік відповідно.

Еквівалентна доза для дорослих дорівнює

$$H_T = 100 \cdot 0,33 \cdot 10 \cdot 23 = 0,08 \text{ мЗв,}$$

для дітей

$$H_T = 100 \cdot 0,33 \cdot 10 \cdot 13 \cdot 1 = 0,44 \text{ мЗв.}$$

Відповідь: Еквівалентна доза для дорослих дорівнює 0,08 мЗв, а для дітей - 0,44 мЗв.

Приклад 5.16

Радіаційне забруднення питної води становить об'ємну активність $A_v = 370$ Бк/л. Розрахувати річну еквівалентну дозу H_T на організм дорослої людини, якщо об'єм споживання води складає 2 л на добу і об'ємна активність води зберігається вдовж року.

Розв'язання:

Для води коефіцієнт дози дорівнює

$$B_{ig} = \Gamma Д / ГРП = 10^{-3} / 7,1 \cdot 10^4 = 1,4 \cdot 10^{-8} \text{ (Зв/Бк).}$$

Використовуючи значення дозового коефіцієнта та річний об'єм споживання води $V = 2 \cdot 365 = 730$ л/рік = 0,73 м³/рік, отримаємо еквівалентну дозу

$$H_T = 370 \cdot 10^3 \cdot 1,4 \cdot 10^{-8} \cdot 0,73 = 3,7 \cdot 10^{-3} \text{ Зв/рік.}$$

Відповідь: еквівалентна доза дорівнює 3,7 мЗв/рік

Приклад 5.17

Розрахувати активність води на віддалі $x=5$ км від точки скиду замуленого радіонукліду в річку. Активність радіонукліда у місці скиду становить 500 Бк/л. Швидкість течії річки $u=0,5$ м/с. Константа осаду частинок $b=5$, константа розпаду $\lambda=0,1$ год⁻¹.

Розв'язання:

Радіаційна активність води прямо пропорційна концентрації радіонукліду у воді. Отже, на віддалі x від точки скиду об'ємна активність A води дорівнює

$$A = A_0 \cdot e^{-\frac{x}{u}(b+\lambda)}$$

Підставляючи чисельні дані з умови задачі, отримаємо

$$A = 112 \cdot 10^3 \text{ Бк/м}^3$$

Відповідь: об'ємна активність води дорівнює $112 \cdot 10^3 \text{ Бк/м}^3$.

Приклад 5.18

Розрахувати еквівалентну дозу на земній поверхні, що виникає від фотонного випромінювання хмарини радіоактивних газів, суміші ізотопів Криптон (Kr) та Ксенон (Xe). Хмара утворилася внаслідок аварії на реакторі ВВЕР-440, коли 10 % від загальної кількості радіоактивного палива, що знаходилося в активній зоні реактора, було викинуто в атмосферу. Висота викиду – 60 м, швидкість вітру $U=1.6$ м/с, відстань від місця викиду – 3 км за напрямком вітру.

Розв'язання

Враховуючи зазначені умови, час, потрібний для переміщення радіоактивної хмари до місця вимірювання, становить: $t=x/u=30$ хвилин. Повне завантаження активної зони реактора ураном складає 41,5 тони, а питома активність q суміші ізотопів криптону (Kr) та ксенону (Xe) дорівнює $4,06 \cdot 10^{16}$ і $1,07 \cdot 10^{17}$ Бк/т відповідно. Відповідно, активність суміші радіоактивних газів в точці вимірювання буде такою:

$$Q = q \cdot m \cdot \delta = (0,41 + 1,07) \cdot 10^{17} \cdot 41,5 \cdot 0,1 = 6,14 \cdot 10^{17} \text{ Бк}$$

За умови задачі коефіцієнт метеорологічного розбавлення $G = 6,0 \cdot 10^{-5} \text{ с/м}^3$.

Для суміші ізотопів Kr і Xe за довідковими даними коефіцієнт дози $B_{\alpha\gamma}$ дорівнює

$$B_{\alpha\gamma} = 1,07 \cdot 10^{-6} \text{ Зв} \cdot \text{м}^3 / \text{рік} \cdot \text{Бк}.$$

Знаючи дозовий коефіцієнт, еквівалентну дозу H_T від короточасного викиду Q можна розрахувати за формулою

$$H = Q \cdot B_{\beta\alpha\gamma} \cdot G_0 / u = 0,31 (\text{Зв}).$$

Відповідь: еквівалентна доза дорівнює 0,31 Зв.

Приклад 5.19

Під час аварії на АЕС річний викид ізотопу йоду I^{131} в атмосферу становить $Q = 8,1 \cdot 10^{11}$ Бк. Розрахувати еквівалентну дозу радіації на щитовидну залозу дорослої людини, яка потрапляє в організм через дихальні шляхи, якщо коефіцієнт метеорологічного розбавлення дорівнює $G = 5 \cdot 10^{-8} \text{ с/м}^3$.

Розв'язання

Об'ємна активність повітря розраховується за формулою

$$A_v = Q \cdot G / t = 8,1 \cdot 10^{11} \cdot 5,0 \cdot 10^{-8} / 3,16 \cdot 10^7 = 1,3 \cdot 10^{-3} \text{ Бк/м}^3,$$

де $t = 3,16 \cdot 10^7 \text{ с} = 1 \text{ рік}$.

Еквівалентна доза розраховується за формулою

$$H_T = A_v \cdot B_i \cdot v,$$

і дорівнює

$$H_T = 3,2 \cdot 10^{-6} \text{ Зв/рік}.$$

Відповідь: еквівалентна доза дорівнює $3,2 \cdot 10^{-6} \text{ Зв/рік}$.

Приклад 5.20

Яка частина вузького пучка γ -променів подолає екран зі свинцю завтовшки $d = 1 \text{ см}$, якщо коефіцієнт поглинання випромінювання $\mu = 0,50 \text{ см}^{-1}$?

Дано:

$$E = 6,0 \text{ MeV}$$

$$\mu = 0,50 \text{ см}^{-1}$$

$$I/I_0 = ?$$

Розв'язання

Закон поглинання γ -випромінювання

$$I = I_0 \exp(-\mu d),$$

де I – інтенсивність пучка γ -випромінювання.

З цього закону отримаємо:

$$I/I_0 = \exp(-\mu d) = \exp(-0.5 \cdot 1) = 0.6.$$

Тобто крізь екран пройде 60 % γ -випромінювання.

Відповідь: частина γ -випромінювання, яка пройде через екран зі свинцю завтовшки $d = 1$ см дорівнює 60 %.

Приклад 5.21

Знайти лінійний та масовий коефіцієнти поглинання рентгенівського випромінювання в залізі, якщо енергія $E = 1$ МеВ. Визначити довжину хвилі λ для рентгенівських променів з такою енергією. Товщина шару половинного послаблення становить $1,56 \cdot 10^{-2}$ м. Густина заліза $\rho = 7,9 \cdot 10^3$ кг/м³.

Розв'язання

$$\mu = \frac{\ln 2}{X_{1/2}} = 44,4 \text{ м}^{-1}, \quad \mu_m = \mu / \rho = 5,6 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2 / \text{кг}.$$

З формули Планка $E = h\nu = \frac{hc}{\lambda}$ витікає, що

$$\lambda = h \cdot c / E = 6,62 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8 / 10^6 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} = 11,8 \cdot 10^{-13} \text{ м}.$$

Відповідь: коефіцієнт поглинання дорівнює $\mu = 44,4 \text{ м}^{-1}$

Приклад 5.22

Вимірювана потужність експозиційної дози гамма-випромінювання становить $P_{\text{в}}$. Необхідно визначити найменшу товщину захисного екрану з матеріалу, вказаного в таблиці, за умови, що час роботи на робочому місці дорівнює t годин на тиждень. Гранично допустима доза радіації встановлена на рівні 100 мР/рік.

Для варіантів (див. табл. 5.2) з парними номерами, припускаємо, що $P = 28$ мР/год, а тривалість роботи = 25 годин. Для випадків з непарними

номерами, беремо до уваги, що $P=20$ мР/год, а тривалість роботи = 10 годин на тиждень.

Таблиця 5.2

Варіанти завдань для прикладу 5.22

Варіант №	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Речовина	Al	C (графіт)	Cu	Fe	Pb	Al	Pb	H ₂ O	Fe	Бетон $\rho = 2,3 \text{ т/м}^3$
$\mu, \text{ м}^{-1}$	16	14,2	49,5	44	80	10	47	4,0	28	8,3
E, MeV	1	1	1	1	1	2,5	2,5	3	3	3

Розв'язання

Згідно з нормами гранично допустимої дози, протягом тижня отримана доза не може перевищувати $100 \text{ мР}/48 \text{ тиж} = 2,04 \text{ мР/тиж}$.

Якщо час роботи становить 10 годин на тиждень, то у непарних варіантах реально отримана доза за відсутності радіаційного захисту складатиме 200 мР/тиждень . Ця доза перевищує граничну майже у 100 разів.

Екранування радіоактивного випромінювання має зменшити його у 100 разів.

Під час проходження γ -квантів крізь речовину їхня енергія не змінюється, але внаслідок зіткнень поступово зменшується інтенсивність пучка I . Закон ослаблення інтенсивності пучка зумовлено характерними для γ -випромінювання механізмами взаємодії з речовиною. До цих механізмів належать: 1) фотоефект, 2) ефект Комптона, 3) народження електрон-позитронних пар. Для першого та третього механізмів взаємодії характерним є експоненціальний закон ослаблення інтенсивності пучка

$$I = I_0 \cdot e^{-\mu x},$$

де I – початкова інтенсивність, x – товщина шару речовини, μ – коефіцієнт поглинання. Найбільше значення коефіцієнта поглинання має свинець. Для нього $\mu=80 \text{ м}^{-1}$.

Із закону поглинання $\ln \frac{I_0}{I} = \mu \cdot X$, а з умов праці $\frac{I_0}{I} = 100$. Отже,

товщина шару поглинання дорівнює $x = \frac{\ln 100}{\mu}$ та для екрана з свинцю

становить $\frac{\ln 100}{80} = 0,058 \text{ м}$, тобто 5,8 см.

Відповідь: для свинцю (у випадку непарного варіанту) товщина екрана становить 5,8 см.

Приклад 5.23

Визначити послаблення потоку нейтронів у залізній пластині товщиною 0,1 м, якщо початкова щільність потоку нейтронів $\sigma=5 \cdot 10^4$ нейт/см $\cdot$ с, а ефективний переріз процесу $\sigma = 2,3$ барн. Знайти щільність потоку нейтронів φ .

Розв’язання

$$\varphi = \varphi_0 \cdot e^{-\mu x} = 7,1 \cdot 10^3 \text{ нейт / см}^2 \cdot \text{с}$$

Відповідь: Коефіцієнт поглинання дорівнює $\mu = \sigma \cdot N = \sigma \cdot N_A \rho / A = 0,2 \text{ см}^{-1}$.

Приклад 5.24

Знайти часове розділення детектора методом двох препаратів, якщо відомо, що швидкість лічби дорівнює для 3-х вимірювань $n_1 = 50$ імп/с, $n_2 = 60$ імп/с, $n_{12} = 85$ імп/с

Розв’язання:

Часове розділення визначається за формулою

$$\tau = \frac{n_1 + n_2 - n_{12}}{2 \cdot n_1 \cdot n_2}$$

Підставляючи дані з умови задачі, отримаємо

$$\tau = \frac{50 + 60 - 85}{2 \cdot 50 \cdot 60} = 0,004 \text{ с.}$$

Відповідь: 4 мс.

Приклад 5.25

Визначити енергетичну роздільну здатність спектрометра по Cs-137, знаючи, що ширина фотопіку на половині його висоти складає 6 кеВ.

Розв'язання

Енергетичне розділення визначається за формулою

$$R = \frac{N_{1/2}}{N_{\text{цтп}}} \cdot 100\%,$$

де $N_{1/2}$ – ширина фотопіка на половині висоти піка,

$N_{\text{цтп}}$ – номер каналу, в якому знаходиться центр ваги даного фотопіка.

Підставляючи дані з умови задачі та номер каналу, отримаємо

$$R = 6 \cdot 100 / 661 = 1 \%$$

Відповідь: 1 %

Приклад 5.26

Початкова густина потоку нейтронів $\varphi_0 = 5 \cdot 10^4$ нейт / $\text{см}^2 \cdot \text{с}$, а ефективний переріз процесу $\sigma = 2,3$ барн. Густина потоку нейтронів φ . Знайти зменшення інтенсивності потоку нейтронів у шарі заліза товщиною 0,1 м (1 барн = 10^{-24}см^2).

Розв'язання

Для визначення зменшення інтенсивності потоку нейтронів у шарі заліза товщиною 0,1 м, застосуємо вхідні дані. Задача полягає у обчисленні густини потоку нейтронів φ після його проходження через цей матеріал.

Коефіцієнт поглинання дорівнює $\mu = \sigma \cdot N = \sigma \cdot N_A \cdot \rho / A = 0,2 \text{см}^{-1}$.

Густина потоку нейтронів φ дорівнює

$$\varphi = \varphi_0 \cdot e^{-\mu l} = 7,1 \cdot 10^3 \text{нейт} / \text{см}^2 \cdot \text{с}$$

Ослаблення пучка нейтронів залізом $\varphi_0 / \varphi = 5 \cdot 10^4 / 7,1 \cdot 10^3 = 7$ разів

Відповідь: густина потоку нейтронів зменшується у 7 разів.

Задачі до самостійного розв'язання

- 5.1 З'ясувати товщину шару половинного поглинання альфа-частинок з енергією 0.3 MeV у свинці.
- 5.2 Обчислити товщину шару половинного поглинання альфа-частинок з енергією 0.1 MeV у воді.
- 5.3 Встановити радіаційну довжину електрона з енергією 0,8 MeV у повітрі за нормальних умов.
- 5.4 При проходженні через шар певної речовини товщиною 0.40 см середня енергія швидких електронів знизилася на 25 %. Визначити радіаційну довжину електрона, враховуючи, що втрати енергії електрона переважно радіаційні.
- 5.5 Оцінити початкову енергію електронів, якщо після проходження свинцевої пластини завтовшки 5.0 мм середня енергія електронів становить 42 MeV.
- 5.6 Обчислити енергію E_0 електронів на вході в свинцеву пластину товщиною $\Delta x = 0.1$ см, якщо на її виході енергія електронів дорівнює $E = 2$ MeV.
- 5.7 Визначити критичні енергії електронів для вуглецю, алюмінію, заліза, свинцю.
- 5.8 Обчислити відношення питомих іонізаційних та радіаційних втрат в алюмінії для електронів з енергіями: 10 та 100 MeV.
- 5.9 Знайти лінійний і масовий коефіцієнти поглинання речовиною пучка теплових нейтронів, користуючись значеннями товщини шару десятикратного послаблення I_{10} (табл. 5.3).

Таблиця 5.3

Варіанти завдань для задачі 5.9

Варіант №	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Речовина	Cd	B	Li	Fe	H ₂ O	Pb	Cu	Sn	Al	C (графіт)
$I_{10}, 10^{-2}\text{м}$	0,02	0,023	0,8	3,4	6,7	3,0	2,26	15,4	24	5,0

- 5.10 Оцінити сукупні питомі втрати енергії електронів з енергією 150 MeV в алюмінії та свинці.
- 5.11 Електрон з енергією 10 GeV перетинає алюмінієву пластину товщиною $\Delta x = 1$ см. Яку кількість енергії він втратить?

5.12 Обчисліть коефіцієнт поглинання та товщину шару половинного послаблення для пучка теплових і швидких нейтронів, використовуючи наведені значення повного перерізу поглинання нейтронів (табл. 5.4).

Таблиця 5.4

Варіанти завдань для задачі 5.12

Варіант №	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Речовина	C (графіт)	Fe	Cd	B	Al	Cu	Si	Pb	Sn	Ag
Густина $\rho, 10^3 \text{кг/м}^3$	2,3	7,9	8,6	2,3	2,7	9,0	2,4	11,3	7,3	10,5
Теплові нейтрони σ , барн	3,83	8,5	4500	600	1,6	11,9	2,5	12,5	4,0	3560
Швидкі нейтрони σ' , барн	1,9	3,2	4,1	2,2	2,1	2,9	2,0	6,7	3,6	430

5.13 Визначити енергію електронів на вході у пластину з алюмінію товщиною $\Delta x = 10^{-3}$ м, якщо на виході енергія електронів складає $E = 0,1$ MeV.

5.14 У випадку аварійного вивільнення цезію Cs-137, молоко було забруднене до значень об'ємної активності A_v . Обчисліть річну еквівалентну дозу, H_T , для людського організму, якщо добовий об'єм споживання молока $V = 0,5$ л на добу, і об'ємна активність молока залишається незмінною протягом року. Межу річного надходження радіонуклідів прийняти як $7,1 \times 10^4$ Бк/рік. Для парних варіантів припустіть, що $A_v = 300$ Бк/л, для непарних - $A_v = 400$ Бк/л.

5.15 Визначте еквівалентну дозу для дорослих та дітей, якщо у повітрі зафіксовано об'ємну активність 200 Бк/м³. Час перебування в зоні 2 дні.

5.16 Визначити поглинену дозу та потужність дози, якщо відомо, що у масі 100 кг поглинуто 200 Дж енергії за годину.

5.17 Розрахувати ефективну еквівалентну дозу і потужність дози гамма-випромінювання з енергією квантів ~ 200 кеВ, якщо відомо, що експозиційна доза в повітрі дорівнює X_T , а тривалість перебування в зоні випромінювання становить t . Значення X_T та t вказані в таблиці 5.5.

Таблиця 5.5

Варіанти завдань для задачі 5.17

Вар. №	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
X_T , Рентген	50	50	50	100	100	100	150	150	150	200
t , годин	20	15	10	20	15	10	30	20	10	20

5.18 Визначити еквівалентну дозу та потужність дози для дорослих та дітей, якщо в повітрі зафіксовано об'ємну активність A_v . Тривалість перебування в зоні опромінення – t , годин (табл. 5.6).

Таблиця 5.6

Варіанти завдань для задачі 5.18

Вар. №	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
A_v , Бк/м ³	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500
t , годин	10	10	5	5	5	5	5	5	10	10

5.19 Обчисліть експозиційну дозу та потужність дози фотонного випромінювання, знаючи, що в масі 100 кг поглинено енергію 400 Дж протягом 1 години. Одиниця експозиційної дози 1 Рентген = $2,58 \cdot 10^{-4}$ Кл/кг.

5.20 Експозиційна доза в 1 Рентген відповідає поглиненій дозі 8,8 мГр або еквівалентній дозі фотонного випромінювання 8,8 мЗв. Яка потужність поглиненої та еквівалентної дози звичайного радіаційного фону 12 мкР/год?

5.21 Еквівалентна доза 1 бер (біологічний еквівалент рада) становить 0,01 Зв. Чому дорівнює в системі SI еквівалентна летальна доза ЛД, якщо відомо, що у позасистемних одиницях вона дорівнює 400 рад?

5.22 Знайдіть колективну дозу випромінювання, якщо відомо, що мешканці міста отримали в середньому еквівалентну ефективну дозу 0,02 Зв, а населення міста становить 200 тисяч мешканців.

5.23 Обчисліть річну еквівалентну дозу H_T для тіла дорослої людини, якщо об'єм споживання води становить 2 літри за добу, а об'ємна активність води $A_V = 200$ Бк/л, та зберігається протягом одного року.

5.24 Встановіть потужність еквівалентної дози $\dot{H}$ від зовнішнього γ -випромінювання, якщо зареєстрована потужність експозиційної дози $\dot{X} = 10$ мР/год.

5.25 За наведеними даними з таблиці 5.7 зобразіть графік розподілу даних вимірювань. Проаналізуйте тип розподілу. Знайдіть середнє значення потужності дози, стандартне відхилення та довірчий інтервал.

Таблиця 5.7

Варіанти завдань для задачі 5.25

Вар. №	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$\dot{X}$, мкР/год	8	8	9	10	11	12	14	14	15	17

5.26 Визначити еквівалентну дозу H , отриману працівником протягом робочого тижня від зовнішнього γ -випромінювання, якщо потужність експозиційної дози на робочому місці становить $\dot{X} = 200$ мкР/год. Врахувати, що тривалість зміни 8 годин, тиждень містить 2 вихідних дні.

5.27 Визначити потужність експозиційної дози $\dot{X}$ від зовнішнього γ -випромінювання, якщо за добу поглинена доза в тілі людини склала $D = 0,3$ сГр.

5.28 Повітря за нормальних умов опромінюється γ -променями. Визначити енергію W , що поглинається повітрям масою $m=5$ г при експозиційній дозі випромінювання $X = 258$ мкКл/кг.

5.29 Під впливом космічного випромінювання в повітрі об'ємом $V=1$ см³ на рівні моря утворюється в середньому $N=120$ пар іонів за проміжок часу $\Delta t =$

1 хв. Визначити експозиційну дозу X випромінювання, яке впливає на людину протягом часу $t = 1$ доба.

5.30 Об'єм V іонізаційної камери кишенькового дозиметра дорівнює 1 см^3 , ємність $C=2 \text{ пФ}$. Камера містить повітря за нормальних умов. Дозиметр було заряджено до потенціалу $\phi_1=150 \text{ В}$. Під впливом випромінювання потенціал впав до $\phi_2=110 \text{ В}$. Визначити експозиційну дозу X випромінювання.

5.31 Вимірювання потужності експозиційної дози випромінювання у 3-х дослідах показало 9 мкР/год , у 4-х дослідах 12 мкР/год та у 3-х дослідах – 15 мкР/год . Знайти середню потужність дози, середнє квадратичне відхилення та довірчий інтервал.

5.32 Потужність $\dot{X}$ дози опромінення, створеної джерелом γ -випромінювання з енергією фотонів $E=2 \text{ МеВ}$, дорівнює $0,86 \text{ мкА/кг}$. Необхідно обчислити товщину x свинцевого захисту, який зменшує потужність дози до рівня $\dot{X} = 0,86 \text{ нА/кг}$.

5.33 На дистанції $l=10 \text{ см}$ від точкового джерела γ -випромінювання потужність дози $\dot{X}$ складає $0,86 \text{ мкА/кг}$. На якій мінімальній віддалі $l_{\min}$ від джерела експозиційна доза випромінювання X за робочу зміну $t=6 \text{ год}$ не перевищить $5,16 \text{ мкКл/кг}$? Вважати поглинання γ -випромінювання в повітрі несуттєвим.

5.34 Ознайомитися з «методикою розрахунку захисту від радіації» згідно з додатком А, та виконати завдання, наведені наприкінці додатку.

5.35 Порівняти безпечність допустимих рівнів вмісту радіонуклідів ^{137}Cs і ^{90}Sr основних продуктів харчування та води згідно з таблицею Б.2 додатку Б.

ДОДАТКИ

ДОДАТОК А

РОЗРАХУНОК ЗАХИСТУ ПРОТИРАДІАЦІЙНОЮ СПОРУДОЮ

Розрахунки захисту протирадіаційною спорудою здійснюються згідно з методикою, викладеною в нормативному документі в редакції ДБН В.2.2-5:2023 «Методика розрахунку захисту від радіації» [31]

«

У методиці розрахунків використані наступні аббревіатури: ПРУ – протирадіаційне укриття; СПП – споруда подвійного призначення.

Нормативний коефіцієнт послаблення радіаційного впливу (коефіцієнт захисту) – K_z ПРУ або СПП вважається досягнутим за умови дотримання нерівності:

$$K_z \leq K_{зф} \quad (A.1)$$

де: K_z – нормативний коефіцієнт послаблення, що встановлюється відповідно до таблиці Г.1 з додатку в ДБН В.2.2-5:2023 (див. [31]), залежно від групи укриття (значення при цьому коливаються в діапазоні від 100 до 1000); $K_{зф}$ – розрахунковий коефіцієнт послаблення.

У процесі визначення розрахункового коефіцієнту послаблення радіаційного впливу $K_{зф}$, враховується припущення, що радіоактивні опади рівномірно розподілені на горизонтальних площинах і проекціях похилих та криволінійних поверхонь. Зараження вертикальних поверхонь (стін) не приймається до уваги.

Конструктивні елементи стін і покриттів тамбурів, форкамер, захисних екранів та інших просторів ПРУ або СПП, які безпосередньо взаємодіють із зовнішнім середовищем або простором будівлі, повинні відповідати значенням $K_{ст}$, $K_{пер}$ та $K_{п}$, що прийняті в розрахунках, за умови, що на підставі їхніх результатів $K_z \leq K_{зф}$. (Точність результатів розрахунків, що здійснюються за нижче наведеними формулами – 0,001).

Розрахунковий коефіцієнт послаблення радіаційного впливу $K_{зф}$ для наземних необвалених окремо розміщених ПРУ чи СПП, або тих, що інтегровані у перші поверхи будівель, обчислюється за формулою:

$$K_{зф} = [0,65 K_1 K_{ст} K_{пер} / (V_1 K_{ст} K_1 + (1 - K_{ш}) \times (K_o K_{ст} + 1) \times K_{пер} K_m)] \times K_{НЗ}, \quad (A.2)$$

Коефіцієнт послаблення радіаційного впливу $K_{пв}$ для вбудованих ПРУ або СПЗ, розміщених на рівнях, що відповідають цокольним, підвальним та підземним поверхам, обчислюється за формулою:

$$K_{зф} = [0,77 K_1 K_{ст} K_n / ((1 - K_{ш}) \times ((K'_o K_{ст} + 1) + K_n \times (K_o K_{ст} + 1)) \times K_m)] \times K_{НЗ}, \quad (A.3)$$

Для вбудованих ПРУ або СПП з позначкою підлоги, заглибленою на глибину менше 1,7 м відносно планової позначки землі, обчислення коефіцієнту послаблення виконується за формулою (A.2).

Коли огорожувальні конструкції вбудованого ПРУ чи СПП виходять за межі будівлі, де вони розташовані, розрахунок коефіцієнту послаблення здійснюється згідно з формулою (A.2).

У формулах (A.2) та (A.3) використовуються такі математичні та фізичні величини:

K_1 – коефіцієнт, що враховує частину радіації, яка проходить крізь стіни ПРУ або СПП, і визначається за формулою (A.4), з урахуванням положень пункту 2 цієї методики (див. нижче);

$$K_1 = 360^\circ / (36^\circ + \sum \alpha_i), \quad (A.4)$$

де α_i – кут при вершині, розташований у центрі ПРУ чи СПП, який відповідає i -тій стіні укриття, виражений у градусах.

$K_{ст}$ – показник послаблення стінами ПРУ чи СПП первинного випромінювання, що залежить від ваги огорожувальної конструкції у вертикальній площині, Н/м² (кг/м²) (включно з багат шаровими), і визначається відповідно до таблиці А.1, з урахуванням положень пункту 3 цієї методики (див. нижче);

$K_{пер}$ – коефіцієнт послаблення первинного випромінювання перекриттям ПРУ чи СПП, залежно від ваги огорожувальної конструкції, Н/м² (кг/м²)

(включно з багатошаровими), що визначається згідно з таблицею А.1, з врахуванням положень пункту 4 цієї методики (див. нижче).

K_{Π} – коефіцієнт послаблення перекриттям ПРУ чи СПП вторинного випромінювання, яке розсіяне у приміщенні поверху над укриттям, визначається залежно від ваги огорожувальної конструкції, H/m^2 (kg/m^2) (включно з багатошаровими), згідно з таблицею А.1 додатку та врахуванням положень пункту 4 цієї методики (див. нижче).

V_1 – коефіцієнт, що залежить від висоти та ширини ПРУ чи СПП, та приймається згідно з таблицею А.2 додатку, з урахуванням примітки.

K_o – коефіцієнт, що враховує безпосереднє проникнення випромінювання в ПРУ чи СПП через отвори в огорожувальних конструкціях, та визначається за формулами (А.9)-(А.11), з урахуванням положень пункту 5 цієї методики (див. нижче).

K_m – коефіцієнт, що враховує зменшення дози радіації в ПРУ чи СПП, розташованих в межах забудови, внаслідок екрануючого впливу сусідніх будівель, приймається згідно з таблицею А.3 додатку.

$K_{ш}$ – коефіцієнт, який залежить від ширини ПРУ чи СПП та приймається за таблицею А.2 додатку.

K'_o – коефіцієнт отворів у стінах поверху будівлі, що розташований нижче планувальної відмітки, на якій вбудовано ПРУ чи СПП, приймається рівним: 1.

$K_{нз}$ – коефіцієнт, що враховує неминуче зараження радіоактивними опадами конструкцій перекриття ПРУ чи СПП, приймається:

- для наземних ПРУ чи СПП, які розташовані окремо, вбудовані в одноповерхові будівлі або прибудовані до будь-яких будівель: 0,45;

- для вбудованих ПРУ чи СПП у багатоповерхові будівлі, а також розташованих на відмітках цокольного, підвального та підземного поверхів будівлі, виконаних із штучних кам'яних матеріалів та із залізобетонним перекриттям над 1-м поверхом: 0,8;

- для вбудованих ПРУ чи СПП, розташованих на позначці підземного поверху, якщо перекриття ПРУ чи СПП не є конструкцією, яка, зокрема, утворює підлогу 1-го поверху (тобто між ПРУ чи СПП та підлогою 1-го поверху знаходиться додатковий поверх, в тому числі технічний): 1.

Наведемо деякі положення цієї методики:

1. Для окремих повністю заглиблених у ґрунт захисних споруд (ПЗС) чи споруд подвійного призначення (СПП), або повністю обвалованих будівель (укриттів), незалежно від проектної позначки, дійсний (розрахунковий) коефіцієнт послаблення радіаційного впливу ($K_{зф}$) дорівнює розрахунковому ступіню послаблення ($A_{зф}$), отже повинний визначатися згідно з формулою (Г.1) додатку Г у ДБН В.2.2-5:2023 (див.[31]).
2. Коефіцієнт K_1 , що враховує частину радіації, яка проникає через стіни ПЗС чи СПП, визначається за формулою (А.4).

При обчисленні розрахункового коефіцієнта послаблення радіаційного впливу (коефіцієнта захисту) $K_{зф}$, допускається припущення, що випромінювання крізь будь-яку стіну ПЗС чи СПП (крім споруд, зазначених у пункті 1), пропорційне плоскому куту, що визначає цю стіну з розрахункової точки в центрі приміщення. У прямокутних ПЗС чи СПП чотири плоскі кути утворюються від перетину діагоналей.

Кути α_i визначаються графічним методом на плані ПЗС чи СПП з урахуванням вищезгаданого припущення шляхом нанесення діагоналей та формування відповідної схеми кутів α_i .

Визначення ваги 1 м. кв. кожної i -тої стіни G_i , кг, навпроти кожного кута α_i , здійснюється за формулою:

$$G_i = \rho_i \times y_i \quad (A.5)$$

де G_i – маса огорожувальної конструкції (стіни), без прорізів, кг/м²; ρ_i – густина i -того матеріалу i -тої огорожувальної конструкції (стіни), кг/м³; y_i – товщина шару i -того матеріалу i -ї огорожувальної конструкції (стіни), м.

У випадку застосування багатошарових конструкцій з різних речовин, значення їх маси підсумовуються.

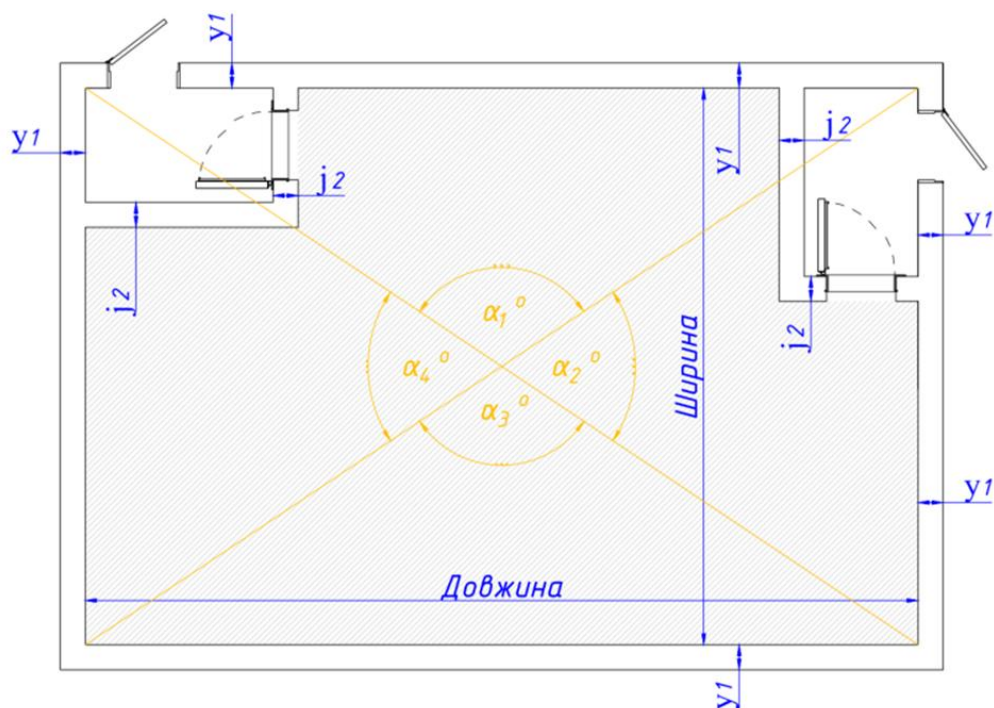


Рис. А.1 Приклад схеми побудови кутів на плані умовного ПРУ чи СПП (без внутрішніх планувальних рішень)

Для проведення подальших розрахунків та визначення кількості кутів, які потрібно враховувати під час розрахунку за формулою (А.4), визначається вага кожної стіни навпроти i -го кута [31]

При обчисленні ваги огорожувальної конструкції в межах одного кута, враховуються виключно стіни ПРУ чи СПП, не враховуючи огорожувальні конструкції будівель/споруд, в які вони вбудовані чи до яких прилягають.

Для вбудованих ПРУ чи СПП, що розташовані на відмітках підземних поверхів, для стін, що межують з ґрунтом навколишньої території, вагу 1 м^2 стіни разом з вагою ґрунту, при розрахунках потрібно приймати не більше 11000 Н (1100 кг).

Визначення ваги 1 м^2 відповідної стіни, кг, з отворами (прорізами), навпроти кожного кута α_i , виконується за формулою:

$$G_{io} = \rho_i \times y_i \times (1 - (S_o / S_{cm})), \quad (\text{А.6})$$

де G_{io} – маса огорожувальної конструкції (стіни), з отворами, кг/м^2 ;

S_0 – площа отворів (прорізів) у зовнішніх огорожувальних конструкціях-стінах (дверних, віконних, отворів з клапанами, тощо), м^2 ; $S_{\text{ст}}$ – площа стіни, м^2 для якої визначається вага.

Під час розрахунку коефіцієнта K_1 за формулою (А.4) беруться до уваги тільки ті кути α_i , проти яких огорожувальні конструкції ПРУ чи СПП: мають сукупну вагу 1 м^2 (проти i -го кута) менше 10000 Н (1000 кг).

У випадку, якщо вага 1 м^2 огорожувальних конструкцій, розташованих у межах усіх кутів α_i , становитиме 10000 Н (1000 кг) і більше, коефіцієнт буде $K_1 = 10$.

3. Коефіцієнт $K_{\text{ст}}$ визначається згідно з таблицею А.1 цього додатку, виходячи з ваги 1 м^2 стіни (огорожувальної конструкції), Н (кг).

Вага 1 м^2 стіни для визначення $K_{\text{ст}}$ розраховується, виходячи з маси огорожувальних конструкцій, що плануються проти кожного i -того кута α_i .

Якщо вага 1 м^2 будь-якої стіни перевищує значення 11000 Н (1100 кг), в розрахунках за формулами (А.7) та (А.8), вага i -тої стіни береться рівною 11000 Н (1100 кг).

Коли сукупна вага стін у кожному куті α_i відрізняється одна від одної на величину менше ніж 2000 Н/м^2 (200 кгс/м^2), показник кратності послаблення випромінювання стінами $K_{\text{ст}}$ визначається відповідно до середньої ваги стін $G_{\text{сер}}$, що визначається за формулою:

$$G_{\text{сер}} = \sum (\alpha_i \times G_i) / \sum \alpha_i, \quad (\text{А.7})$$

де G_i – вага огорожувальної конструкції (стіни), що визначається за формулою (А.5) та (А.6), кг/м^2 ;

У випадку, якщо вага огорожувальних конструкцій (стін) в кожному куті відрізняється одна від одної більше, ніж на 2000 Н/м^2 (200 кг/м^2), величина кратності послаблення випромінювання стінами $K_{\text{ст}}$ визначається за формулою:

$$K_{\text{ст}} = \sum (\alpha_i \times K_{\text{ст},i}) / \sum \alpha_i, \quad (\text{А.8})$$

де $K_{\text{ст},i}$ – коефіцієнт, який визначається відповідно до таблиці А.1 як $K_{\text{ст}}$, окремо для кожної i -тої стіни.

Для цокольних та підвальних поверхів (необвалованих), вага 1 м² стіни, при визначенні коефіцієнта $K_{ст}$ обчислюється, виходячи з розмірів та особливостей її конструкції, що виступає над поверхнею землі.

Для вбудованих ПРУ чи СПП, які розташовані на відмітках підземних поверхів, при визначенні коефіцієнта $K_{ст}$ відносно стін, що контактують із ґрунтом навколишньої території (в тому числі з отворами), вагу 1 м² стіни разом із вагою ґрунту слід приймати не більше 11000 Н (1100 кг).

4. Значення коефіцієнтів $K_{пер}$ та $K_{п}$ визначаються на основі ваги 1 м² покриття ПРУ чи СПП, яка формується із щільності і-го матеріалу та товщини і-тої конструкції покриття (включно з багатошаровою). Коефіцієнти визначаються згідно з таблицею А.1 цього додатку, при цьому передбачається, що відкриті отвори в покритті, яке в тому числі може виступати перекриттям, повністю відсутні.

5. Коефіцієнт K_o , який враховує безпосереднє проникнення у ПРУ чи СПП випромінювання крізь отвори, потрібно приймати при розташуванні низу вказаних отворів-прорізів (дверних, віконних тощо) у зовнішніх стінах на висоті від підлоги ПРУ чи СПП:

$$\leq 0,8 \text{ м, рівним: } K_o = 0,8 \times a, \quad (\text{A.9})$$

$$0,81-1,5 \text{ м, рівним: } K_o = 0,15 \times a, \quad (\text{A.10})$$

$$\geq 2 \text{ м, рівним } K_o = 0,09 \times a, \quad (\text{A.11})$$

Якщо значення a дорівнює 0, що досягається шляхом застосування конструктивних рішень, то коефіцієнт K_o приймається рівним 0.

Коефіцієнт a визначається за формулою:

$$a = S_o / S_n, \quad (\text{A.12})$$

де S_o – це площа отворів (прорізів) у зовнішніх конструкціях – стінах (дверних, віконних, з клапанами тощо), що виражається у м², котрі не захищені екранами або іншими конструктивними засобами. Наповнення прорізів герметичними дверима, ставнями та іншими засобами захисту не вважається захистом прорізу від радіації !

S_n – площа підлоги ПРУ чи СПП, виражена у м².

У випадках застосування захисних екранів, огорожувальних конструкцій, виконаних під певним кутом, або інших аналогічних рішень, коли вага 1 м^2 такої конструкції чи екрану відповідає ваговим параметрам огорожувальної конструкції, яка забезпечує необхідний коефіцієнт послаблення радіації, значення площі S_0 визначається шляхом підсумовування площ отворів, сформованих під певним кутом.

На рисунку А.2 представлено приклад умовного проникнення радіоактивного випромінювання всередину захисної споруди, під кутом, через отвір з шириною n_i та відповідною висотою h_i , які визначають певне значення $S_{oi}=n_i \times h_i$.

На рисунку А.3 зображено приклад можливого варіанту конструктивного виконання огорожувальних конструкцій вхідного тамбуру та захисного екрану, які зводять значення площі S_0 до нульового показника.

Для зниження значення площі S_0 можуть використовуватися різні планувальні рішення (встановлення зовнішніх захисних екранів, включаючи ті, що мають покриття, облаштування додаткових поворотів під кутом тощо).

Характеристики захисних екранів, різних конструкцій, що виконують роль огороження, зокрема входів, тамбурів, шахт, форкамер, розширювальних камер, інших просторів ПРУ чи СПП, за показниками послаблення радіаційного впливу повинні відповідати параметрам огорожувальних конструкцій захисних споруд чи СПП. Зважаючи на з'єднання з навколишнім середовищем через отвір (проріз, включно з тими, що заповнені дверима, ставнями, іншими пристроями), а також із об'ємом будівлі, в яку вони вмонтовані, існує можливість проникнення радіації. Ці екрани повинні брати участь у підтвердженні виконання нерівності $K_{зф} \geq K_z$, а огорожувальні конструкції, позначені на рисунках А.2, А.3 як «с₂», за всіма характеристиками повинні відповідати стінам, що позначені як «у₁».

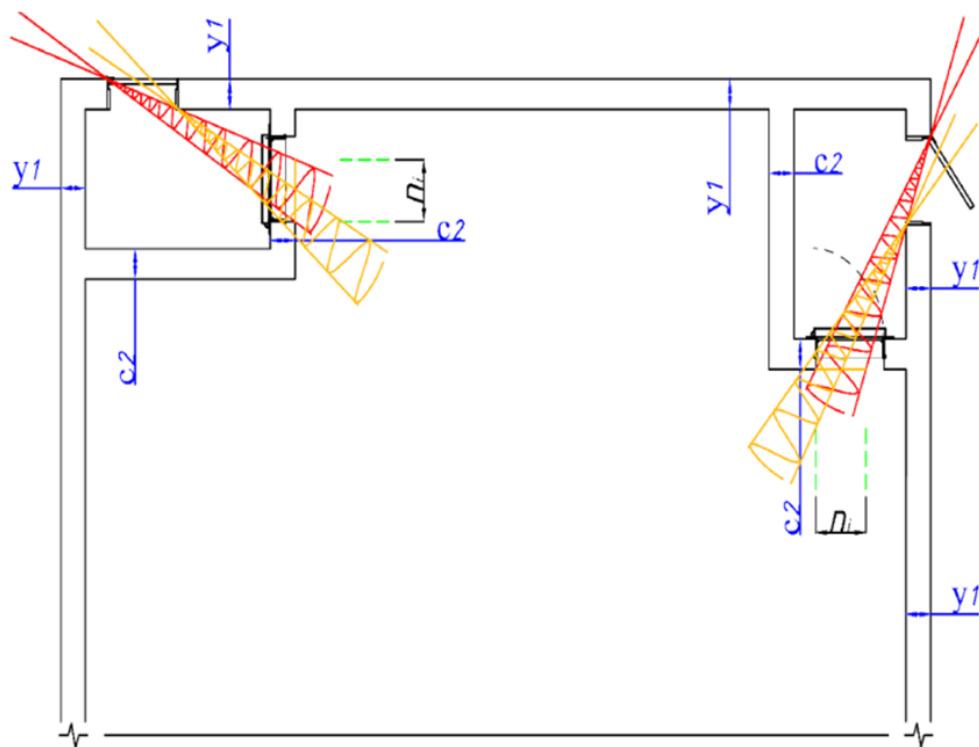


Рис. А.2 Приклад умовного проникнення всередину захисної споруди радіоактивного випромінювання [31]

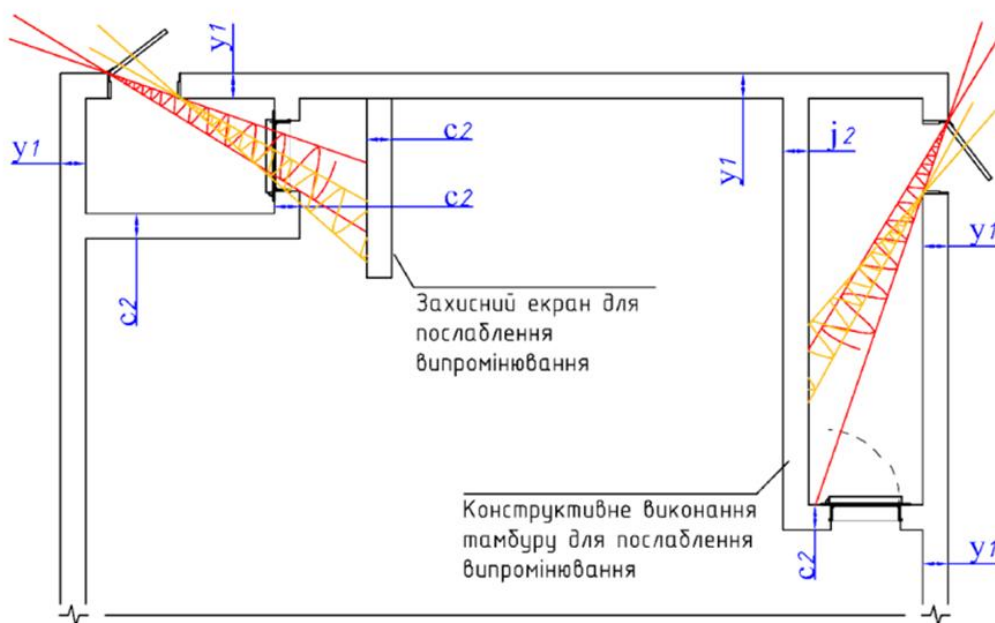


Рис. А.3 Приклад можливого варіанту конструктивного виконання огорожувальних конструкцій вхідного тамбуру та захисного екрану [31]

Деякі значення коефіцієнтів $K_{ст}$, $K_{пер}$ і $K_{п}$ [31]

Вага 1 м ² огорожувальних конструкцій, Н (кг)	Кратність послаблення γ -випромінювання радіаційно зараженої місцевості		
	стіною, $K_{ст}$, (первинного випромінюван ня)	переkritтям, $K_{пер}$, (первинного випромінювання)	переkritтям підвалу, $K_{п}$, (вторинне випромінювання)
1500 (150)	2	2	7
2000 (200)	4	3,4	10
2500 (250)	5,5	4,5	15
3000 (300)	8	6	30
3500 (350)	12	8,5	48
4000 (400)	16	10	70
4500 (450)	22	15	100
5000 (500)	32	20	160
5500 (550)	45	26	220
6000 (600)	65	38	350
6500 (650)	90	50	500
7000 (700)	120	70	800
8000 (800)	250	120	2000
9000 (900)	500	220	4500
10000 (1000)	1000	400	10000
11000 (1100)	2000	700	$\geq 10^4$
12000 (1200)	4000	1100	$\geq 10^4$
13000 (1300)	8000	2800	$\geq 10^4$
15000 (1500)	$\geq 10^4$	4500	$\geq 10^4$

Примітка 1. Для проміжних значень ваги 1 м. кв. огорожувальних конструкцій коефіцієнти $K_{ст}$, $K_{пер}$ і $K_{п}$, слід приймати за інтерполяцією.

Деякі значення коефіцієнтів $K_{ш}$ та V_1 [31]

№ з.п.	Висота приміщення, м	Коефіцієнт $K_{ш}$ та V_1 та при ширині ПРУ чи СПП					
		3	6	12	18	24	≥ 48
Коефіцієнт $K_{ш}$							
1	-	0,06	0,16	0,24	0,38	0,38	0,5
Коефіцієнт V_1							
1	2	0,06	0,16	0,24	0,38	0,38	0,5
2	3	0,04	0,09	0,19	0,27	0,32	0,47
3	6	0,02	0,03	0,09	0,16	0,2	0,34
4	12	0,01	0,02	0,05	0,06	0,09	0,15

Примітка 1. Для проміжних значень ширини та висоти ПРУ або СПП коефіцієнти $K_{ш}$ та V_1 визначаються шляхом інтерполяції.

Деякі значення коефіцієнта K_m [31]

Місце розташування укриття	Коефіцієнт K_m при ширині зараженої ділянки, яка межує з будинком, м							
	5	10	20	30	40	60	100	300
На першому або підвальному поверсі	0,45	0,55	0,65	0,75	0,8	0,85	0,9	0,98

Примітка 1. Ширина ураженої зони – найбільша відстань, що визначається за перпендикуляром від огорож укриття до найближчих будівель/споруд.

Примітка 2. Під час розроблення проектної документації для повторного застосування в будівництві ПРУ чи СПП, дозволяється визначати коефіцієнт захисту $K_{зф}$, використовуючи середні значення коефіцієнта K_m , що відповідають: 0,5 – для виробничих і допоміжних будівель та споруд на території промислової зони населених пунктів; 0,7 – для будівель/споруд будь-якого призначення, розташованих на території житлової (сельбищної) зони населених пунктів; 1 – для окремих будівель/споруд.

».

Завдання:

1) Визначити відповідність ступеня захисту модельної протирадіаційної споруди тій, що відповідає групі укриття П-5 (укриття в 30-кілометровій зоні навколо АЕС) для яких коефіцієнт послаблення радіаційного впливу (коефіцієнт захисту) $K_z = 200$. У розрахунках застосувати такі значення коефіцієнтів: $K_1 = 360/(36+90)$, $K_{ст} = 250$, $K_{пер} = 120$, $V_1 = 0.06$, $K_{ш} = 0.06$, $K_o = 0.10$, $K_M = 0.55$, $K_{нз} = 0.45$.

2) Проаналізувати вплив коефіцієнта K_o (який враховує «безпосереднє проникнення в ПРУ чи СПП випромінювання, крізь отвори в огорожувальних конструкціях») на розрахунковий коефіцієнт послаблення $K_{зф}$ захисною спорудою рівня радіації (наприклад, зменшуючи K_o в межах від 0.1 до 0.001).

Розв'язок:

K_o	$K_{зф}$	$K_z \leq K_{зф}$
0.1	15.140692	ні
0.01	96.429631	ні
0.001	208.22210	так

ДОДАТОК Б

Таблиця Б.1

Період напіврозпаду $T_{1/2}$ деяких радіоактивних нуклідів

Нуклід	$T_{1/2}$	Нуклід	$T_{1/2}$
Вуглець (^{14}C)	5 730 років	Радій (^{226}Ra)	1 620 років
Кобальт (^{58}Co)	71 доба	Торій (^{232}Th)	$1,41 \cdot 10^{10}$ років
Стронцій (^{90}Sr)	28 років	Уран (^{238}U)	$4,5 \cdot 10^9$ років
Полоній (^{210}Po)	140 діб	Уран (^{239}U)	23,54 хвилини
Радон (^{226}Rn)	3,82 доби	Плутоній (^{239}Pu)	24 390 років

Таблиця Б.2

Допустимі рівні вмісту радіонуклідів ^{137}Cs і ^{90}Sr в основних продуктах харчування та питній воді (Бк·кг, л⁻¹)

№п/п	Найменування продукту	^{137}Cs	^{90}Sr
1.	Хліб, хлібопродукти	20	5
2.	Картопля	60	20
3.	Овочі	40	20
4.	Фрукти	70	10
5.	М'ясо і м'ясопродукти	200	20
6.	Риба свіжа та морожена	150	35
7.	Молоко та молокопродукти	100	20
8.	Яйця птиці	100	30
9.	Вода питна	2	2
10.	Алкогільні напої	50	30
11.	Лікарські рослини	200	100
12.	Безалкогольні напої	20	20
13.	Лікарські рослини	200	100
14.	Гриби свіжі	500	50
15.	Дитяче харчування	40	5

Таблиця Б.3

Назви, символи та атомні маси деяких хімічних елементів

№ п/п	Назва	Символ	Атомна маса	№ п/п	Назва	Сим вол	Атомна маса
1	Водень	H	1,0079	56	Барій	Ba	137,33
2	Гелій	He	4,00260	57	Лантан	La	138,9055
3	Літій	Li	6,90041	58	Церій	Se	140,12
4	Берилій	Be	9,01218	59	Прасеодим	Pr	140,9077
5	Бор	B	10,81	60	Неодим	Nd	144,24
6	Вуглець	C	12,011	61	Прометій	Pn	[145]
7	Азот	N	14,0067	62	Самарій	Sn	150,4
8	Кисень	O	15,9994	63	Європій	Ео	151,96
9	Фтор	F	18,9984	64	Гадоліній	Gd	157,25
10	Неон	Ne	20,179	65	Тербій	Tb	158,9254
11	Натрій	Na	22,98977	66	Диспрозій	Dy	162,50
12	Магній	Mg	24,305	67	Гольмій	Ho	164,9304
13	Алюміній	Al	26,98154	68	Ербій	Er	167,26
14	Кремній	Si	28,0855	69	Тулій	Tm	168,9342
15	Фосфор	P	30,97376	70	Ітербій	Yb	173,04
16	Сера	S	32,06	71	Лютецій	Lu	174,967
17	Хлор	Cl	35,453	72	Гафній	Hf	178,49
18	Аргон	Ar	39,948	73	Тантал	Ta	180,947
19	Калій	K	39,0983	74	Вольфрам	W	183,85
20	Кальцій	Ca	40,08	75	Реній	Re	186,21

Таблиця Б.3
(продовження 1)

Назви, символи та атомні маси деяких хімічних елементів

№ п/п	Назва	Символ	Атомна маса	№ п/п	Назва	Сим вол	Атомна маса
21	Скандій	Sc	44,9559	76	Осмій	Os	190,2
22	Титан	Ti	47,90	77	Іридій	Ir	192,22
23	Ванадій	V	50,9415	78	Платина	Pt	195,08
24	Хром	Cr	51,996	79	Золото	Au	196,97
25	Марганець	Mn	54,9380	80	Ртуть	Hg	200,59
26	Залізо	Fe	55,847	81	Талій	Tl	204,38
27	Кобальт	Co	58,9332	82	Свинець	Pb	207,2
28	Нікель	Ni	58,71	83	Вісмут	Bi	208,98
29	Мідь	Cu	63,546	84	Полоній	Po	[209]
30	Цинк	Zn	65,38	85	Астат	At	[210]
31	Галій	Ga	69,735	86	Радон	Rn	[222]
32	Германій	Ge	72,59	87	Францій	Fr	[223]
33	Миш'як	As	74,9216	88	Радій	Ra	226,03
34	Селен	Se	78,96	89	Актиній	Ac	[227]
35	Бром	Br	79,904	90	Торій	Th	232,04
36	Криптон	Kr	83,80	91	Протактиній	Pa	[231]
37	Рубідій	Rb	85,467	92	Уран	U	238,03
38	Стронцій	Sr	87,62	93	Нептуній	Np	[237]
39	Ітрій	Y	88,9059	94	Плутоній	Pu	[244]
40	Цирконій	Zr	91,22	95	Америцій	Am	[247]

Таблиця Б.3
(продовження 2)

Назви, символи та атомні маси деяких хімічних елементів

№ п/п	Назва	Символ	Атомна маса	№ п/п	Назва	Сим вол	Атомна маса
41	Ніобій	Nb	92,9064	96	Кюрій	Cm	[247]
42	Молібден	Mo	96,94	97	Берклій	Bk	[247]
43	Технецій	Tc	98,9062	98	Каліфорній	Cf	[251]
44	Рутеній	Ru	101,07	99	Ейнштейній	Es	[252]
45	Родій	Rh	102,9055	100	Фермій	Fm	[257]
46	Паладій	Pd	106,4	101	Менделевій	Md	[258]
47	Срібло	Ag	107,868	102	Нобелій	No	[259]
48	Кадмій	Cd	112,401	103	Лоуренсій	Lr	[260]
49	Індій	In	114,82	104	Дубній	Db	[261]
50	Олово	Sn	118,69	105	Джоліотій	Jl	[262]
51	Сурма	Sb	122,75	106	Резерфордій	Rf	[263]
52	Телур	Te	127,60	107	Борій	Bh	[262]
53	Йод	I	125,9045	108	Ганій	Hn	[265]
54	Ксенон	Xe	131,30	109	Майтнерій	Mt	[266]
55	Цезій	Cs	132,9054	110	Унуннілій	Uun	

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ТА РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Герасимов О. І. Технології захисту навколишнього середовища: підручник / Одеськ. держ. еколог. ун-т. Одеса: ТЕС, 2019. 268 с.
2. Герасимов О. І. Теоретичні основи технологій захисту навколишнього середовища: навчальний посібник. Одеса: ТЕС, 2018. 228 с.
3. Герасимов О. І. Фізичні основи технологій захисту навколишнього середовища: підручник. Одеса: Одеський державний екологічний у-т , 2023. 168 с.
4. Герасимов О. І. Фізика гранульованих матеріалів: монографія. Одеса: ТЕС, 2015. 264 с.
5. Герасимов О. І., Андріанова І. С., Курятников В. В., Співак А. Я. Посібник для пошукувачів рівня підготовки доктор філософії за спеціальністю Технології захисту навколишнього середовища: навчальний посібник. Одеса, Одеський державний екологічний університет, 2021. 213 с. 8.
6. Курятников В. В. Інженерно-фізичні аспекти захисту навколишнього середовища: конспект лекцій / Одеса: ОДЕКУ, 2017. 50 с.
7. Курятников В. В., Співак А. Я, Кільян А. М. Конструювання та інженерно-фізичні принципи систем захисту довкілля: конспект лекцій/ Одеса: ОДЕКУ, 2019. 60 с.
8. Герасимов О. І., Андріанова І. С. Фізика в задачах. Підручник.– Харків: ФОП Панов А.М., 2017. – 564 с.
9. Герасимов О. І., Курятников В. В. та ін. Конспект лекцій із загальної фізики. / Одеса: ТЕС, 2004. – 200 с.
10. Герасимов О. І., Курятников В. В. Фізичне моделювання в технологіях водоочищення// Фізика аеродисперсних систем. 2023. № 61. С. 17-31. <http://fas.onu.edu.ua/issue/view/17225>
11. Курятников В. В. Моделювання міграції радіонуклідів у ґрунті та ґрунтово-екологічний радіаційний моніторинг. Матеріали доповідей Міжнародної заочної мультимедійної (інтернет) конференції «Роль фізики в розвитку

міждисциплінарних напрямків» (PhysIST-2016), 2-5 травня, 2016, Одеса: ТЕС, 2016. С.35-38.

12. Андріанова І. С., Герасимов О. І., Курятников В. В., Співак А. Я. Концептуальні питання освітньо-професійної підготовки фахівців з спеціальності «Технології захисту навколишнього середовища» // Фізика аеродисперсних систем. 2021. № 59. С. 184-193. <https://doi.org/10.18524/0367-1631.2021.59.227380>

13. Герасимов О. І., Андріанова І. С., Сідлецька Д. М., Співак А. Я., Курятников В. В., Кільян А. М. Технології радіаційного захисту з використанням гранульованих матеріалів // Фізика аеродисперсних систем. 2021. № 59. С. 194-200. <https://doi.org/10.18524/0367-1631.2021.59.227384>

14. Кухлахмедов Ю. О., Корогодін В. І., Кольтовер В. К. Основи радіоекології: навч. посібн. Київ: Вища шк., 2003. 319 с.

15. Герасимов О. І. Радіоекологія за галузями: підручник. Одеса: ТЕС, 2016. 100 с.

16. Герасимов О. І., Курятников В. В., Кудашкіна Л. С., Співак А. Я., Кільян А. М. Методи організації радіаційної безпеки : навчальний посібник. Одеса: ОДЕКУ, 2022. 183 с.

17. Норми радіаційної безпеки України (НРБУ-97); Державні гігієнічні нормативи. Київ: Відділ поліграфії Українського центру держсанепіднагляду МОЗ України, 1997. 121 с.

18. Закон України „Про забезпечення санітарного і епідеміологічного благополуччя населення» від 07.02.02 № 3037-III [Електронний ресурс]. - Режим доступу: <http://zakon0.rada.gov.ua/laws/show/4004-12>.

19. Закон України „Про захист людини від впливу іонізуючого випромінювання» від 14.01.98. № 15/98-ВР» [Електронний ресурс]. — Режим доступу : <http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/15/98-вр>.

20. Основні санітарні правила забезпечення радіаційної безпеки України (ОСПУ). ДСП 6.177-2005-09.02. – К, 2005.

21. Державні гігієнічні нормативи. Допустимі рівні вмісту радіонуклідів ^{137}Cs і ^{90}Sr у продуктах харчування та питної води (ДР-2006) // Офіційний вісник України. – 2006. – № 29. – С. 142–150.
22. "Про питну воду та питне водопостачання" [№ 2047-VIII від 18.05.2017](#)
23. Державні санітарні норми та правила "Гігієнічні вимоги до води питної, призначеної для споживання людиною" (ДСанПіН 2.2.4-171-10).2017.
24. Курятников В. В., Кільян А. М. Системи та прилади контролю параметрів довкілля: Конспект лекцій для студентів за спеціальністю «Технології захисту навколишнього середовища» / Одеса: ОДЕКУ, 2018, 73 с.
25. Курятников В. В. Основи електроніки, автоматики та цифрової техніки. Методичні вказівки для студентів з/о форми навчання за напрямом «Гідрометеорологія» - Одеса, ОГМІ, 2000, С. 37.
26. Герасимов О. І., Курятников В. В. Розв'язання задач з «Технологій захисту навколишнього середовища»: навчальний посібник. Одеса; Одеський державний екологічний університет, 2024. 120 с. ISBN 978-966-186-298-1
<http://eprints.library.odeku.edu.ua/id/eprint/13069>
27. Герасимов О. І., Курятников В. В. Моделювання динаміки радіоактивних домішок в умовах річкових стоків в районі морського узбережжя// Фізика аеродисперсних систем. – 2024. – № 62. – С. 130-149.
<http://fas.onu.edu.ua/article/view/318617>
28. Курятников В. В. Конвективно-дифузійна модель оцінки масштабів радіаційних забруднень водних середовищ /Матеріали 79-ї звітної наукової конференції професорсько-викладацького складу і наукових працівників факультету гідрометеорології і екології Одеського національного університету імені І. І. Мечникова (м. Одеса, 27–29 листопада 2024 р.) [Електронний ресурс]. – Електронні текстові дані (1 файл : 9,2 МБ). – Одеса: Одес. нац. ун-т ім. І. І. Мечникова, 2024. – 240 с. ISBN 978-966-186-334 – С. 153-156.
29. Курятников В. В., Герасимов О. І., Калінчак В. В. Перспективи інженерно-фізичної підготовки здобувачів освіти в ОНУ ім. І. І. Мечникова /Матеріали 79-ї звітної наукової конференції професорсько-викладацького складу і наукових

працівників факультету гідрометеорології і екології Одеського національного університету імені І. І. Мечникова (м. Одеса, 27–29 листопада 2024 р.) [Електронний ресурс]. – Електронні текстові дані (1 файл : 9,2 МБ). – Одеса: Одес. нац. ун-т ім. І. І. Мечникова, 2024. – 240 с. ISBN 978-966-186-334-6 С.149-152.

30. Курятников В. В., Калінчак В. В., Орловська С. Г. Інженерно-фізичні аспекти горіння систем завислих вуглецевих частинок /Матеріали 79-ї звітної наукової конференції професорсько-викладацького складу і наукових працівників факультету гідрометеорології і екології Одеського національного університету імені І. І. Мечникова (м. Одеса, 27–29 листопада 2024 р.) [Електронний ресурс]. – Електронні текстові дані (1 файл : 9,2 МБ). – Одеса: Одес. нац. ун-т ім. І. І. Мечникова, 2024. – 240 с. ISBN 978-966-186-334 –С. 166-169

31. Захисні споруди цивільного захисту. Державні будівельні норми України (ДБН В.2.2-5:2023) Офіційне видання. – Київ: Міністерство розвитку громад, територій та інфраструктури України, 2023. – 115 с.
<https://dbn.co.ua/load/normativy/dbn/1-1-0-390>

Навчальне видання

ФІЗИЧНІ ПРИНЦИПИ В ТЕХНОЛОГІЯХ ЗАХИСТУ НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА

НАВЧАЛЬНИЙ ПОСІБНИК

для здобувачів освіти факультету гідрометеорології і екології
спеціальності 183 Технології захисту навколишнього середовища

Укладачі:

Герасимов Олег Іванович

Курятников Владислав Володимирович

Співак Андрій Ярославович

Сідлецька Людмила Михайлівна

Електронне видання мережевого використання

В авторській редакції

Затв. авт. 10.06.2025. Шрифт Times New Roman.
Системні вимоги: операційна система сумісна з програмним забезпеченням
для читання файлів формату PDF.
Обсяг 2,4 МБ. Зам. № 2998.

Видавець і виготовлювач
Одеський національний університет імені І. І. Мечникова
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 4215 від 22.11.2011 р.
вул. Університетська, 12, м. Одеса, 65082, Україна
Тел.: (048) 723 28 39, e-mail: druk@onu.edu.ua