

Міністерство освіти і науки України
Одеський державний екологічний університет

Герасимов О.І.

**ФІЗИЧНІ ОСНОВИ ТЕХНОЛОГІЙ ЗАХИСТУ НАВКОЛИШНЬОГО
СЕРЕДОВИЩА**

**ПІДРУЧНИК
ДЛЯ ПОШУКУВАЧІВ ВИЩОЇ ОСВІТИ ЗА СПЕЦІАЛЬНІСТЮ ТЕХНОЛОГІЇ
ЗАХИСТУ НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА**

Одеса
Одеський державний екологічний університет
2023

УДК 531

Г 37

Герасимов О. І.

Г 37 Фізичні основи технологій захисту навколишнього середовища:
підручник. Одеса: Одеський державний екологічний у-т , 2023.
168 с.

ISBN 978-966-186-266-0

Підручник адресований здобувачам вищої освіти за спеціальністю 183 Технології захисту навколишнього середовища. Зміст підручника орієнтовано на викладання розділів відповідної освітньо-професійної програми підготовки за спеціальністю Технології захисту навколишнього середовища на адаптованому фізичному та інженерно-фізичному рівнях, що виділяє його в переліку аналогічних видань. Підручник може бути рекомендований бакалаврам, магістрам, аспірантам, співробітникам та викладачам, які навчаються, або працюють в галузі технологій захисту навколишнього середовища, а також представникам суміжних спеціальностей.

УДК 531

Рецензенти:

Софронков О. Н., д.т.н., проф.;

Ковальчук В. В., д. фіз.-мат.наук, проф.

*Затверджено вченою радою Одеського державного екологічного університету
Міністерства освіти і науки України як підручник для здобувачів вищої освіти
за спеціальністю «Технології захисту навколишнього середовища»
(протокол № 5 від 29. 06. 2023)*

ISBN 978-966-186-266-0

Одеський Державний екологічний університет, 2023

Герасимов О.І., 2023

ЗМІСТ

РОЗДІЛ 1 Вступ (Технології захисту навколишнього середовища)...	6
РОЗДІЛ 2 Джерела забруднення атмосфери	11
2.1 Захист атмосфери (абсорбція, термохімічний, каталітичний).....	11
2.2 Методи захисту ґрунтів.....	13
2.3 Методи захисту гідросфери (гідромеханічний, фізико-хімічні, флотаційні).....	16
2.4 Захист елементів довкілля від фізичних впливів.....	18
РОЗДІЛ 3 Класифікація промислових викидів.....	19
3.1 Класифікація викидів за складом.....	19
3.2 Летючі промислові викиди.....	19
РОЗДІЛ 4 Технології очищення газів.....	21
4.1 Сухі та вологі технології очистки.....	21
4.2 Основні фізичні механізми осадження частинок та очистки газових викидів.....	23
4.3 Алгоритм на підставі моделі Стокса.....	24
4.4 Гравітаційне осадження частинок.....	26
4.5 Метод Кенінгема-Міллікена	34
4.6 Барботажа.....	44
РОЗДІЛ 5 ЗАХИСТ ВІД ІОНІЗУЮЧИХ ВИПРОМІНЮВАНЬ.....	54
5.1 Захист від альфа-випромінювання.....	54
5.2 Захист від електронного (бета) випромінювання.....	55
5.3 Захист від гальмівного випромінювання нуклідів.....	56
5.4 Захист від фотонного випромінювання.....	57
5.5 Розрахунок захисту за кратністю ослаблення експозиційної дози, потужності експозиційної дози та за заданою активністю.....	59
5.6 Захист від плоских та точкових ізотропних джерел за допомогою технології шарів ослаблення.....	60
5.7 Методика розрахунку захисту від немоноенергетичних джерел...	61
5.8 Захист від рентгенівського випромінювання.....	62
5.9 Захист від нейтронного випромінювання.....	66
5.10 Номограми для розрахунку водного захисту від нейтронів з (α , n)-джерел.....	68
5.11 Активація матеріалів у полі нейтронного опромінення.....	72
5.12 Вторинне гамма-випромінювання у захисних системах.....	74

РОЗДІЛ 6 ЗАХИСТ ВІД ВПЛИВУ ВІБРАЦІЙ	76
6.1 Класифікація вібрацій.....	76
6.2 Основні параметри вібрацій.....	80
6.3 Вплив вібрації на людину.....	80
6.4 Нормування впливу вібрації.....	82
6.5 Фізичні механізми зниження впливу вібрації.....	85
6.6 Шумові впливи.....	88
РОЗДІЛ 7 ЗАХИСТ ВІД ЕЛЕКТРО-МАГНІТНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ.....	95
7.1 Вплив та нормування електромагнітного опромінювання.....	95
7.2 Вплив та нормування радіаційного опромінення	101
РОЗДІЛ 8 АЛЬТЕРНАТИВНА ЕНЕРГЕТИКА.....	105
8.1 Енергетика відновлюваних джерел.....	106
8.2 Вітроенергетика.....	108
8.3 Сонячна енергетика.....	109
8.4 Ядерна енергетика.....	110
8.5 Економічність різних видів енергетики та проблеми використання.....	111
РОЗДІЛ 9 ТЕРМОЯДЕРНА ЕНЕРГЕТИКА.....	114
9.1 Фізичні основи керованого термоядерного синтезу.....	117
9.2 Паливний цикл термоядерного реактора.....	122
9.3 Системи для утримання плазми.....	126
9.3.1 ТОКАМАК	126
9.3.2 СТЕЛЛАРАТОР.....	136
9.3.3 Відкриті системи для магнітного утримання плазми.....	142
9.3.4 Імпульсні системи.....	143
9.3.5 Мішені для інерційного керованого термоядерного синтезу.....	145
9.3.6 Драйвери для інерційного керованого синтезу.....	148
9.3.7 Іонні пучки.....	152
9.3.8 Камера імпульсного реактора.....	154
9.4 Вимоги до матеріалів та радіаційна безпека термоядерних реакторів.....	155
9.4.1 Матеріали для термоядерних реакторів.....	155
9.4.2 Радіаційна безпека термоядерних реакторів.....	157

9.5 Перспективи термоядерної енергетики.....	161
ВИКОРИСТАНІ ДЖЕРЕЛА.....	165
ПРЕДМЕТНИЙ ПОКАЖЧИК	167

РОЗДІЛ 1 ВСТУП (ФІЗИЧНІ ОСНОВИ ТЕХНОЛОГІЙ ЗАХИСТУ НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА)

Розвиток цивілізації та сучасний науково-технічний прогрес (НТП) безпосередньо пов'язані з природокористуванням, тобто глобальним використанням природних ресурсів. Природокористування - це галузь матеріального виробництва, наука про вирішення і вивчення проблем задоволення матеріальних потреб людського суспільства на необмежений період часу для його нормального відтворення, інтелектуального і духовного розвитку, без погіршення стану навколишнього середовища і з урахуванням обмеженості природних ресурсів. Невід'ємною частиною природокористування є поводження з природними ресурсами та їх відтворення, їх охорона і захист навколишнього середовища в цілому. Інженерна екологія - наука про взаємодію технологічних комплексів і природних комплексів (природно-техногенних геосистем), комплексна науково-технічна галузь, що вивчає проектування, розробку та управління ресурсозберігаючими технологіями, екологічно безпечними об'єктами і промисловими виробництвами, а також реалізацію інженерно-екологічних рішень для раціонального природокористування та охорони навколишнього середовища. Технології захисту навколишнього середовища - це комплексна науково-технічна галузь, що вивчає теоретичні основи ресурсозберігаючих технологій, екологічно безпечних промислових виробництв, раціонального природокористування та впровадження інженерно-екологічних рішень для захисту навколишнього середовища. Метою курсу "Технології захисту навколишнього середовища" є надання необхідних знань про основні методи та закономірності фізико-хімічних процесів захисту навколишнього середовища, основи технологій очищення пилогазових викидів, рідких викидів, утилізації та переробки твердих відходів, а також фізичні принципи захисту навколишнього середовища від впливу енергетики.

Загальними завданнями навчальної дисципліни "Технології захисту навколишнього середовища" є - отримання базових знань про фізико-хімічні процеси, що лежать в основі очищення газів, стічних вод і твердих відходів; - набуття практичних навичок розрахунку параметрів фізико-хімічних процесів очищення промислових викидів в атмосферу та стічних вод у водні об'єкти. Місце курсу "Фізичні основи технологій захисту

навколишнього середовища" у професійній підготовці бакалавра відповідного профілю пов'язане зі створенням необхідних основ для розуміння фізичної та фізико-хімічної сутності технічних процесів захисту навколишнього середовища. Предметом вивчення є фізичні та фізико-хімічні процеси: осадження та розділення гетерогенних систем, фільтрація, коагуляція, флокуляція, абсорбція, адсорбція, конденсація, флотація, екстракція рідин, іонний обмін, електрохімічне окислення та відновлення, електрокоагуляція та електрофлотація. Знання в цій галузі необхідні для поглибленого засвоєння курсів з технології захисту навколишнього середовища, які використовують знання з фізики, хімії та деяких спеціальних дисциплін фізико-математичного циклу. Ці курси базуються на таких явищах, як термохімія, фазові перетворення, радіаційні процеси, горіння та багато інших фізичних і хімічних явищ. В результаті вивчення цієї галузі студенти будуть: знати основні фізичні та фізико-хімічні закономірності аерозолів, колоїдних систем та очищення стічних вод, а також основні фізико-хімічні процеси, що лежать в основі переробки твердих промислових відходів; очищати атмосферу та гідросферу і літосферу при скиданні та утилізації промислових відходів вибирати правильні методи та засоби захисту.

Курс Фізичні основи технологій захисту навколишнього середовища складається з наступних основних розділів:

-Характеристика забруднення навколишнього середовища та основні методи його захисту.

-Очищення повітря від аерозольних домішок.

-Очищення газових викидів.

-Розсіювання атмосферних викидів.

-Охорона гідросфери.

-Захист літосфери від відходів.

-Захист навколишнього середовища від енергетичних впливів (іонізація, тепло, електромагнітні хвилі, звукові хвилі, вібрації).

-Альтернативні джерела енергії.

-Термоядерна енергетика

В результаті вивчення цих питань повинні бути визначені місце і роль даної дисципліни в системі вищої екологічної освіти, її зв'язок з іншими дисциплінами, приклади взаємозв'язку охорони навколишнього середовища з фізико-хімічними галузями, класифікація основних методів і

способів, фізико-хімічна сутність основних процесів охорони навколишнього середовища, основи, характеристики, раціональні галузі та сфери застосування методів природокористування та охорони навколишнього середовища [1-6]. Під докільям або навколишнім середовищем розуміють сукупність природних і змінених природних умов проживання людини та виробничої діяльності суспільства. У процесі повсякденного життя і виробничої діяльності людське суспільство неминуче впливає на навколишнє середовище, а навколишнє середовище реагує на ці впливи негайно або через певний час, з позитивними, а часто і негативними наслідками. Людська діяльність проникає все глибше і глибше в біосферу (область активного життя в межах земної оболонки, включаючи нижню атмосферу, гідросферу і верхню літосферу, де живуть живі організми). Ця зовнішня оболонка товщиною 40, 50 км мізерно мала порівняно з діаметром Землі, доступна для людської діяльності і надзвичайно вразлива. Вплив людини на біосферу тісно пов'язаний з постійно зростаючими темпами науково-технічного розвитку та необхідністю вирішення нових соціально-економічних проблем. Геохімічний вплив людини на природу визначається такими основними обставинами:

- Синтез багатьох (понад мільйон) речовин, які не існують у природі і мають властивості, відмінні від властивостей природних сполук;
- створенням розгалуженої мережі газо- і нафтопроводів, автомобільних і залізничних доріг, а також спеціалізацією виробництва і масовим транспортуванням різноманітної сировини від місць видобутку до місць переробки, що призвело до перерозподілу і дифузії забруднюючих речовин. Поширенню забруднюючих речовин значною мірою сприяв дим від теплових електростанцій, металургійних, хімічних і нафтопереробних заводів, а також автомобільний і повітряний транспорт;
- Інтенсифікація сільськогосподарського виробництва, що вимагає широкого використання добрив, гербіцидів і пестицидів. Їх негативний вплив на навколишнє середовище став очевидним з часом.

Прискорений розвиток світового суспільного виробництва і зростаюча шкода навколишньому середовищу вже не можуть бути подолані так само природно, як раніше, без застосування продуманого комплексу законодавчих і технічних заходів, що стосуються всіх сфер людської виробничої діяльності. Промислові відходи і забруднення, що виділяються

в результаті технологічного циклу підприємств і очищення промислових стоків, становлять найбільшу небезпеку в основному для жителів великих промислових центрів і прилеглих до них територій, а також створюють труднощі для муніципальних комунальних служб. Наприклад, траплялися випадки потрапляння легкозаймистих рідин (ЛЗР) у каналізацію та їхнього вибуху. Крім того, тисячі тонн гальванічних шламів, що скидаються в каналізацію, містять токсичні важкі метали, а мул з міських станцій аерації в деяких випадках може бути непридатним для використання в якості добрива. У перші роки існування людського суспільства антропогенний вплив на природу був незначним, а забруднення довкілля відбувалося переважно внаслідок природних явищ, таких як виверження вулканів, лісові пожежі, вивітрювання та ерозія ґрунтів. Поступово, з розвитком деяких галузей промисловості, пов'язаних з виробництвом металів, кераміки, скла, вина, калійних добрив і мила, в атмосферу локально почали потрапляти оксиди вуглецю, сірки, азоту та пари металів. Крім того, побутове забруднення та відходи виробництва, такі як харчові продукти і барвники, потрапляли у водойми. Винахід пороху призвів до інтенсивного розвитку хімії, оскільки азотна кислота, сірчана кислота і нітрати були потрібні у великих кількостях. Розвиток промислового виробництва сприяв подальшому прогресу в металургії, металообробці та хімічній промисловості, одночасно концентруючи виробництво. У міжнародному праві з'явилося поняття "експорт забруднення", яке означає, що розвинені країни ліквідували найбільш небезпечні з точки зору забруднення навколишнього середовища виробництва і перенесли їх у країни, що розвиваються, де є надлишок робочої сили. Як наслідок, світ зазнає впливу широкого спектру хімічних речовин у глобальному масштабі, і їхня кількість постійно зростає. Статистичні дані свідчать, що небезпечне програмне забезпечення виробляється в багатьох країнах світу. У сучасних умовах відтворення суспільства вимагає залучення в економічний цикл великої кількості сировини та енергії.

Тому необхідно впроваджувати технологічні процеси, які продукують мінімум викидів, що може в достатній мірі запобігти виникненню незворотних змін у навколишньому середовищі за рахунок природного самоочищення. Під безвідходною технологією майже завжди розуміють ідеальну модель виробництва, яка є цілком здійсненою, але з розвитком технічного прогресу все більше наближається до ідеалу.

Зокрема, під безвідходною технологією слід розуміти виробничу систему, яка не продукує жодних викидів у навколишнє середовище. Безвідходне виробництво - це комплекс організаційно-технічних заходів, технологічних процесів, обладнання та матеріалів, які забезпечують максимальне і комплексне використання сировини та мінімізують негативний вплив відходів на навколишнє середовище.

РОЗДІЛ 2 ОСНОВНІ МЕТОДИ ЗАХИСТУ СКЛАДОВИХ НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА

2.1 Захист атмосфери

Заходи з охорони повітря можна поділити на екологізацію технологічних процесів, очищення пилогазових викидів, будівництво та планування, а також ,технічні та організаційні заходи. Цей розділ присвячений огляду методів очищення пилогазових викидів. Методи очищення газів від пилу включають сухі, вологі та електричні методи.

Сухі методи засновані на відділенні частинок пилу від газового потоку за допомогою спеціального обладнання, такого як пиловловлювальні камери, циклони і фільтри (тканинні, волокнисті або гранульовані).

Вологі методи очищення ґрунтуються на поглинанні частинок пилу водою, що розпилюється з форсунок або безперервно подається проти запиленого повітряного потоку. При цьому утворюється велика кількість стічних вод, які потребують подальшого очищення.

Електричні системи використовуються для уловлювання пилу з цементу, гіпсу та вугілля. Процес очищення ґрунтується на іонізації частинок пилу під впливом зовнішнього електричного поля. Заряджені частинки осідають на поверхні електродів з протилежними зарядами і видаляються з електродів струшуванням.

У процесі абсорбції газовий потік пропускають через рідкий розчин мінеральних або органічних речовин. Забруднювачі вступають у реакцію з цими речовинами і випадають в осад. Наприклад, вапняне молоко використовується для видалення діоксиду сірки, а водні розчини кальцинованої соди і солей миш'яку - для видалення сірководню.

В адсорбційних методах газовий потік пропускають через тверді пористі матеріали, які адсорбують газові забруднювачі. Як адсорбенти використовують активоване вугілля та вапняк. Перевага цього методу полягає в тому, що можна досягти високого рівня очищення, але недоліком є те, що газ виходить сухим і без пилу. Біохімічні методи використовують здатність мікроорганізмів руйнувати і перетворювати різні сполуки. Цей метод застосовується для очищення газів певного складу. Якщо склад газу часто змінюється, мікроорганізми не встигають адаптуватися до нових речовин і домішок. У цьому методі очищення газовий потік пропускають

через водну суспензію активного мулу (активний мул - це колоїдна маса мінерального та органічного складу, багата на мікроорганізми), ґрунту, торфу та компосту.

Вибір методу очищення ґрунтується на техніко-економічних розрахунках. Наприклад, будівельно-планувальні заходи включають ряд прийомів, таких як вибір ділянок для будівництва промислових підприємств, взаємне розташування підприємств і житлових районів, взаємне розташування робочих місць на підприємствах, організація санітарно-захисних зон і планування зелених зон. Індустріальні парки слід розміщувати на рівнинних, добре провітрюваних територіях з підвітряного боку від житлових районів. Робочі місця з найбільшими викидами забруднюючих речовин слід розташовувати на краю виробничої зони навпроти житлової забудови. Взаємне розташування робочих місць повинно забезпечувати, щоб їхні викиди не об'єднувалися, коли вітер дме в бік житлової зони.

Промислові території повинні бути відокремлені від житлової забудови санітарно-захисними зонами (СЗЗ).

Розмір СЗЗ встановлюється за спеціальними критеріями залежно від рівня небезпеки та потужності підприємства і становить від 50 до 1000 м. Стандартні розміри санітарно-захисних зон: 1000 м, 500 м, 300 м, 100 м, 50 м.

СЗЗ вважаються резервними територіями і не можуть бути використані для розширення промислових майданчиків; на територіях СЗЗ можуть створюватися об'єкти, які є менш небезпечними, ніж основні виробничі об'єкти, наприклад, склади, гаражі та автобусні зупинки.

Території СЗЗ повинні бути упорядковані та озеленені, а рослини, що використовуються для озеленення, повинні бути ефективними з точки зору санітарії та мати достатню стійкість до забруднення повітря і ґрунту. При проектуванні ландшафтів СЗЗ слід використовувати змішані насадження, дерева і чагарники, що володіють високою біологічною стійкістю і високою декоративністю в порівнянні з однорідними посадками. Їх створенню слід надавати пріоритет.

Також можуть бути вжиті інженерні та організаційні заходи, такі як зниження інтенсивності руху транспорту, збільшення висоти труб, збільшення швидкості руху газів по трубах для підвищення їх розсіювального ефекту. Для зменшення інтенсивності руху навколо міст і селищ будують об'їзні та обхідні дороги, дорожні розв'язки розміщують на

різних рівнях, а на великих автомагістралях організують режим "зеленої хвилі".

Збільшити висоту димових труб. Чим вище димова труба, тим краще розсіювання пилу і газових викидів в атмосфері. Слід зазначити, що розсіювання шкідливих речовин в атмосфері є тимчасовим і вимушеним заходом через відсутність методів очищення деяких забруднювачів і нездатність існуючого очисного обладнання досягти 100% очищення. Будівництво високих димарів не вирішує проблему забруднення, а спрямовує це забруднення в інші райони. Збільшення швидкості руху в димоході може покращити дифузію димових газів.

2.2 Методи захисту ґрунтів

Основними напрямками захисту ґрунтів від деградації є заходи щодо захисту ґрунтів від перезволоження, засолення, водної та вітрової ерозії і забруднення, запобігання необґрунтованому виведенню їх із сільськогосподарського обороту та відновлення порушеного ґрунтового покриву.

Для боротьби з перезволоженням, спричиненим порушенням природного потоку води, застосовуються різні заходи з відновлення дренажу, спрямовані на зниження рівня ґрунтових вод, такі як дренажні канали, відкриті канали та водозабірні споруди.

Запобігання засоленню ґрунтів передбачає промивання зрошуваних територій, перехоплення та відведення промивних вод дренажними системами, дотримання норм поливу, гідроізоляцію зрошувальних каналів, фільтрацію зрошувальної води та запобігання підвищенню рівня ґрунтових вод.

Для боротьби з водною ерозією необхідно здійснити низку протиерозійних заходів, зокрема:

- спеціальні канали у верхніх частинах схилів для відведення поверхневого стоку та запобігання ерозії;
- кореневі системи рослинності консолідують ґрунт, дозволяючи опадам фільтруватися в ґрунт і зменшуючи швидкість поверхневого стоку;
- чергування багаторічної та однорічної рослинності на схилах для формування замкненого рослинного покриву;
- культивування впоперек схилів;
- терасування схилів для створення валів, канав і дренажних каналів;

- якщо схил більше 16°, ґрунт виключається з сільськогосподарського обігу.

Для боротьби з вітровою ерозією існують наступні заходи:

- висаджування лісозахисних смуг для зменшення швидкості приземного вітру;

- агротехнічні методи: мінімальна оранка (оранка без перевертання ґрунту), сівозміна, залишення стерні на полі;

- закріплення ґрунту рослинністю або спеціальними полімерами.

Щоб запобігти забрудненню ґрунту пестицидами, для боротьби зі шкідниками використовують природних ворогів. Наприклад, сонечка поїдають попелиць та інших комах, небезпечних для цитрусових, а з багатьма бур'янами борються за допомогою рослиноїдних комах. Завдання полягає в тому, щоб виявити і використати цих ворогів, не завдаючи шкоди іншим видам.

Зайняття земель під час будівництва, складування відходів та видобутку корисних копалин має бути зведене до мінімуму, при цьому:

- мінімізувати використання цінних сільськогосподарських земель та лісів для будівництва, а також пов'язувати дорожні маршрути та комунікації з існуючими маршрутами та несільськогосподарськими землями;

- дотримуватися критеріїв відведення земельних ділянок під час будівництва;

- зменшити зайнятість земель, наприклад, для їх зберігання, шляхом вдосконалення технологій, комплексного використання сировини та утилізації відходів;

- зберігати родючі шари ґрунту під час проведення земляних робіт;

- рекультивація порушених земель.

Рекультивація земель - це комплекс заходів з відновлення земель, порушених внаслідок видобутку корисних копалин, будівництва, складування відходів тощо. Рекультивація охоплює відвали відходів, просідання ґрунту, спричинені видобутком корисних копалин, кар'єри, ями та інші перешкоди.

Залежно від того, як планується використовувати порушені землі в майбутньому, можна виділити такі напрямки рекультивації:

- сільське господарство - підготовка земель до використання в якості сільськогосподарських угідь (створення на відновлених землях орних полів, садів і сіножатей);

- лісове господарство - підготовка земель під лісові насадження різного призначення;
- водне господарство - створення водойм, заповнених підземними водами на місці розроблених кар'єрів;
- рекреація - створення рекреаційних та спортивних зон, парків, лісопарків, спортивних споруд, кемпінгів тощо;
- охорона навколишнього середовища та санітарно-гігієнічні заходи - здійснюються на територіях, непридатних для використання в народному господарстві. Метою цього напрямку є запобігання забруднюючому впливу на навколишнє середовище (наприклад, рекультивація шламосховищ, хвостосховищ - протиерозійне лісорозведення, посів ґрунту, закріплення ґрунту технічними засобами);
- будівництво - підготовка земельних ділянок для промислового або цивільного будівництва.

Рекультивація родючих земель відбувається у два етапи: технічний та біологічний. Технічна фаза включає підготовчі роботи, такі як будівництво під'їзних шляхів, засипання кар'єрів, послаблення укосів відвалів і кар'єрів, планування поверхні відновлюваної землі, нанесення родючого шару ґрунту та інші спеціальні операції.

При проведенні робіт, пов'язаних з порушенням земель, необхідно забезпечити збереження родючого шару ґрунту. Якість знятого ґрунту оцінюється за його хімічним складом, вмістом гумусу і забруднюючих речовин. Знятий верхній шар ґрунту повинен бути негайно використаний для рекультивації земель або для додавання до деградованих і виснажених ґрунтів. Якщо це неможливо, дозволяється тимчасове зберігання в спеціальних місцях зберігання відходів (буртах). Бурти розміщують таким чином, щоб ґрунт втрачав якомога менше своїх родючих властивостей. Бурти повинні бути висотою не більше 8 м, з пологими схилами для запобігання водної та вітрової ерозії, засіяні багаторічними рослинами з добре розвинутою кореневою системою (бажано ґрунтополіпшуючими культурами: бобові, злакові). Зберігання ґрунтів понад 8 років заборонено, оскільки вони поступово втрачають свою родючість. Біологічний етап здійснюється після завершення технічного етапу і має на меті відновлення родючості рекультивованих земель. Ця фаза здійснюється землекористувачем і включає внесення мінеральних та органічних добрив, присипання та посів ґрунтозахисних культур.

2.3 Методи захисту гідросфери

Водне середовище також треба захищати від забруднення та виснаження.

Для запобігання засміченню вживаються заходи щодо недопущення потрапляння у водойми та річки будівельного сміття, твердих побутових відходів, вийнятого ґрунту та інших речовин, які погіршують якість води та середовище існування риб.

З цією метою передбачаються наступні заходи:

- розвиток безвідходних і водозберігаючих технологій, застосування циклових технологій та переробки відходів;
- очищення стічних вод;
- передача їх іншим підприємствам (наприклад, передача з хімічних підприємств на будівельні), де вимоги до якості води менш жорсткі, а домішки у стічних водах не мають негативного впливу на технологічні процеси підприємства, а навпаки, покращують якість його продукції;
- міська каналізація та водовідведення;
- очищення поверхневих стоків з міських та промислових територій;
- встановлення водоохоронних зон.

У зв'язку з різноманітним складом стічних вод існують різні методи очистки, а саме механічні, фізичні, хімічні та біологічні. Із врахуванням типу і токсичності забруднення, очищення може здійснюватися спрямуванням вищезгаданих методів або їхнього комбінування.

При механічному очищенні нерозчинні механічні домішки видаляються фільтруванням, осадженням і проціджуванням. Для цього використовують решітки, пісковловлювачі, піщані фільтри та різні відстійники. Речовини, зважені на поверхні стічних вод (наприклад, масла, смоли, жири, полімери), затримуються шляхом скидання поверхневого шару, що містить зважені речовини, наприклад, у нафто- та жироловлівачах.

Для очищення промислових стоків використовують хімічні та фізико-хімічні методи.

Хімічний спосіб очищенні у стічні використовує реагенти (вапно, кальциновану соду, аміак), які взаємодіють із забруднювачами і спричиняють їхнє осадження.

Фізико-хімічне очищення включає коагуляцію, сорбцію та флотацію.

Біологічні методи використовуються для очистки водних стоків підприємств целюлозно-паперової, нафтопереробної та харчової промисловості. Цей метод базується на здатності природних мікроорганізмів розвиватися, використовуючи органічні та деякі неорганічні сполуки. Для задач очистки можуть використовуватися штучні споруди (наприклад, аеротенки, метантенки, біофільтри) або в природних умовах (наприклад, на фільтраційних станціях, зрошувальних полях, біологічних ставках).

На виході технології очистки створюється мул, який утилізується на мулових майданчиках для сушіння і використовується у подальшому як добриво. Однак, якщо міські стічні води проходять біологічну стадію очистки, контактуючи з промисловими (які містять токсичні), їх використання в якості добрив виключається. Тут мова йде про, скажімо важкі метали в осаді.

Виділяють спеціальні території, водоохоронні зони, які встановлені вздовж берегів річок, озер і водосховищ, які відіграють важливу захисну роль у будь-якому водному об'єкті. Їх основне призначення - захист водних об'єктів від забруднення, засмічення та ерозії, спричинених поверхневим стоком. Ширина водоохоронної зони може становити від 100 до 300 метрів. У межах водоохоронних зон ґрунт повинен бути вкритий рослинністю і висаджені захисні лісосмуги, а також заборонена господарська діяльність, така як обробіток землі, випас худоби, використання пестицидів і добрив, будівництво, зберігання, гаражів і хлівів для худоби.

Контроль якості води проводять для оцінки можливості її використання для господарсько-питного, культурно-побутового, рибогосподарського та технічного призначення. Для оцінки якості води аналізують її склад та фізичні властивості. Визначають температуру, запах, смак, прозорість, каламутність, зміст розчиненого кисню, біохімічне споживання кисню, кислотність, вміст шкідливих речовин, а також кількість кишкових паличок в одному літрі води. Усі наведені показники не повинні перевищувати нормативних вимог.

Основні заходи щодо захисту підземних вод полягають у запобіганні виснаження запасів їх (шляхом регулювання водовідбору) та забруднення.

2.4 Захист елементів довкілля від фізичних впливів

Захисні заходи також включають зниження шуму в джерелі та будівельно-конструктивні рішення:

- використання звукопоглинальних матеріалів,
- раціональне розміщення будівельної техніки,
- перенесення в глибину житлових районів,
- розміщення об'єктів, які є джерелом шуму віддалено від житлових районів,
- розміщення спеціальних шумозахисних екранів (земляні насипи вздовж доріг, стіни різних споруд, нежитлові будівлі, що відбивають шум: магазини, склади),
- створення зелених насаджень.

Для зменшення впливу вібрацій на довкілля сприяти зменшенню рівня вібрацій в джерелі і на шляху передачі за допомогою віброгасіння і віброізоляції.

З метою захисту навколо джерел електромагнітного випромінювання встановлюються санітарно-захисні зони (СЗЗ); в межах яких, не можна будувати житлові будинки; розмір СЗЗ визначається розрахунком і коливається від декількох сотень метрів до 1-2 км.

РОЗДІЛ 3 КЛАСИФІКАЦІЯ ПРОМИСЛОВИХ ВИКИДІВ

3.1 Класифікація викидів за складом

Викиди в атмосферу із джерел, які пов'язані із промисловою діяльністю класифікуються за чотирма ознаками:

- 1) за агрегатним станом: газоподібні; рідкі; тверді;
- 2) за хімічним складом: сірчистий ангідрид; окис вуглецю; окис азоту; фтор та його сполуки; сірковуглець; сірководень; хлор; синильна кислота та ціаніди; аміак; миш'як та його сполуки; сума вуглеводнів; вуглеводні граничні; вуглеводні ненасичені; ароматичні вуглеводні; кисневмісні органічні сполуки; азотовмісні органічні сполуки; фенол; кислоти; свинець та його сполуки; сажа; метали та їх єднання; пил.

3) за розміром частинок;

4) за масою речовини викиду;

3.2 Летючі промислові викиди

Летючі промислові викиди (ЛПВ) поділяються на дві основні групи: парогазові; аерозольні.

Парогазові викиди – суміш газів (парів), що не несе в собі тверді або рідкі завислі частинки. Мінімальне уявлення про парогазовий викид дають наступні характеристики:

- об'ємні витрати (м^3 /рік), тобто. обсяг викиду газу (за умов $P = 101,3 \text{ кПа}$; $t = 0^\circ\text{C}$), а також номінальні та граничні витрати;
- температура її номінальні та граничні межі;
- хімічний склад (об'ємна частка кожного з компонентів та його зміни у процесі експлуатації);
- тимчасовий режим парогазовиділення (тобто, тривалість, обсяг і характеристика викиду за період - добу, тиждень, місяць, тощо).

Аерозольні викиди - суміш газів (парів), що несе в собі тверді або рідкі зважені частинки. Характеристика аерозольного викиду зазвичай включає наступні відомості:

- витрати, м^3 / год (її номінальні та припустимі граничні коливання);
- температура, $^\circ\text{C}$ (її номінальні та припустимі граничні коливання);
- хімічний склад середовища (об'ємна частка кожного компонента у %);
- режим викиду;
- концентрація частинок, $\text{г}/\text{м}^3$;

– дисперсний склад та властивості аерозольних частинок, а саме: найменування речовин, з яких складаються частинки (хімічний склад, масова частка) морфологія частинок; масова частка за розмірами частинок та розмірність частинок(дисперсність аерозолів).

Крім того, ЛПВ поділяють на:

- газ, речовина або суміш речовин, що стаціонарно перебувають у газоподібному стані у всьому інтервалі температур і тисків, характерних для роботи газоочисних споруд;

- пару, тобто газ, який може переходити в рідкий або твердий стан у наведеному вище інтервалі температур і тисків;

- дим:

1) тонкодисперсний твердий аерозоль з частинками субмікронних розмірів;

2) тонкодисперсний рідкий аерозоль;

3) будь-який забарвлений ЛВП;

- пил:

1) дисперсна фаза твердого аерозолю, що не відноситься до димів;

2) сипучий порошкоподібний продукт, що утворюється в результаті виділення газу та осадження дисперсної фази твердого аерозолю;

- суміш:

1) середовище, що включає як парогазову, так і аерозольну групи;

2) багатокомпонентний продукт, що уловлюється.

Безумовно, що будь яка маніпуляція із цими компонентами вимагає застосування індивідуально підібраних технологій до викладення деяких з них ми переходимо у наступних розділах.

РОЗДІЛ 4 ТЕХНОЛОГІЇ ОЧИЩЕННЯ ГАЗІВ

4.1 Сухі та вологі технології газоочищення

"Сухі" методи - це методи, які не використовують воду, водні розчини або інші рідини як промивні агенти або абсорбенти [7-16]. Однак "сухий" метод не виключає використання рідин (переважно води) для кондиціонування (підготовки) промислових неорганізованих викидів перед подачею їх в газоочисне обладнання. Наприклад, поширеною практикою є впорскування певної кількості розпиленої води, щоб знизити температуру пилогазового потоку і зменшити питомий електричний опір пилу. Вода повністю випаровується і не має функції очищення або поглинання. "Мокрі" методи використовують воду або інші рідини. У цьому випадку рідина може використовуватися, по-перше, як очищувальний або абсорбуючий агент. По-друге, існують методи очищення, в яких рідина виконує важливу технічну функцію, одночасно очищаючи викиди, а не поглинаючи їх компоненти (наприклад, у "мокрих електрофільтрах" пил, що уловлюється, може бути видалений з електродів шляхом промивання, а не струшуванням). Сфера застосування сухих і мокрих методів не є однозначно визначеною, оскільки обидва методи часто технічно придатні для вирішення однієї і тієї ж проблеми, а вибір методу визначається техніко-економічними міркуваннями і специфікаціями конкретної компанії, що розробляє технологію газоочищення. Ось деякі з переваг і недоліків методів сухого очищення газів.

Переваги:

- температура залишкового газу після сухого очищення визначається виключно конструктивними елементами очисного обладнання і може досягати 400 . 450 °С (навіть вище, якщо є термозахисна футеровка);
- умови диспергування значно покращуються при викиді в атмосферу сухих, відносно гарячих газів;
- не споживає воду, яка є цінним природним ресурсом, а в деяких районах - дефіцитним природним ресурсом;
- немає вторинних стоків, які потрібно очищати перед скиданням забруднених рідин або спеціально обробляти для повторного використання в замкнутих циклах зрошення;
- система газоочищення не є корозійною, якщо температура суміші в тракці газоочищення завжди вища за температуру конденсації парів, що містяться в ній;

-якщо пил уловлюється, він виводиться з пиловловлювача у вигляді сухого порошку і тому може бути відносно легко утилізований.

Недоліки:

-існує ризик утворення вторинного аерозолі в системах транспортування пилу для зібраних порошкових продуктів. Тому ці системи повинні бути герметичними, а в деяких випадках обладнані власним всмоктуванням (тобто місцевим);

-системи "сухого" очищення значно негативно реагують на конденсацію парів кислотних рідин, як у всій зоні всмоктування пилу або газу (наприклад, у зонах всмоктування холодного зовнішнього повітря), так і в обмежених зонах. Конденсація парів викликає загальну або локальну корозію і сприяє утворенню пилових відкладень, які важко видалити, особливо якщо пил гідрофільний і може затвердіти в присутності вологи (наприклад, цемент).

Переваги та недоліки методів вологого очищення газів наведені нижче.

Переваги:

-як правило, системи вологого очищення мають вищий ступень очищення газу від домішок, ніж системи сухого очищення;

-обладнання для мокрого очищення, як правило, простіше за конструкцією, ніж обладнання для сухого очищення, оскільки має менше рухомих механічних частин;

-транспортування вловленого продукту також є конструктивно простим і не вимагає особливих запобіжних заходів проти вторинної аерозолізації.

Недоліки:

-системи мокрого очищення споживають воду, цінний і дефіцитний природний ресурс (навіть у замкнених циклах зрошення втрати води неминучі і повинні бути компенсовані, наприклад, за рахунок випаровування з уловленим продуктом);

- вторинний стік забрудненої рідини, що потребує додаткового очищення та регенерації розчину;

-залишкові викиди після мокрого очищення є холодними та вологими, що призводить до поганих умов диспергування. Обробка гарячих викидів є неефективною, оскільки більша частина тепла, що міститься в них, передається рідині, що ускладнює рекуперацію тепла.

Як правило, системи вологого очищення мають вищу якість очищення від домішок, ніж системи сухого очищення. Обладнання для

вологого очищення, як правило, простіше за конструкцією, ніж обладнання для сухого очищення, оскільки має менше рухомих механічних частин. Транспортування вловленого продукту також є конструктивно простим і не вимагає особливих запобіжних заходів проти вторинної аерозолізації.

Недоліки:

- системи мокрого очищення споживають воду, цінний і дефіцитний природний ресурс (навіть у замкнутих циклах зрошення втрати води неминучі і повинні бути компенсовані, наприклад, за рахунок випаровування з уловленим продуктом);
- вторинний стік забрудненої рідини, що потребує додаткового очищення та регенерації розчину;
- залишкові викиди після мокрого очищення є холодними та вологими, що призводить до поганих умов диспергування. Обробка гарячих викидів є неефективною, оскільки більша частина тепла, що міститься в них, передається рідині, що ускладнює рекуперацію тепла;
- у багатьох випадках викиди містять корозійно-активні речовини, агресивність яких різко зростає в присутності вологи. Тому при використанні "мокрих" методів необхідно вирішити низку питань захисту від корозії;
- деякі токсичні газоподібні компоненти викидів, що розчиняються водою, можуть вторинно викидатися в системах рециркуляції, створюючи небезпеку для працівників. Утилізація деяких продуктів (за винятком шламу, пульпи і розчинів) вимагає будівництва додаткових технічних систем, таких же складних, як і основна система газоочистки.

4.2 Основні фізичні механізми осадження частинок

Робота пиловловлювача заснована на використанні одного або декількох механізмів для осадження зважених в газі частинок. Гравітаційна седиментація (осадження) відбувається в результаті вертикального осідання частинок під дією сили тяжіння при проходженні через систему газоочистки. Відцентрове осадження – осадження під дією відцентрових сил спостерігається, коли потік диспергованого газу (повітря) рухається в криволінійному напрямку, в результаті чого зважені частинки викидаються на осаджувальну поверхню. Інерційне осадження відбувається, коли маса і швидкість частинок настільки великі, що вони не

можуть уникнути перешкод і слідувати за газовим потоком, а намагаються продовжувати рух за інерцією навіть в оточенні перешкод. Контактні ефекти виникають, коли відстань від частинки, що рухається в газовому потоці, до рідини (перешкоди) дорівнює або менша за її радіус. Дифузійне осадження. Осадження дрібних частинок на поверхні або стінці об'єкта в результаті безперервних зіткнень дрібних частинок з молекулами газу, що знаходяться в броунівському русі. Електричне осадження. Коли молекули газу іонізуються електричним розрядом, частинки газу заряджаються і осідають на електродах під впливом електричного поля. Електроосадження також можливе при взаємодії частинок з краплями (або бульбашками), коли частинки і краплі або частинки і рідини одночасно заряджаються. Електроосадження частинок може також відбуватися при проходженні зважених аерозольних частинок через фільтруючі перегородки. Загалом для розрахунку промислових газоочисних систем використовується метод теорії подібності. Згідно з цією теорією, ефективність осадження частинок із сумісними механізмами осадження можна оцінити за допомогою відповідних безрозмірних параметрів, а загальна ефективність уловлювання частинок (η) пристрою є функцією цих параметрів і критерію Рейнольдса (Re), тобто руху, седиментації (G), відцентрової сили (ω), інерційності газу (Stk) контакт (R) і дифузія (D), які визначають характер безрозмірних параметрів осадження частинок під дією електричних сил.

4.3 Алгоритм на підставі моделі Стокса

Частинки аерозолі завжди рухаються відносно середовища і одна відносно одної. Залежно від розміру частинок, з яких складається цей полідисперсний аерозоль, змінюються закони, що визначають опір руху цих частинок. Наприклад, рух мікронних ($d > 1$ мкм) і субмікронних ($d < 1$ мкм) частинок не порушує розподіл швидкостей молекул повітря (газу середовища) і в них не виникає потік. У цьому випадку опір руху виникає лише тому, що частинки, які рухаються, зазнають більше зіткнень перед собою, ніж позаду. Тому опір частинок пропорційний їх швидкості та площі поперечного перерізу; для частинок розміром до 1 мкм більш характерним є аеродинамічний опір середовища, який можна описати наступним рівнянням.

$$F_{onip} = \zeta_{\alpha} \cdot S_{\alpha} \cdot \frac{v_{\alpha}^2 \rho_{\alpha}}{2}, \quad (4.1)$$

де ζ_{α} - коефіцієнт аеродинамічного опору частки; S_{α} – площа перерізу частки, перпендикулярного напрямку руху (m^2); v_{α} – швидкість руху частки (m/s); ρ – щільність газу, серед якого рухаються частки (kg/m^3).

Приймаючи форму частинки у вигляді шара $S_{\alpha} = \frac{\pi d_{\alpha}^2}{4}$, де d_{α} – еквівалентний діаметр частинки (m), формулу (4.1) можна переписати у вигляді

$$F_{\alpha} = \zeta_{\alpha} \cdot \frac{\pi d_{\alpha}^2}{4} \cdot \frac{v_{\alpha}^2 \rho_{\alpha}}{2} \quad (4.2)$$

Коефіцієнт аеродинамічного опору частинки ζ_{α} залежить від безрозмірного критерію Рейнольдса для частинки, який може бути записаний у вигляді

$$Re = \frac{v_{\alpha}^2 \cdot d_{\alpha} \cdot \rho_{\alpha}}{\mu}, \quad (4.3)$$

де μ - динамічна в'язкість газів (для повітря $\mu_{\Gamma} = 1,82 \cdot 10^{-5} \text{ Па} \cdot \text{с}$).

Для досить малих та постійних швидкостей руху частинок розміром більше 1 мкм ($d_{\alpha} > 1 \text{ мкм}$) справедлива умова

$$0 < Re < 1, \quad (4.4)$$

для якої коефіцієнт аеродинамічного опору ζ_{α} дорівнює

$$\zeta_{\alpha} = 24/Re \quad (4.5)$$

В цьому випадку сила опору середовища F_{onip} руху частинки, що визначається за формулою (4.2), підпорядковується закону Стокса:

$$\zeta_{\alpha} = \frac{24}{Re} \cdot (1 + \frac{3}{16} r_e) F_{onip} = F_c = F_{Stk} = 3\pi\mu_{\Gamma} d_{\alpha} v_{\alpha} \quad (4.6)$$

Закон Стокса широко використовується також для дослідження руху аерозольних частинок з великими числами Рейнольдса, оскільки цей закон може бути поширений і на ті частинки, які найефективніше сепаруються з потоку під впливом різних сил. Це обумовлює широке застосування закону Стокса щодо очищення газу(повітря) від аерозольних частинок (пилу).

Формула Стокса (4.6), для визначення опору середовища F_c , отримана у припущенні, що сили інерції обсягу газу, витісненого частинкою, зневажливо малі. У разі обліку цих сил інерції використовують формулу Озеєна:

$$\zeta_{\text{ч}} = \frac{24}{\text{Re}} \cdot \left(1 + \frac{3}{16} r_e\right), \quad (4.7)$$

яка справедлива при $\text{Re} < 5$.

При дослідженні руху частинок із великими числами Рейнольдса (Re завбільшки 3000) використовують так звану формулу Клячко:

$$\zeta_{\text{ч}} = \frac{24}{\text{Re}} + \frac{4}{\sqrt[3]{\text{Re}}}$$

Для великих значень числа Рейнольдса опір визначається формулою Ньютона:

$$F_c = 0,055\pi \cdot \mu \cdot d_{\text{ч}}^2 \cdot v_{\text{ч}}^2, \quad (4.8)$$

що відповідає значенню $\zeta_{\text{ч}} = 0,44$.

4.4 Гравітаційне осадження частинок

В обладнанні, заснованому на цьому принципі пиловловлювання, осідання зважених частинок відбувається під дією сили тяжіння. Загалом, механізм гравітаційного осідання частинок оцінюється за швидкістю їх осідання. Аерозольна частинка, що падає, врешті-решт досягає певної швидкості осідання, яка називається швидкістю зависання v_s . При цьому аеродинамічний опір середовища, що діє на частинку, F_{drag} , дорівнює її ефективній вазі (силі тяжіння частинки F_t), тобто силі відштовхування Архімеда:

$$F_{\text{arch}} = m_{\text{ч}}g = F_{\text{опір}} \quad (4.9)$$

У цьому випадку рівняння рівноваги для рівномірно рухомої частинки має вигляд (4.9) (див. Рис. 4.1).

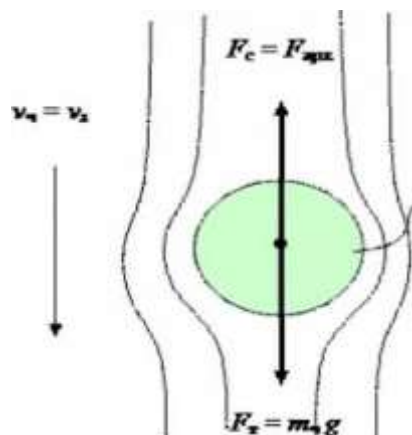


Рисунок 4.1 - Гідродинамічний рух частинки в стоксівському режимі

Припускаючи, що закони руху частинок задовольняють умови застосування закону Стокса, його можна записати так

$$3\pi \cdot \mu \cdot d_q \cdot v_q = \frac{\pi}{6} d_q^3 (\rho_q - \rho_\Gamma) \cdot g \quad (4.10)$$

Швидкість осадження частинок v_q (і швидкість зависання v_z) впливає з

$$v_q = v_z = \frac{1}{18} \frac{d_q^2 (\rho_q - \rho_\Gamma)}{\mu_\Gamma} \cdot g \quad (4.11)$$

Нехтуючи густиною газу ρ_Γ , яка набагато менша за густину частинок ρ_q ($\rho_q > \rho_\Gamma$), швидкість витання частинок можна записати як

$$v_z = \frac{1}{18} \frac{d_q^2 \rho_q}{\mu_\Gamma} \cdot g = \tau_p \cdot g \quad (4.12)$$

де τ_p - час релаксації частинки (тобто час, за який частинка досягає постійної швидкості витання),

$$\tau_p = \frac{1}{18} \frac{d_q^2 \rho_q}{\mu_\Gamma} \quad (4.13)$$

З рівняння (4.10) видно, що швидкість осадження зважених частинок в гравітаційній системі газоочищення прямо пропорційна квадрату розміру частинок. Слід зазначити, що ефект гравітаційного осадження завжди присутній в системах газоочищення. Тому для порівняння ефекту гравітаційного осадження з іншими механізмами осадження частинок вводиться параметр гравітаційного осадження G . Він дорівнює відношенню сили тяжіння F_τ , що діє на частинки, до сили опору середовища і може бути виражений через швидкість зависання частинок у порівнянні зі швидкістю газового потоку v_Γ :

$$G = \frac{F_\tau}{F_\varepsilon} = \frac{m_q \cdot g}{3\pi\mu d_q v_\Gamma} = \frac{\pi d_q^3 \rho_q g}{6 \cdot 3 \cdot \pi \cdot \mu_\Gamma \cdot d_q^3 \cdot v_\Gamma} = \frac{d_q^2 \rho_q g}{18\mu} \cdot \frac{1}{v_\Gamma} = \frac{v}{v_\Gamma} \quad (4.14)$$

Рівняння (4.14) можна також виразити, як відношення двох безрозмірних критеріїв:

$$G = Stk / Fr \quad , \quad (4.15)$$

де Stk - безрозмірний критерій Стокса,

$$Stk = \frac{1}{18} \frac{d_q^2 \rho_q v}{\mu_\alpha \cdot L} \quad (4.16)$$

Fr - безрозмірний критерій Фруда,

$$Fr = \frac{v_q^2}{g \cdot L} \quad , \quad (4.17)$$

де L - деякий характерний лінійний параметр (наприклад, висота, діаметр), що характеризує процес гравітаційного осадження в пристрої. З урахуванням рівняння (4.17) коефіцієнт осадження частинок під дією гравітаційних сил в геометрично подібних системах, η_G , визначається у вигляді наступної залежності

$$\eta_G = f(\text{Re}; Stk / Fr) \quad (4.18)$$

Такий метод використовується в циклонах, а також в вологому пиловловлюванні для осадження частинок на поверхні бульбашок (наприклад, барботування). Швидкість відцентрового осадження сферичних частинок можна визначити за допомогою алгоритму Стокса, порівнявши відцентрову силу $F_{\text{ц}}$ до сили опору F_c середовища $F_\varepsilon = F_c$ (див. рис. 4.2):

$$m_q \frac{v_c^2}{r} = 3\pi\mu_\alpha d_q v_c \quad , \quad (4.19)$$

де $m_{\text{ч}}$ - маса частинок, v_c швидкість обертального руху газового потоку, r - радіус обертання потоку.

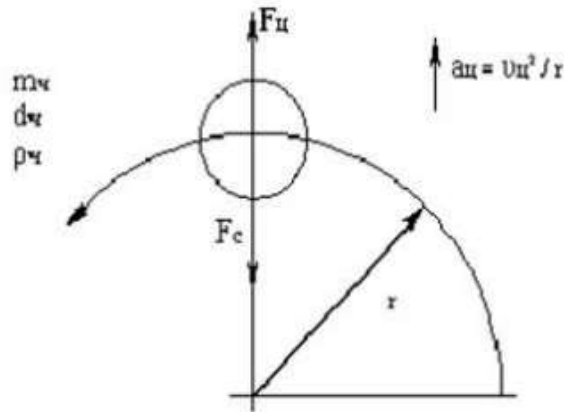


Рисунок 4.2 - Принципова схема відцентрового осадження

Швидкість осадження частинок визначається наступним чином:

$$v_c = \frac{d_{\text{ч}}^2 \rho_{\text{ч}}}{18 \cdot \mu_{\alpha}} \frac{v_0^2}{r} = \tau_0 \frac{v_0^2}{r} \quad (4.20)$$

Рівняння (4.20) показує, що швидкість осадження завислих частинок у відцентрових колекторах прямо пропорційна квадрату розміру частинок. Значення швидкості осадження при відцентровому осадженні є більшим, ніж при гравітаційному осадженні. За аналогією з гравітаційним осадженням, описаним вище, вводиться параметр відцентрового осадження, як відношення між відцентровою силою і силою опору :

$$\omega = \frac{F_{\tau}}{F_{\varepsilon}} = \frac{\pi d^3}{6} \rho_{\text{ч}} \cdot \frac{v_0^2}{r} / (3 \cdot \pi \cdot \mu \cdot d_{\text{ч}} v_{\omega}) = \frac{d_{\text{ч}}^2 \rho_{\text{ч}} v_0}{18 \mu r} = Stk_{\omega} \quad (4.21)$$

Коефіцієнт у правій частині рівняння (4.21) є критерієм Стокса Stk_{ω} , лінійний параметр r визначає радіус обертання. Таким чином, коефіцієнт осадження) в полі відцентрової сили можна виразити, як

$$\eta_{\omega} = f(\text{Re}; Stk_{\omega}) \quad (4.22)$$

Наприклад, коли пиловий потік обтікає тверде тіло (або краплю), частинки продовжують рухатися вздовж кривої газового потоку завдяки своїй високій інерції (рис. 4.3) і осідають на поверхні об'єкта.

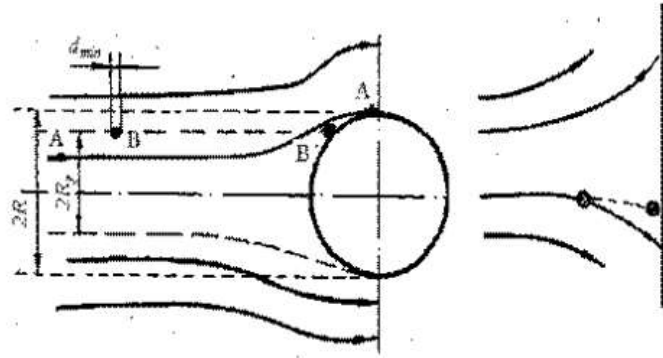


Рисунок 4.3 - Обтікання перешкоди запиленим потоком

Таке осадження називається інерційним. Коефіцієнт ефективності η_{Stk} інерційного осадження визначається частиною частинок, вилучених з потоку навколо об'єкта. Іноді його називають "цільовою ефективністю". Траєкторія частинки в потоці газу може бути виражена наступними рівняннями:

$$\rho_q \cdot V_q \cdot \frac{dV_q}{dt} = \rho \cdot V_q \cdot \frac{dv}{dt} + F_{ci} \quad (4.23)$$

$$m_q \cdot a_q = m_\alpha (V_q) \cdot a + F_{ci} \quad , \quad (4.24)$$

де m_q - маса частинки, V_q - швидкість газу, в якому рухається частинка, в тому ж об'ємі V_q , а - прискорення - прискорення, якого зазнають маси m_q і m_α , відповідно, v_q і v_α - швидкість частинки і газу в точці розташування частинки, відповідно і t - час руху.

Якщо потік газу стаціонарний і закони руху частинок відповідають закону Стокса, рівняння (4.24) можна записати в безрозмірній формі:

$$2Stk \cdot \frac{d^2 \bar{r}}{d\tau^2} + \frac{d\bar{r}}{d\tau} = \bar{v} \quad (4.25)$$

$$\tau = \frac{v_\infty}{R} t \quad - \text{безрозмірний час,}$$

R - характерний розмір (наприклад, радіус кули або циліндра), v - безрозмірна швидкість частинки, v_∞ - незбурена швидкість,

$$2Stk \cdot \frac{d^2 \bar{r}}{d\tau^2} + \frac{d\bar{r}}{d\tau} = \bar{v} \quad (4.26)$$

Критерій Стокса або "параметр інерції" характеризує співвідношення між силами інерції, що діють на компоненти, і силами гідравлічного опору середовища

$$Stk = \frac{v \cdot d_u^2 \rho_u}{18 \cdot \mu_s 2R} = \frac{l_u}{2R} = \frac{F_{ei}}{F}$$

Чисельно цей критерій визначається співвідношенням

$$l_u = \frac{d^2 \cdot v_\alpha \cdot \rho}{18 \cdot \mu_\alpha}, \quad (4.27)$$

яке відповідає відношенню відстані, пройденої частинкою з початковою швидкістю v_u до зупинки за відсутності зовнішніх сил, до характерного розміру обтікаемого об'єкта (наприклад, діаметру кулі або циліндра).

Якщо частинка рухається в області, де закон Стокса не застосовується, тобто, необхідно ввести поправку для врахування відношення дійсної сили опору до "стоксової" сили опору $FStk$, яка набуває вигляду

$$\frac{F_{ei}}{F_{зик}} = \zeta \cdot \frac{Re}{24} \quad (4.28)$$

$Re_u = \frac{d_u \cdot v}{\mu} (v_u - v)$ - критерій Рейнольдса для частинок. У цьому випадку

закони руху частинки записуються у вигляді

$$\frac{48Stk}{\zeta_u Re_u} \cdot \frac{d^2 \bar{r}}{d\tau^2} + \frac{d\bar{r}}{d\tau} = \bar{v} \quad (4.29)$$

Іншими словами, ці рівняння підходять для опису геометрично подібних систем з однаковим Re , і в цьому випадку форма течії подібна при різних швидкостях. З рівнянь також видно, що при $Stk=0$, тобто для частинок з нескінченно малою масою, частинки рухаються точно вздовж потоку $v_u=v_s$, не зіштовхуючись з поверхнею обтікаемого об'єкта. Природно, що таке ж явище спостерігається і для достатньо малих значень критерію Стокса (так

зване критичне значення: $Stk_{min} = Stk$), при якому інерція достатня для подолання захоплення частинок газовим потоком і вони досягають поверхні об'єкта, тобто осадження частинок на перешкоді можливе лише за умови

$$Stk > Stk_{kp} \quad (4.30)$$

Тому, знаючи граничне значення числа Стокса, Stk :

$$Stk_{ec} = \frac{1}{18} \cdot \frac{d_u^2 \cdot \rho_u \cdot v_\infty}{\mu_\alpha h} \quad , \quad (4.31)$$

де h - ширина незбуреного потоку перед перешкодою (тобто ширина незбуреного потоку зазвичай приймається рівною розміру перешкоди $h \approx 2R$), можна визначити мінімальний розмір частинок dh_{min} над перешкодою:

$$d_u = \sqrt{\frac{18\mu_\alpha h Stk}{\rho_u v_\infty}} \quad (4.32)$$

Якщо розмір частинок $dh < dh_{min}$, то вважається, що вони не можуть бути захоплені інерційним осадженням і ступінь очищення під дією інерційних сил є функцією наступного вигляду

$$\eta_{ei} = f(Re_u; Stk; d_{u_{min}}) \quad (4.33)$$

У загальному випадку інерційне осідання (сепарація) зважених часток (пилу) в твердих аерозолях відбувається під впливом багатьох факторів. По-перше, інерційні сили, які переміщують частинки з основного потоку в навколишнє середовище. По-друге, більші частинки рухаються швидше і захоплюють менші (так звані явища кінетичної агломерації). По-третє, у випадку інерційного осадження існує перехідна зона між основним рухомих потоком і нерухомих шаром, що викликає "локальний" вихор пилових частинок і інкапсульованих частинок з перешкод назад в потік. Полегшується стимульований транспорт. По-четверте, стимульований транспорт стає можливим. Це відбувається, коли крихкі агломерати пилу стикаються і розпадаються на менші. По-п'яте, частинки також можуть осаджуватися, коли основний потік безпосередньо вдаряється об перешкоду, т.з. ефект захоплення (Рис. 4.4).

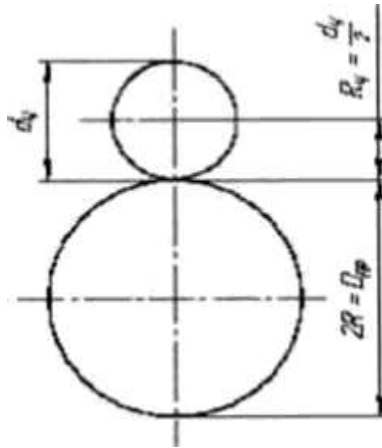


Рисунок 4.4 - Умовна схема зачеплення

При осадженні частинок розміром, порівняним з розміром перешкоди або тіла, що змітається, починає проявлятися ефект зачеплення (дотику). Якщо нехтувати ефектами інерції (тобто вважати, що рух відбувається виключно вздовж ліній течії), то вони осідають не тільки тоді, коли їхня траєкторія перетинає поверхню тіла, але й тоді, коли вони перетинають лінії течії на відстані, що дорівнює їхньому радіусу від поверхні тіла. Тому навіть за відсутності інерційного осадження ефективність захоплення більша за нуль. Саме захоплення характеризується деяким параметром R' , який є відношенням діаметра частинки d_h до діаметра тіла (перешкоди), що обтікається потоком (Рис. 4.4):

$$R' = \frac{d_c}{D_{i\delta}} \quad (4.34)$$

Наприклад, для потенційного ("гладкого") обтікання кульки потоком газу, коли значення d_c настільки малі, що інерційними ефектами можна знехтувати, ефективність зачеплення становить

$$\eta \approx 2R' \dots 3R' \quad (4.35)$$

Для обтікання циліндра:

$$\eta \approx R' \dots 2R' \quad (4.36)$$

Ефективність осадження частинок у в'язких потоках навколо перешкод сильно залежить від режиму течії газу і від швидкості. Оптимальні умови

для осадження частинок виражаються відношенням критерію Стокса Stk частинок до критерію Рейнольдса перешкоди:

$$\frac{Stk}{Re_{ie}} \approx \frac{d_u^2 \cdot \rho_u}{D_{ie}^2 \cdot \rho_z} = const \quad (4.37)$$

Таким чином визначається ступінь осадження частинок за рахунок ефекту захоплення .

4.5 Метод Каннінгема-Міллікена (броунівський рух частинок)

Підхід Стокса використовується для опису руху частинок розміром, який перевищує 1 мкм. Якщо цей розмір зменшиться, у визначальні рівняння вводять поправку Каннінгема-Міллікена, щоб врахувати підвищену рухливість частинок, розмір яких можна порівняти з середньою довжиною вільного пробігу l_i молекул газу:

$$F = \frac{1}{C_k} \cdot 3\pi \cdot \mu_a \cdot d_u \cdot v_u \quad (4.38)$$

де поправка C_k розраховується за допомогою рівняння (4.39).

$$C_k = 1 + \frac{2 \cdot l_i}{d_u} (1,257 + 0,4 \cdot e) \quad (4.39)$$

Довжина вільного пробігу молекул газу l_i може бути оцінена за допомогою наступного рівняння:

$$l_i = \frac{\mu}{\rho} \sqrt{\frac{\pi M}{2RT}} \quad , \quad (4.40)$$

де маса M кмоль газу, кг/кмоль; $R = 8314$ Дж/(кмоль×К); $T = 293^\circ\text{К}$. За нормальних умов, $\rho_z = 1,205 \cdot \text{кг/м}^3$, $\mu_z = 1,82 \cdot 10^{-5}$ Па·с і за нормального атмосферного тиску довжина $l_i \approx 6,5 \cdot 10^{-8}$ м. Скореговане значення C_k за рівнянням (4.39) для повітря за нормальних умов наведено нижче:

d_i	0,003	0,01	0,03	0,1	0,3	1,0	3,0	10,0
C_k	90,0	24,5	7,9	2,9	1,57	1,16	1,03	1,0

Частинки субмікронного розміру (менше 1 мкм) також піддаються броунівському руху (тепловому руху) молекул газу. У цьому випадку напрямок руху частинок є випадковим і описується рівнянням Ейнштейна, згідно з яким амплітуда Δ_x руху частинки може бути оцінена наступним рівнянням:

$$\Delta_x^2 = 2D_c t_o \quad , \quad (4.41)$$

де D_c - коефіцієнт дифузії частинки, м²/с для інтенсивності броунівського руху, t - час руху частинки, с. За умовами закону Стокса, якщо діаметр частинки більший за довжину середнього пробігу молекул ($d_c > l_i$), коефіцієнт дифузії є функцією діаметра частинки:

$$D = \frac{C_K k_A T}{3\pi\eta d} \quad , \quad (4.42)$$

$$D_c = \frac{4k_A T}{3\pi d_c^2 \rho} \sqrt{\frac{8RT}{\pi M}} \quad , \quad (4.43)$$

де $k_A = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К - стала Больцмана. Для $d_c > l_i$ коефіцієнт дифузії можна розрахувати за допомогою рівняння Ленгмюра. У таблиці 4.1 наведено швидкість падіння (осідання) та переміщення частинок при броунівському русі за одну секунду за нормальних умов.

Таблиця 4.1 - Швидкості седиментації для броунівського руху

Діаметр частинок мкм	Критерій Рейнольдса	Швидкість падіння частинок см/с	Броунівське переміщення частинок за 1 с
0,6 0,2	1,32 13,2	10,8 1,2 0,11	$5,04 \cdot 10^{-5}$
0,06 0,02	0,366	$2,23 \cdot 10^{-4}$	$8,94 \cdot 10^{-5}$
	$1,26 \cdot 10^{-7}$	$4,16 \cdot 10^{-5}$	$1,54 \cdot 10^{-4}$
	$1,37 \cdot 10^{-6}$	$1,14 \cdot 10^{-5}$	$2,82 \cdot 10^{-4}$
	$2,45 \cdot 10^{-5}$	$1,3 \cdot 10^{-2}$	$5,07 \cdot 10^{-4}$
	$4,62 \cdot 10^{-2}$	$1,39 \cdot 10^{-3}$	$1,0 \cdot 10^{-3}$
	$1,43 \cdot 10^{-2}$		$2,1 \cdot 10^{-3}$
			$5,5 \cdot 10^{-3}$
			$1,06 \cdot 10^{-2}$

Як видно з табл. 4.1, для розмірів частинок 1.0. .0, 6 мкм броунівський рух еквівалентний руху падіння; для частинок розміром 0, 06. .0, 02 мкм броунівський рух у багато разів (в тисячі разів) перевищує

рух вільного падіння, причому останній практично не визначає характер руху частинок. Таким чином, високодисперсний пил та інші дрібні аерозольні частинки практично не осідають навіть у спокійному повітрі, а переміщуються в повітряному просторі. Слід зазначити, що наведене вище рівняння відповідає частинкам з правильною сферичною формою. З цієї причини було введено поняття седиментаційного діаметра, який дорівнює діаметру сферичної частинки, що має таку ж густину і швидкість осідання, як і аналізована частинка. Слід також зазначити, що розглянуті залежності визначають рух однієї частинки пилу в нескінченному просторі. В реальності в одному об'ємі осаджується велика кількість частинок. Вони взаємодіють між собою і впливають на хід процесу осадження. Об'єм повітряного середовища обмежений стінами та іншими конструкціями (наприклад, газоходами, повітроводами, корпусами пиловловлювачів). Наявність таких обмежень повітряного простору також викликає деяке відхилення від наведених вище залежностей. Ефективність очищення газів методом дифузійного осадження оцінюється за допомогою безрозмірних критеріїв, до яких відносяться коефіцієнт дифузії частинок D_c , критерій Шмідта S_c , що характеризує співвідношення між силами внутрішнього тертя і дифузії:

$$S_c = \frac{\mu}{\rho D_c} \quad (4.44)$$

та критерій Пекла Pe , який характеризує співвідношення сил конвекції та дифузії:

$$Pe = Re \cdot S_c = \frac{v\rho L}{\mu} \cdot \frac{\mu}{\rho D_c} = \frac{vL}{D_c} \quad , \quad (4.45)$$

де L - розмірність, що характеризує перешкоду або об'єкт, який змітається. Величина, обернена до критерію Pe , називається параметром дифузного осадження і позначається, як D . Для оцінки ефективності дифузного осадження використовується наступне рівняння умову "гладкого" потоку, а також

$$\eta_D = \frac{2\sqrt{2}}{\sqrt{d_0 Pe}} \quad , \quad (4.46)$$

при обтіканні кулі, та

$$\eta_D = \frac{3,19}{\sqrt{Pe}} \quad , \quad (4.47)$$

при обтіканні циліндра.

Згідно з наведеними виразами, ефективність дифузійного осадження обернено пропорційна розмірам частинки та швидкості газового потоку:

$$\eta_D = f\left(\frac{1}{d} \cdot \frac{1}{v_c}\right) \text{ чи } \eta_D = f(Re, Pe, Sc) \quad (4.48)$$

Як уже зазначалося вище, у промислових аерозолях електрично нейтральних частинок практично не існує і вони мають свій природний електричний заряд (трибозаряд).

Електричне очищення газів від пилу є одним з найбільш ефективних видів очищення газу від тонко-або дрібнодисперсних твердих та рідких аерозолів (зважених частинок пилу та крапель туману). Цей процес очищення заснований на ударній іонізації газів у зоні коронуючого розряду, що виникає в електричному полі біля поверхонь коронуючих електродів з малим радіусом кривизни. В результаті частки набувають електричного заряду (як правило, негативного знака), який називається коронним зарядом. При розміщенні цих частинок в електрофільтрі між коронуючим та осаджувальним електродами, вони осаджуються в осадковому електроді (рис. 4.5)

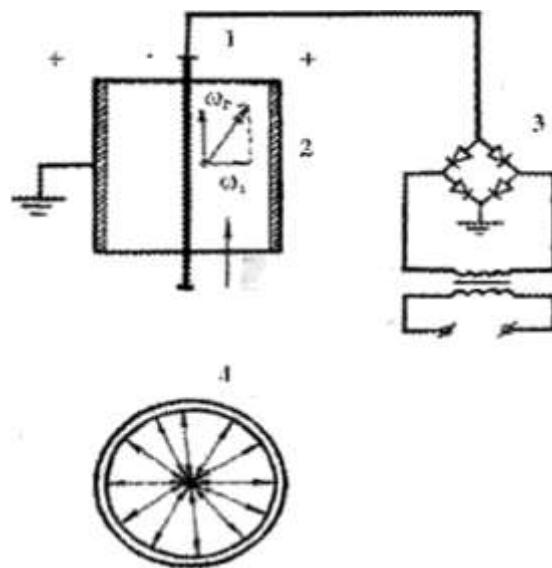


Рисунок 4.5 - Схема електрофільтра: 1 – коронуючий електрод; 2 – осаджувальний електрод; 3 – випрямляч ;4 – силові лінії електричного поля

Опишемо докладніше механізм електричного очищення газів. Забруднені гази, що надходять у електричне поле, як правило, мають заряджені іони і здатні проводити електричний струм, тому, потрапляючи

в простір між електродами електрофільтра, утворюється ще більша кількість вільних іонів, кількість яких залежить від електричної напруги між електродами. При підвищенні напруги між електродами в рух газових молекул залучається все більша кількість іонів газу, сила струму зростає доти, доки вся кількість іонів не переходить до стану руху.

Особливо наочно цей ефект позначається за наявності коронного заряду. Коронний заряд виникає у неоднорідному електричному полі біля поверхні коронуючих електродів з малим радіусом кривизни. У зоні корони, де напруженість електричного поля дуже велика, іони, що містяться в газі, розганяються у напрямку силових ліній електричного поля настільки, що зіткнувшись із нейтральними газовими молекулами, вибивають із них частину зовнішніх електронів. При цьому виникають позитивні іони та електрони. Нові іони і електрони, що утворилися в свою чергу також прискорюються під дією електричного поля, викликаючи подальший процес лавиноподібної ударної іонізації газу, який стійко протікає в неоднорідному електричному полі, характерному, наприклад, для циліндричного конденсатора (див. рис. 4.5). Аерозольні частинки, що надходять у зону між коронуючим та осаджувальним електродами, адсорбують на своїй поверхні іони, набувають електричного заряду і під дією сил електричного поля одержують прискорення, спрямоване у бік електрода із зарядом протилежного знака.

Враховуючи, що кількість негативних іонів у повітрі та димових газах вище, ніж позитивних, електрофільтри зазвичай створюють із короною негативної полярності. Тому основна маса пилу осаджується на позитивному осаджувальному електроді, і лише дуже незначна частина – на негативному коронуючому електроді

$$q = q_{\max} \frac{t}{t + \tau} \quad , \quad (4.49)$$

де t - час знаходження частки в електричному полі; τ – константа (деяка стала) часу зарядки частинки.

Час зарядки аерозольних частинок невеликий і вимірюється частками секунди. Вважається, що величина трибозаряду частки зазвичай складає

$$q_{mp} \leq 0,05q_{\max} \quad , \quad (4.50)$$

де q_{\max} – заряд, що отримує частка при коронному заряді.

Частинки розміром понад 0,5 мкм заряджаються головним чином у результаті зближення з іонами під дією електричного поля. Максимальний

$$q_{\max} \approx 3\pi \cdot \varepsilon \cdot E \cdot d_q^2$$

заряд q_{max} , який може бути отриманий частинкою, може бути оцінений приблизно за допомогою виразу

$$q_{max} = \frac{3\pi\epsilon_0 E d_q^2}{4} \quad (4.51)$$

де E – напруженість електричного поля між електродами, В/м; d_q – діаметр (розмір) частинки, м; $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м – діелектрична стала.

Частинки меншим розміром набувають заряду в результаті зближення з іонами під дією теплової дифузії, який можна оцінити як

$$q_{max} \approx 10^6 \cdot d_q^2 \cdot e \quad (4.52)$$

де $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл – електричний заряд електрона.

Рух заряджених частинок до осадового електрода відбувається під дією:

- 1) аеродинамічної сили (стоксівської сили – формула (4.29)) опору F_c руху частинок основного газового потоку;
- 2) електростатичних сил F_E електричного поля, напруженості E , та заряду частинки q (закон Кулона);
- 3) сили тяжіння;
- 4) сили тиску «електричного вітру», обумовленої механічним впливом іонів, що рухаються, на молекули газу та частинки пилу, що виникає в місцях генерації іонів (тобто у коронуючих електродах) і викликає хаотичну циркуляцію газу в міжелектродному проміжку;
- 5) сил теплової дифузії та ін.

Основний вплив на осадження частинок в електрофільтрах надають аеродинамічні та електростатичні сили. У області застосування закону Стокса, прирівнюючи електростатичну силу і силу опору середовища $F_c = F_E$, можна розрахувати швидкість осадження частинок на осадовому електроді (так звану швидкість дрейфу):

$$\frac{1}{C_K} \cdot 3\pi \cdot \mu \cdot d_q \cdot v_q = qE \quad (4.53)$$

чи

$$v = v_q = \frac{C_K \cdot q \cdot E}{3\pi\mu d_q} \quad (4.54)$$

Для оцінки ступеня очищення газів в електрофільтрах вводять параметр електростатичного осадження k , який характеризує відношення електростатичних сил F_E та стоксівських сил опору F_c :

$$k = \frac{F_E}{F_c} = \frac{C_K q E}{3\pi\mu d_q v} \quad (4.55)$$

Таким чином, ефективність очищення частинок під дією електричних сил описується залежністю виду

$$\eta_E = f(k) \quad (4.56)$$

Електричні сили відіграють велику роль у «мокрих» пиловловлювачах, у яких краплі зрошуючої рідини, як правило, мають електричний заряд. При цьому вводять параметр електростатичного осадження k

$$k = \frac{F_E}{F_c(v)} \quad (4.57)$$

мокрих пиловловлювачів на краплях зрошуючої рідини: , де v – швидкість незбуреного газового потоку у віддаленні від краплі радіусом r_k .

Максимальний ефект осадження частинок під дією електричних сил у «мокрих» пиловловлювачах спостерігається:

- 1) якщо частинки пилу та краплі зрошуючої рідини електрично заряджені;
- 2) якщо час перебування частки пилу в апараті порівняно великий;
- 3) при низькій відносній швидкості між частинками та краплями.

Важливий вплив на процес осадження частинок пилу на електродах електрофільтрів має електричний опір шарів пилу. За величиною електричного опору розрізняють:

- 1) пили з малим питомим електричним опором ($\rho < 10^4$ Ом · см), які при зіткненні з електродом практично миттєво втрачають свій заряд і набувають заряду електрода, в результаті якого виникає сила відштовхування;
- 3) пили з питомим електричним опором $\rho = 10^4 \dots 10^{10}$ Ом · см – добре осідають на електродах і легко видаляються з них при струшуванні;
- 4) пили з питомим електричним опором $\rho > 10^{10}$ Ом · см - найважче уловлюються в електрофільтрах, так як на електродах частинки розряджаються повільно, що значною мірою перешкоджає осадженню нових частинок.

У реальних умовах зниження питомого електричного опору можна здійснити зволоженням запиленого газу.

Ефективність очищення запиленого газу оцінюють також за формулою, одержаною теоретичним шляхом:

$$\eta_E = 1 - a \cdot \quad (4.58)$$

При цьому $F_{\text{пит}} [\text{м}^2 \cdot \text{с} / \text{м}^3]$ – питома поверхня осаджувальних електродів, що дорівнює відношенню площі поверхні осаджувальних елементів (м^2) до витрати газу, що очищається ($\text{м}^3/\text{с}$).

З наведених формул випливає, що ефективність очищення газу в електрофільтрах зростає із зростанням твору $v_{\text{др}} \cdot F_{\text{пит}}$.

$v_{\text{др}} \cdot F$	3,0	3,7	3,9	4,2	4,6
η	0,95	0,975	0,98	0,985	0,99
$v_{\text{др}} \cdot F_{\text{уд}}$	3,0	3,7	3,9	4,2	4,6
η	0,95	0,975	0,98	0,985	0,99

Однак ступінь ефективності очищення, визначений за формулою (4.58), відрізняється від дійсної, оскільки виходить з ідеалізованих умов і не враховує всіх факторів впливу на цей процес. Зазвичай користуються практичними даними про ефективності очищення конкретних видів електрофільтрів.

При зіткненні частинки з товстим шаром рідини, коли товщина плівки рідини L_p більше діаметра частки ($L_p > d_u$), можливі три варіанти поведінки частки (Рис. 4.6):

- 1) частка рикошетом ударяється об поверхню і виноситься потоком газу;
- 2) частинка не рикошетує, але й не занурюється у глибину шару, тобто залишається на поверхні;
- 3) частка пробиває поверхню рідини і занурюється в шар.

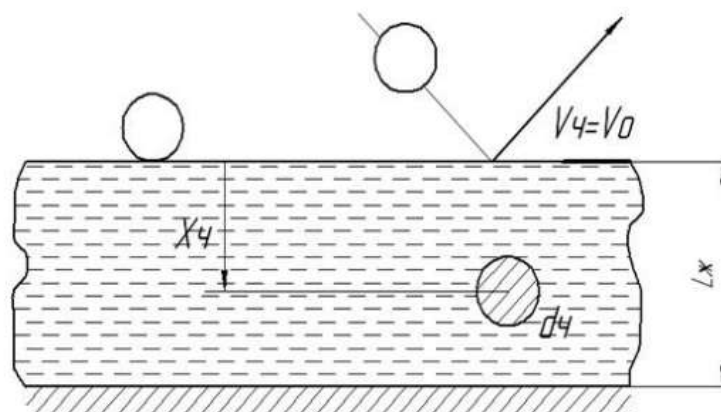


Рисунок 4.6 - Умовне зображення процесу зіткнення частинки із плівкою

У пиловловленні найбільш бажаний третій варіант, оскільки перший варіант дає кулеподібний ефект уловлювання, а другий – зводиться до варіанта осадження частинок на змочених поверхнях. Слід мати на увазі, що якщо щільність рідини більша за щільність частинки ($\rho_{жс} > \rho_{ч}$), то частка, яка проникає в товщу рідини, може спливати назад на її поверхню. В цьому випадку процес також зводиться до другого варіанта. У найбільш загальному вигляді рух сферичної частки, що поринула в рідину, описується рівнянням

$$(m_{ч} + \bar{m}_x) \frac{dv_{ч}}{dt} = F, \quad (4.59)$$

де $m_{ч}$ – маса частинки;

$$\bar{m}_x = \frac{1}{2} \frac{\pi}{6} \rho_x d_{ч}^3 \quad (4.60)$$

- маса «приєднаної» до частки рідини; v – швидкість частки щодо рідини; t – час занурення частинки; $F_{опр}$ – сила опору середовища (рідини) руху частинки:

$$F = \xi_{ч} \cdot S_{ч} \cdot \frac{v_{ч}^2 \rho_x}{2}, \quad (4.61)$$

де $\xi_{ч}$ – коефіцієнт аеродинамічного опору частинки щодо рідини; $S_{ч}$ – площа перерізу частки, перпендикулярного до напрямку руху; ρ – щільність рідини, в якій рухаються частки.

Приймаючи кулясту форму частинки, силу опору можна переписати у вигляді

$$F = \xi_{ч} \cdot \frac{\pi \cdot d_{ч}^2}{4} \cdot \frac{v_{ч}^2 \rho_x}{2} \quad (4.62)$$

Коефіцієнт аеродинамічного опору частки $\xi_{ч}$ залежить від безрозмірного критерію Рейнольдса для частинки, що рухається в рідині:

$$Re = \frac{v_{ч}^2 d_{ч} \rho_x}{\mu_x}, \quad (4.63)$$

де $\mu_{жс}$ – динамічна в'язкість газів.

За умови, що $0,1 \leq Re \leq 1000$ коефіцієнт опору частинки дорівнює

$$\xi_{ч} = \frac{24}{Re} + \frac{4}{\sqrt[3]{Re}} \quad (4.64)$$

Для цього випадку можливо отримати наступний рішення рівняння (4.59)

(при $\rho_x = 1 \text{ г/см}^3$ – густина рідини, вода; $\rho_{ч} = 2,5 \text{ г/см}^3$ – густина частинки):

$$\frac{x_{ч}}{d_{ч}} = \frac{1}{6} Re, \quad (4.65)$$

де x_c - довжина шляху, що проходить часткою в рідині, Re – критерій Рейднольдса для частинки у початковий момент руху.

З отриманого рішення випливає, що швидкість великих частинок убуває швидше, ніж швидкість дрібних, а вплив розміру частинок на довжину шляху x_c більший, ніж вплив швидкості.

Для часток, що добре змочуються (гідрофільних), для утримання на поверхні води достатньо їх точкового контакту. Погано змочуються (гідрофобні) частинки, у тому числі всі дрібні. Вони будуть уловлені тільки в тому випадку, якщо глибина занурення в рідину їхнього центру перевищуватиме їхній радіус r ($x_c / d_c > 0,5$), тому що при цьому можна чекати «захлопування» каверни за частинкою, що занурилася, що можливо лише при $Re > 5$. З наведеного (див. Рис. 4.7), видно також, що для гальмування великих частинок потрібна велика товщина плівки рідини (води), оскільки можливо, частка, пройшовши шар води, вдариться об поверхню дна і залишить шар рідини.

Таким чином, частинки малих розмірів і частинки, що стикаються з поверхнею рідини (води) з малою швидкістю, поринають у неї на глибину менше $x_c < d_c$ і, якщо вони погано змочуються, можуть бути зірвані повітряними потоками.

При значеннях $Re > 1000$ та товщині плівки $L_p \leq 20 d_c/2$ також можливий відбиття частинок від твердої стінки дна плівки і вторинний вихід частки у повітряний потік.

Наведений аналіз умов осадження частинок на сухих, змочених та рідких поверхнях дозволяє зробити наступні важливі висновки:

1. У сухих пиловловлювачах та фільтрах загального призначення можуть надійно утримуватися частинки не більше 4–5 мкм. Заповнювати сухі фільтри краще за полімерні матеріали, так як деформація поверхні цих матеріалів при ударі по ним пилових частинок покращує умови контакту та адгезії.
2. У пиловловлювачах і фільтрах з поверхнями, змоченими маслами, можуть надійно утримуватися частинки, що змочуються, розміром до 20...50 мкм і погано – ті, що мають розміри до 10 мкм.
3. Плівками рідини (води) у мокрих пиловловлювачах надійно утримуються частинки, рух яких характеризується значенням $Re > 5$.

Для підвищення ефективності пиловловлення в деяких випадках прагнуть зменшити поверхневий натяг води шляхом введення поверхнево-

активних речовин (ПАР), головним чином синтетичного походження – сульфанол, синтинол, лауріт натрію (шампуні). Молекули ПАР інтерополярні, тобто вони мають гідрофільну полярну групу та неполярний вуглеводневий гідрофобний ланцюг. До гідрофобної поверхні частинки, що поринула у воду, повертаються неполярні вуглеводневі частини молекул ПАР, що адсорбуються на поверхні частинок. Полярні – гідрофільні частини молекул утворюють зовнішній шар. Через протидію частка виявляється оточеною гідрофільною кулею, тобто не змочується. Наприклад: добавка до води 0,1...1 % ПАР знижує поверхневий натяг до 300 мкН/см, але водночас призводить до утворення стійкої піни, яка в ряді випадків перешкоджає роботі пиловловлювача. У цих випадках додають піногасники - речовини, мало розчинні у воді, але швидко розтікаються по її поверхні у вигляді мономолекулярного шару. Піногасники витісняють піноутворювачі з поверхневого шару, знижуючи стійкість піни. Добавка піногасників (наприклад, ПМС-1000 – поліметилсилоксанова рідина у кількості близько 0,001 %) також сприяє подальшому зниженню поверхневого натягу води.

Кращому змочуванню частинок сприяє також підвищення температури води, тому що при цьому зменшуються сили поверхневого натягу та руйнується шар повітря, адсорбований на поверхні частинок.

4.6 Барботаж

Барботажем називається рух газу (аерозолі) через шар рідини, яка набуває вигляду бульбашок (піни) або струменів. Розмір бульбашок газу при барботажі коливається в межах від 2 до 20 мкм і залежить в основному від швидкості газового потоку, яку в барбатерах та пінних апаратах приймають від 1 до 4...4,5 м/с. Найважливішою умовою працездатності пінного шару є його стабільність. Руйнування пінного шару може відбутися у таких випадках:

- 1) при падінні швидкості газу нижче деякої критичної швидкості (для різних типів апаратів вони різні);
- 2) у разі зростання швидкості газу до значень, коли починається захоплення газом та винесення з апарату великої кількості рідини, що порушує структуру пінного шару;
- 3) при нерівномірному розміщенні піни за перерізом апарата (через нерівномірності поля швидкісного газового потоку; не горизонтальності піноутворювальної решітки; з інших причин).

Усередині газового міхура діють механізми інерції, гравітації та дифузії. На дію цих механізмів впливає форма частинок, їх гідрофільності чи гідрофобності. Ступінь уловлювання за рахунок інерційного осадження оцінюється за формулою

$$\eta = 18 \frac{v\tau}{d^2} \quad , \quad (4.66)$$

де v - швидкість підйому газового міхура; d - діаметр міхура; τ - час релаксації частки, що представляє фракцію, яка розглядається.

Ступінь уловлювання за рахунок гравітації дорівнює:

$$\eta = \frac{3}{2} \frac{g\tau}{dv} \quad (4.67)$$

Ступінь уловлювання за рахунок дифузії дорівнює:

$$\eta = 5.1 \sqrt{\frac{d_q}{v_{\text{нвз}} - d_{\text{нвз}}^3}} \quad (4.68)$$

Наведені формули приблизні, так як не враховують коагуляцію частинок усередині міхура, гідрофільність або гідрофобність частинок та ін.:

$$\eta_{\Sigma} \approx 1 - (1 - \eta_i) \cdot (1 - \eta_{ep}) \cdot (1 - \eta_o) \quad (4.69)$$

Захоплення частинок краплями засноване на кінематичній коагуляції, обумовленою різницею швидкостей частинок та крапель. Можна виділити три основних режиму захоплення:

1. Спокійний режим: аерозоль рухається з малою швидкістю (ламінальний потік) – у разі краплі (частки) падають під впливом сили тяжкості.
2. Середній (перехідний) режим: аерозоль рухається зі швидкістю, відповідного ламінарного або слаботурбульованого потоку, - в цьому у разі краплі мають швидкість, що значно перевищує швидкість седиментації (тобто швидкості гравітаційного осадження).
3. Динамічний режим: швидкість потоку аерозолю сильно турбулізована. У цьому випадку рідина або її краплі надходять у потік і інтенсивно диспергуються (дробляться) під впливом турбулентних пульсацій, які сприяють контакту між рідиною та аерозольними частинками.

Для осадження в основному використовується динамічний режим, який характеризується високими швидкостями газового потоку ($v_z = 50 \dots 150$ м/с), що характеризується високими швидкостями газового потоку. Ступінь очищення (тобто ступінь уловлювання частинок краплями) визначається двома факторами: швидкістю газового потоку і питомим

об'ємом зрошення рідиною в апараті. Якщо питомий об'єм зрошення відносно невеликий ($q = 0,1 \dots 0,5 \text{ л/м}^3$) і критерій Стокса ($0,1 \leq Stk \leq 1,0$), ступінь захоплення частинок краплями можна апроксимувати рівнянням

$$\eta = \frac{Stk^2}{(Stk + 0,35)^2} \quad (4.70)$$

Зауважимо, що рівняння (4.70) справедливе і для випадку захоплення частинок "сухими" сферичними перешкодами. Для певного зрошення ($q = 1,5 \dots 2,0 \text{ л/м}^3$, $Stk = 1,0 \dots 1,70$) для оцінки ступеня захоплення використовується наступне рівняння:

$$\eta = 1 - 0,155Stk^{-1,24} \quad (4.71)$$

Середній діаметр (розмір) крапель можна оцінити за наступним рівнянням:

$$\bar{d} = \frac{585 \cdot 10^{-3} \sqrt{\sigma_x}}{v_{жг} \sqrt{\rho_{ж}}} \quad (4.72)$$

де $v_{жг}$ - швидкість потоку відносно рідини на вході в апарат, м/с; σ_x - поверхневий натяг рідини, Н/м. Пилоосаджувальні камери (Рис. 4.7) осаджують частинки з газового потоку під дією сили тяжіння.

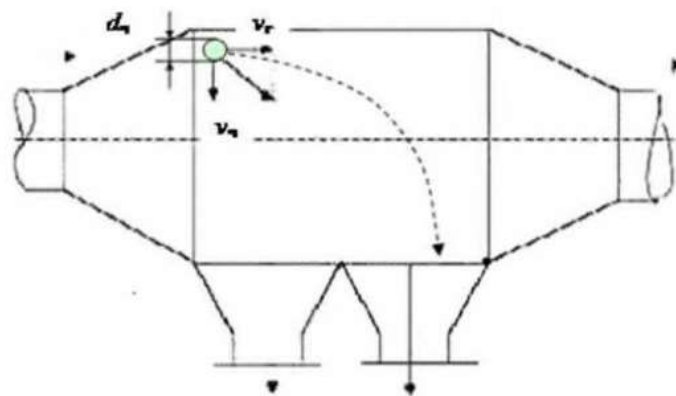


Рисунок 4.7 - Камера осадження пилу

Гравітаційне осадження частинок пилу в пилоосаджувальних камерах відбувається під дією горизонтально спрямованого газового потоку. У цьому випадку швидкість осадження частинок можна оцінити за допомогою наступного рівняння

$$v_u \approx v_z = \frac{1}{18} \cdot \frac{d_p^2 \rho_p}{\mu} g = \tau_p g \quad (4.73)$$

Це рівняння справедливе, якщо рух частинок є рівномірним. На практиці, як правило, цей рух не є рівномірним і для того, щоб швидкість осадження частинок досягла певного значення проти швидкості руху газу, потрібен час, рівний τ_r (так званий час релаксації). Тому для отримання прийнятної ефективності газоочищення необхідно, щоб частинки залишалися в пиловловлювальній камері якомога довше: $t_{осад} > \tau_r$. Тому пиловловлювальні камери, які призначені для осадження навіть великих частинок, є громіздкими конструкціями. Осаджувальні камери часто виготовляють з цегли або збірного залізобетону, рідше - зі сталі або дерева (для "низькотемпературних" газів).

Як згадувалося вище, коли газовий потік, насичений пилом, швидко закручується, частинки пилу за інерцією рухаються в прямому напрямку і за певних умов можуть бути відокремлені від цього потоку. Існує ряд конструкцій пиловловлювачів, які використовують це явище, включаючи "пилові мішки", камери з перегородками і пиловловлювачі, які використовують завихрення газового потоку.

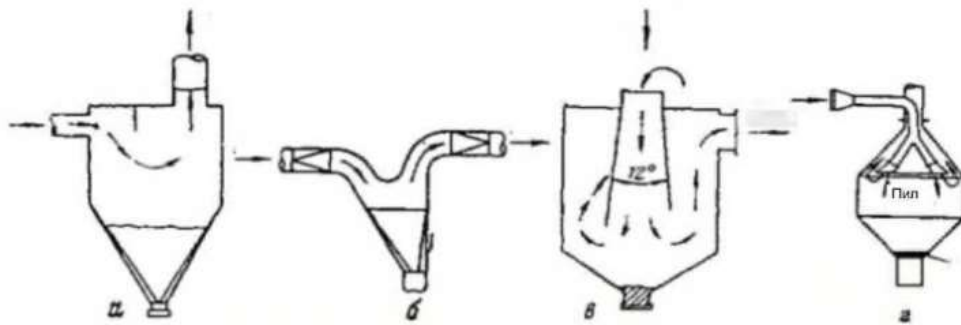


Рисунок 4.8 - Інерційні пиловловлювачі: а - камера з перегородками, б - камера з гладким газовим потоком, в - камера з конусом, що розширюється, г - камера з заглибленим бункером

Механізм інерційного пиловловлювання заснований на тому, що при різкій зміні напрямку газового потоку пил під дією інерційних сил прагне рухатися в тому ж напрямку і може відокремлюватися від цього потоку. Існує ряд пиловловлювачів, які використовують цей принцип, деякі з них показані на наступних фотографіях. Перегородчаста камера (Рис.4.8а) за ефективністю не сильно відрізняється від звичайної горизонтальної відстійної камери, але має вищий гідравлічний опір. Камера, показана на Рис.4.8б, зменшує гідравлічний опір завдяки м'якому завихренню. На Рис. 4.8в показано пиловловлювач, в якому забруднений газовий потік спочатку спрямовується вниз по конусу, потім повертається на 180° і виводиться

зверху. Конус, що розширюється, поступово зменшує швидкість газу і перешкоджає винесенню вторинних частинок. Наприклад, в пиловловлювачах, встановлених безпосередньо після доменних печей на металургійних заводах, швидкість газу в рукавному циліндрі приймається $\sim 1,0$ м/с і 10 м/с у вхідній циліндричній трубі. У цьому випадку досягається ступінь уловлювання близько 65-85% для відносно грубого пилу (25-30 мкм і більше). Гідравлічний опір рукава становить 150-390 Н/м² (15-40 мм рт. ст.). Пиловловлювач із заглибленим бункером показаний на рисунку 48d. Вирішальний вплив на вторинне пиловидалення з таких пиловловлювачів має глибина циліндричної секції, в якій відбувається ослаблення турбулентних газів. Принцип дії жалюзійних пиловловлювачів, також відомих як інерційні пиловловлювачі, можна пояснити наступним чином. Потік пилу, що рухається по газопроводу, стикається з жалюзійною решіткою, що складається з ряду діагонально встановлених пластин (Рис. 4.9). Як правило, жалюзійні пиловловлювачі є загальноприйнятими.

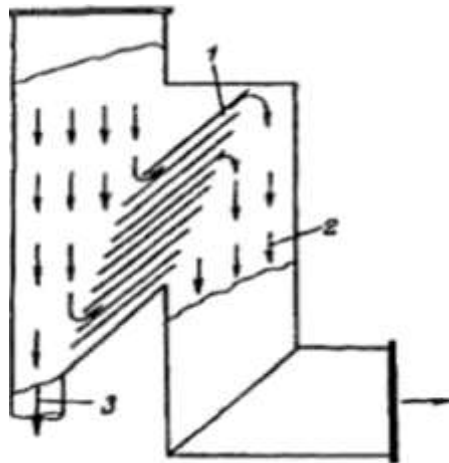


Рисунок 4.9 - Жалюзійний пиловловлювач для часткового вловлювання запилених газів: 1. Жалюзі, 2. Очищений газ, 3. Запилені газу

У жалюзійних пиловловлювачах газовий струмінь огинає пластину, різко змінює напрямок, проходить через іншу сторону решітки і рухається в тому ж напрямку. Пил, який зустрічається з решітчастою пластиною, за інерцією прагне зберегти початковий напрямок руху і, не огинаючи пластину, вдаряється об її поверхню, відбивається в протилежному напрямку від газового потоку, знову огинає її в напрямку газового потоку, вдаряється об наступну пластину по ходу газового потоку і т.д. В результаті газ, що проходить через решітку, очищається, а газ, що залишається по інший бік решітки, збагачується пилом. Ця частина

газового потоку (близько 10% від загального обсягу газу) в кінцевому підсумку направляється в окремий пиловловлювач (найчастіше відцентровий циклон) для очищення.

При підвищенні швидкості підходу газів до пластин решітки ступінь уловлювання пилу в жалюзійному пиловловлювачі спочатку швидко зростає – починаючи зі швидкості близько 10 м/с, це зростання сповільнюється. Зазвичай жалюзійні пиловловлювачі працюють зі швидкістю газів 12...15 м/с.

На ступінь уловлювання пилу істотно впливає швидкість руху газів, що відсмоктуються в відцентровий циклон. Для того щоб у циклон було відведено більше пилу, ця швидкість повинна бути не меншою за швидкість газів при підході до жалюзійних ґрат. Рекомендований гідравлічний опір решітки жалюзійного пиловловлювача становить 98...490 Н/м² (10...50 мм вод. ст.), а циклонів 98...245 Н/м² (10...25 мм вод. ст.).

Крім того, у міру зносу жалюзійних ґрат ступінь уловлювання пилу жалюзійним пиловловлювачем знижується.

Тому область застосування жалюзійних пиловловлювачів обмежена. Їх використовують для уловлювання великого пилу з частками розміром понад 20 мкм.

Якщо запилений потік стикається з якимось тілом, потік обтікає його, а частинки пилу, що мають більшу інерцією, що ударяються об поверхню цієї перешкоди і можуть осісти на ній. Цей принцип використаний в апараті, показаному на рис. 4.10. У ньому встановлено кілька рядів стрижнів, що мають форму півмісяця. Осілий на стрижнях пил змивається водою.

Виділення пилу з газового потоку в жалюзійних пиловловлювачах засноване на використанні сили інерції. Тому вплив на їхню роботу створюють:

- 1) швидкість руху газів при підході до пластин решітки;
- 2) розмір та щільність частинок пилу;
- 3) в'язкість і щільність газів, що очищаються;
- 4) конструкція решітки.

Всі ці фактори впливають на силу інерції, що діє частинку.

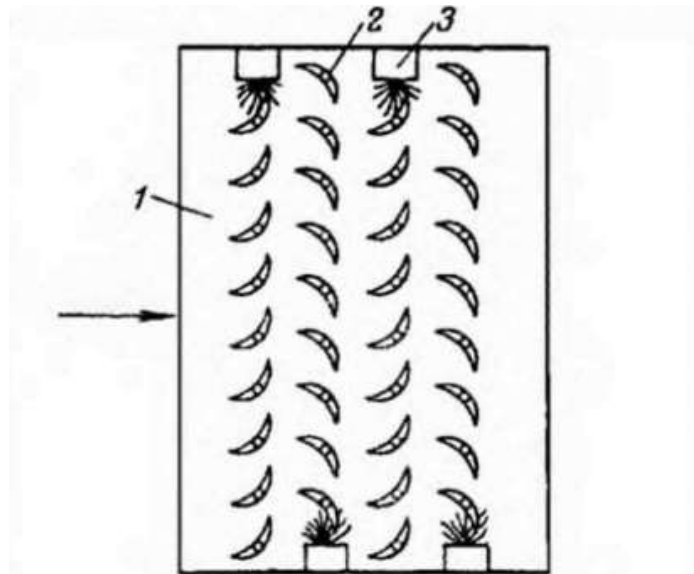


Рисунок 4.10 - Жалюзійний пиловловлювач з відбивними стрижнями
1-корпус, 2-стрижні (жалюзі), 3 - пристрій для підведення зволожуючої рідини

При збільшенні розмірів частинок пилу підвищується ступінь її уловлювання жалюзійним пиловловлювачем. Крім того, із зносом жалюзійних ґрат ступінь уловлювання пилу зменшується, тому область застосування жалюзійних пиловловлювачів обмежена. Їх використовують, як правило, спільно з відцентровими циклонами.

Контрольні питання до розділів 1-4

1. Які існують методи очищення пилогазових викидів? Які механізми лежать у їх основі?
2. Які методи використовують для знешкодження викидів від газоподібних домішок?
3. Які методи використовуються для знешкодження стічних вод?
4. Які сили, як рушійні, використовуються в процесі осадження?
5. Які фактори чинять опір процесу осадження?
6. Як формулюється закон Стокса про швидкість осадження частинок у разі ламінарного руху?
7. Як впливають на швидкість осадження розмір, питома вага та форма диспергованої речовини?

8. Як впливають на швидкість осадження питома вага та в'язкість дисперсійного середовища?
9. Який механізм осадження частинок під впливом відцентрової сили? У яких випадках застосовується таке осадження?
10. Яка сутність процесу осадження частинок під впливом електричних сил? У яких випадках застосовується таке осадження?
11. Які фактори впливають на швидкість осадження частинок в електричному полі? 12. Який принцип закладено основою роботи газових фільтрів? Які існують механізми фільтрації газових домішок?
13. Який принцип мокрої пилоловлення? Які фізичні механізми лежать у його основі?
14. Які загальні ознаки масообмінних процесів?
15. Якими величинами може бути виражена концентрація речовини та який зв'язок між цими величинами?
16. Який характер рівноваги систем «рідина – газ» згідно із законом Генрі?
17. Що зображує і який вигляд має рівноважна та робоча лінія процесу масообміну?
18. Що є рушійною силою масообмінного процесу?
19. У яких одиницях може виражатися рушійна сила масообмінних процесів?
20. Яка схема масообміну між рідиною та газом (паром)?
21. Що таке «коефіцієнт дифузії»?
22. Що таке абсорбція та яке її значення у техніці захисту навколишнього середовища? 23. Як впливає на процес абсорбції температура та тиск?
24. У яких природоохоронних технологіях очищення газових викидів використовується абсорбція?
25. Що таке адсорбція і яке її значення у техніці захисту довкілля?
26. Який механізм протікання адсорбції?
27. Які фактори впливають на рівновагу при адсорбції?
28. Як впливають у процесі адсорбції природа газу, що поглинається, температура, тиск, наявність конкуруючих домішок, вид адсорбенту?
29. Що таке статична та динамічна активність адсорбенту?
30. Які застосовуються адсорбенти, які вимоги пред'являються до адсорбентів?
31. Як протікає адсорбція з нерухомим зернистим адсорбентом та як змінюється поле концентрації?

32. У яких природоохоронних технологіях очищення газових викидів використовується адсорбція?
33. Для очищення якихось газових домішок застосовується конденсація і в чому вона полягає ?
34. Які існують термохімічні методи знешкодження газових викидів?
35. Які газові викиди можуть бути знешкоджені термохімічними методами?
36. У чому полягає сутність каталітичного очищення газових викидів?
37. Які чинники впливають на розсіювання домішок у атмосфері?
38. Який характер поширення домішок в атмосфері та в приземному шарі?
39. Які існують стічні води за джерелами їх походження?
40. Які методи використовуються при механічній очистці стічних вод?
41. Які фізико-хімічні методи використовуються для очищення стічних вод?
42. У чому полягає процес коагуляції домішок та її відмінність від флокуляції?
43. Що таке процес флотації і як її використовують для очищення стічних вод?
44. Який механізм процесу флотації домішок зі стічних вод?
45. Які існують способи флотаційного очищення стічних вод?
46. Які існують способи мембранної очистки стічних вод?
47. Чим розрізняються процеси зворотного осмосу та ультрафільтрації?
48. Які чинники впливають на проникність мембран під час очищення стічних вод?
49. У чому полягає сутність іонного обміну?
50. Які вимоги пред'являються до іонітів?
51. Які існують стадії перенесення іонів при іонному обміні?
52. У чому полягає сутність процесу рідинної екстракції?
53. Яким параметром характеризується розподіл видобутої речовини між фазами при екстракції?
54. Які вимоги пред'являються екстрагенту?
55. Які існують способи електрохімічного очищення стічних вод і в чому полягає їхня відмінність?
56. Які способи застосовуються при хімічному очищенні стічних вод?
57. Які способи застосовуються для десорбції та дегазації домішок зі стічних вод?

58. Які речовини зазнають знешкодження при біологічному очищенні стічних вод?
59. Які показники використовуються при біологічному очищенні стічних вод?
60. Що таке активний мул та біоплівка і з чого вони складаються?

РОЗДІЛ 5 ЗАХИСТ ВІД ІОНІЗУЮЧИХ ВИПРОМІНЮВАНЬ

5.1 Захист від альфа-випромінювань

Альфа-частинки мають найменшу з усіх іонізуючих частинок довжину пробігу в речовині, тому захист від зовнішніх потоків цього виду випромінювання не становить великих труднощів. Для вирішення цих завдань зазвичай достатньо знати пробіг частинки в речовині захисного шару, як якого може використовуватись і звичайне повітря.

Більш складною проблемою є захист зовнішнього середовища від забруднень радіоактивними речовинами при роботі з відкритими джерелами, мета якої — запобігання потрапляння радіоактивних речовин усередину організму та подальшого внутрішнього опромінення. Значну роль у вирішенні цього завдання грають засоби індивідуальної захисту (ЗІЗ) органів дихання, травлення та шкірних покривів людини. ЗІЗ зазвичай застосовують, коли безпека роботи не може бути забезпечена конструкцією обладнання, організацією виробничих процесів, засобами колективного захисту.

Для багатоконпонентних середовищ розрахунок пробігів R проводиться за формулою:

$$R = 1 / \sum_{i=1}^m \frac{f_i}{R_i} \quad , \quad (5.1)$$

де R_i - пробіг альфа-частинки в речовині i -ї компоненти, г/см², з масовим вмістом f_i ; $\sum f_i = 1$.

Розрахунки R для біологічної тканини проводяться для густини $\rho = 1$ г/см³. Для інших тканин, щільність яких відмінні від $\rho = 1$ г/см³, розрахунок R можна виконати за формулою (5.1) або з перерахунком за щільністю для подібного складу тканини.

Пробіг у повітрі R_e , см, для альфа-часток, що випускаються природними альфа-випромінюючими нуклідами ($E_0=4\div 7$ МеВ), можна розрахувати за таким співвідношенням :

$$R_e = 0,318 \cdot E_0^{3/2} \quad , \quad (5.2)$$

де E_0 - Енергія альфа-часток, МеВ.

Для інших середовищ, відмінних від повітря, пробіг альфа-часток R_x для середовищ з атомною масою A_x і щільністю ρ_x для $E_0=4\div 7$ МеВ можна розрахувати за формулами

$$R_x = \frac{10^{-4} \sqrt{A_x E_0^3}}{\rho_x}$$

$$R_x = \frac{1,78 \cdot 10^{-4}}{\rho_x} \sqrt[3]{A_x} \sqrt{E_0^3}, \quad (5.3)$$

де E_0 виражена в МеВ; ρ_x - в г/см³.

З формул (5.2)-(5.3) видно, що проникаюча здатність цих частинок невелика. Проте за енергії $E_0 > 7,5$ МеВ пробіг альфа-частинок у біологічній тканині може перевищувати товщину шару епідермісу шкіри (70 мкм) та опромінювати чутливі клітини базального шару.

Для захисту організму від зовнішніх потоків альфавипромінювання досить тонких захисних екранів. Шар повітря товщиною близько 5,6 см повністю поглинає альфа-частинки з енергією 7 МеВ. Для захисту рук від зовнішнього - із запасом достатньо хірургічних рукавичок.

5.2 Захист від електронного випромінювання

Захист під час роботи з джерелами бета-випромінювання повинен передбачати: захист безпосередньо від бета-частинок та захист від гальмівного випромінювання, що виникає при гальмуванні бета-частинок у джерелі та у захисному екрані.

Розрахунок захисту власне від бета-частинок не містить великих складнощів у зв'язку зі своїми невеликими пробігами серед.

Проникаюча здатність електронів або бета-частинок визначається пробігом. Розрізняють три види пробігів електронів у речовині : середній R , максимальний $R_{\text{макс}}$ та екстрапольований (або практичний) $R_{\text{екс}}$. Максимальний пробіг моноенергетичних електронів – мінімальна товщина шару речовини, при якій жоден з електронів, що падають нормально на шар, з нього не вилітає. Середній пробіг (або просто пробіг) електронів у речовині визначається зазвичай у моделі безперервного уповільнення по формулі

$$\bar{R}(E_0) = \int_0^{E_0} \frac{dE}{(dE/dx)} \quad , \quad (5.4)$$

де dE/dx - повні втрати енергії електрона.

Зауважимо, що середній пробіг у середовищах з великими Z не досить повно відображає фізику процесів перенесення електронів.

Для бета-частинок крива поглинання має форму, близьку до експоненційної, та асимптотично наближається до осі абсцис,

перетинаючи її при деякій товщині R , яка характеризується максимальним пробігом бета-частинок з граничною енергією E_β .

Для середовища товщиною менше максимального пробігу ослаблення щільності потоку бета-частинок приблизно слідує експоненційному закону

$$\varphi = \varphi_0 \exp(-\mu_m d) \quad (5.5)$$

де d - товщина поглиначка, г/см²; μ_m - масовий коефіцієнт поглинання електронів, см²/г. Залежність μ_m , см²/г, від максимальної енергії бета-частинок E_β , МеВ, можна наближено апроксимувати формулою

$$\mu \approx 15,5 E_\beta^{-1,41} \approx 17 E_\beta^{-1,43} \approx 22 E_\beta^{-1,33} \quad (5.6)$$

Наведемо деякі корисні рекомендації та формули для розрахунків пробігів:

1. Максимальний пробіг моноенергетичних електронів або бета-частинок можна прийняти рівним збільшеному на 30% екстраполірованому пробігу моноенергетичних електронів або електронів з максимальною енергією у спектрі бетачастинок відповідно. Таке значення дасть верхню оцінку максимального пробігу.

2. Екстраполірований пробіг $R_{екс}$, г/см², моноенергетичних електронів у діапазоні енергій від 0,3 кеВ до 30 МеВ для матеріалів з атомними номерами від 5,3 (ефективний атомний номер для поліетилену) до 82 при нормальному падінні може бути визначено за формулою

$$R_{екс} = a_1 \left[\frac{1}{a_2} \ln(1 + a_2 \alpha_0) - \frac{a_3 \alpha_0}{(1 + a_4 a_5 \alpha_0)} \right] \quad (5.7)$$

де E_0/m_0c^2 (E_0 - енергія електрона, МеВ; m_0c^2 - енергія спокою електрону; $m_0c^2 = 0,511$ МеВ); $a_1 = 0,2335MZ - 1,209$; $a_2 = 1,78 \cdot 10^{-4}Z$; $a_3 = 0,98910^{-3}, 01 \cdot 10^{-4}Z$; $a_4 = 1,468 - 1,180 \cdot 10^{-2}Z$; $a_5 = 1,232Z - 0,109Z$ (M - атомна маса, Z - атомний номер). Максимальна похибка апроксимуючого співвідношення для $E_0 > 1$ МеВ 4,5%, для $E_0 < 1$ МеВ 8,4%.

5.3 Захист від гальмівного випромінювання нуклідів

Для точкових ізотропних радіонуклідів, що випускають бета-частки та (або) моноенергетичні електрони конверсії, рекомендується наступна послідовність розрахунків: а) визначають вихід гальмівного

випромінювання на 1 розпад ядра; б) визначають у точці детектування на заданій відстані від джерела еквівалентної потужності гальмівного випромінювання бета-часток \dot{H}_β та (або) електронів конверсії \dot{H}_c ; в) визначають потрібну кратність ослаблення випромінювання захистом:

$$k = \frac{\dot{H}_\beta + \dot{H}_c}{\text{ДМД}}, \quad (5.8)$$

де ДМД - гранично допустима потужність еквівалентної дози у точці детектування; г) якщо $k > 1$, розраховують за універсальними таблицями методом конкуруючих ліній необхідну товщину захисту.

Для оцінок з достатньою для практичних завдань точністю розрахунки потужності еквівалентної дози та визначення товщини захисту за універсальними таблицями можна проводити для ефективної енергії фотонів гальмівного випромінювання E_{ef} . Під ефективною енергією розуміється енергія фотонів такого моно енергетичного фотонного випромінювання, щодо ослаблення якого в поглиначі певного складу та певної товщини таке ж, як у проаналізованого немонеенергетичного фотонного випромінювання, в разі — гальмівного випромінювання. Для задачі, що наразі розглядається, E_{ef} можна приймати такою, що дорівнює половині максимальної енергії бетачастинок.

Енергія гальмівного випромінювання для нуклідів зазвичай нижче порога реакції (γ, n) , тому захист від фотонейтронів є неактуальним.

5.4 Захист від фотонного випромінювання

При проходженні гамма-випромінювання через речовину створюється широкий пучок випромінювання, що складається з розсіяного та нерозсіяного випромінювань. Інтенсивність широкого пучка виражається формулою ([4]):

$$\varphi_w = \varphi_{w_0} \exp(-\mu x) B^e(E_\gamma, Z, \mu x), \quad (5.9)$$

де $B^e(E_\gamma, Z, \mu x) \geq 1$ — енергетичний фактор накопичення, враховує внесок розсіяного випромінювання.

Якщо виміряти детектором інтенсивність випромінювання в умовах вузького та широкого пучків за однакових значеннях параметрів E_γ , Z , μx , то показання детектора в умовах широкого пучка буде більше, ніж в умовах вузького пучка. Чинник накопичення залежить від енергії гамма-

випромінювання, атомного номера та товщини захисного матеріалу, розташування джерела та детектора по відношенню до захисту, геометрії та компонування захисту.

Чинник накопичення може відноситися до різних вимірюваних параметрів гамма-випромінювання: числу фотонів (числовий фактор нагромадження); інтенсивності випромінювання (енергетичний фактор накопичення); експозиційної дози випромінювання (дозовий фактор накопичення) та поглиненої дози випромінювання (фактор накопичення поглиненої енергії).

Числові значення факторів накопичення можуть бути отримані шляхом вирішення інтегро-диференціального рівняння перенесення для точкового ізотропного та плоского моноспрямованого джерел для нескінченного гомогенного середовища при різних параметрах E_γ, Z, μ_x .

При розгляді впливу розсіяного випромінювання залежно від протяжності поглинаючого середовища, відносно якого розташовуються джерело та детектор, можливі наступні різні варіанти:

1) джерело і детектор містяться в нескінченному поглинаючому та розсіюючому середовищі (фактор накопичення B_∞);

2) джерело знаходиться в нескінченному поглинаючому та розсіюючому середовищі, а детектор - поза ним і навпаки, геометрія є напівнескінченною (фактор накопичення $B_{1/2\infty}$);

3) джерело і детектор розділені захисною поглинаючим і розсіюючим середовищем з нескінченними поперечними розмірами, бар'єрна геометрія – найпоширеніший випадок (фактор накопичення);

4) джерело і детектор розділені захисним поглинаючим і розсіюючим середовищем з кінцевими поперечними розмірами, обмежена геометрія – обмежені бар'єрні середовища, тіньовий захист та ін. (фактор накопичення B_0).

При розрахунку параметрів захисту в умовах бар'єрної геометрії зручно користуватися корегуючими коефіцієнтами, що представляють відношення дозового фактора накопичення в бар'єрної геометрії до дозового фактору накопичення в середовищі для точкового ізотропного джерела, тобто

$$\delta_D(E_\gamma, Z) = \frac{B_0^D(E_\gamma, Z, \mu_x)}{B_\infty^D(E_\gamma, Z, \mu_x)}, \quad (5.10)$$

або відношення енергетичного фактору накопичення в бар'єрної геометрії до енергетичного фактору накопичення в нескінченному середовищі для плоского моноспрямованого джерела, тобто.

$$\delta_{\varnothing}(E_{\gamma}, Z) = \frac{B_{\varnothing}^{\varnothing}(E_{\gamma}, Z, \mu x)}{B_{\infty}^{\varnothing}(E_{\gamma}, Z, \mu x)} \quad (5.11)$$

Тоді рівняння (5.9) при врахуванні фактору накопичення та поправочного коефіцієнта для бар'єрної геометрії може бути записане у наступному вигляді:

$$\varphi_w = \varphi_{w_0} B_{\infty}^{\varnothing}(E_{\gamma}, Z, \mu x) \exp(-\mu x) \delta_{\varnothing}(E_{\gamma}, Z) \quad (5.12)$$

Приведемо корисний зв'язок дозового фактора накопичення у нескінченному середовищі, $B_{\infty}^D(E_{\gamma}, Z, \mu x)$ і фазового фактору накопичення для бар'єрної геометрії,

$$B_{\varnothing}^D(E_{\gamma}, Z, \mu x) = \delta_D(E_{\gamma}, Z) B_{\infty}^D(E_{\gamma}, Z, \mu x) \quad (5.13)$$

Коефіцієнта $\delta_D(E_{\gamma}, Z)$ для точкового ізотропного джерела наведені у відповідній довідковій літературі.

5.5 Розрахунок захисту за кратністю ослаблення експозиційної дози, потужності експозиційної дози та за заданою активністю

При розрахунку захисту від гамма-випромінювання зручно користуватися універсальним, розрахованим на основі теорії ослаблення в матеріалах широких пучків гамма-випромінювання від точкових джерел. Зокрема, вводяться деякі позначення: k - коефіцієнт ослаблення гамма-випромінювання, відношення вимірної або розрахованої експозиційної дози X (потужності дози X) без захисту до гранично допустимої експозиційної дози X в тій же точці за захисним екраном товщиною x , де k визначається за формулою

$$k(E_{\gamma}) = \frac{X}{X_{\text{ПДД}_A}} = \frac{\dot{X}}{\dot{X}_{\text{ПДД}_A}} \quad (5.14)$$

При визначенні необхідної товщини екранування матеріалу x , см, за допомогою універсальних таблиць, необхідно знати енергію гамма-випромінювання E_{γ} , MeV і коефіцієнт ослаблення k . Розглянемо типову роботу з розрахунку захисту від гамма-випромінювання (без урахування

зміни коефіцієнта накопичення при взаємному розташуванні джерело-екран-детектор).

5.6 Захист від плоских та точкових ізотропних джерел з використанням методу послаблюючого шару

Шар послаблення $\Delta_{1/k}$ показує товщину екранування, яка зменшує дозу випромінювання (густину потоку енергії, густину потоку частинок тощо) в k разів. Найчастіше в розрахунках використовується шар з періодом напіврозпаду $\Delta_{1/2}$ і однією десятою ослаблення. Товщина екрану $\Delta_{1/2}$ відповідає коефіцієнту ослаблення випромінювання 2, а товщина екрану $\Delta_{1/10}$ відповідає коефіцієнту послаблення випромінювання 10. Якщо для розрахунку екранування використовується шар з періодом напіврозпаду $\Delta_{1/2}$, то необхідну кількість шарів з періодом напіврозпаду n для необхідного коефіцієнта ослаблення випромінювання k можна знайти за формулою

$$k = 2^n \quad (5.15)$$

Товщина екрануючого шару тоді визначається за формулою

$$d \approx \Delta_{1/2} n \quad (5.16)$$

Цей метод розрахунку, який часто використовується для оцінки екранування, є наближеним, оскільки значення $\Delta_{1/2}$ у широкопроменевій геометрії змінюється залежно від енергії джерела, матеріалу і товщини екранування (див. рис.5.1).

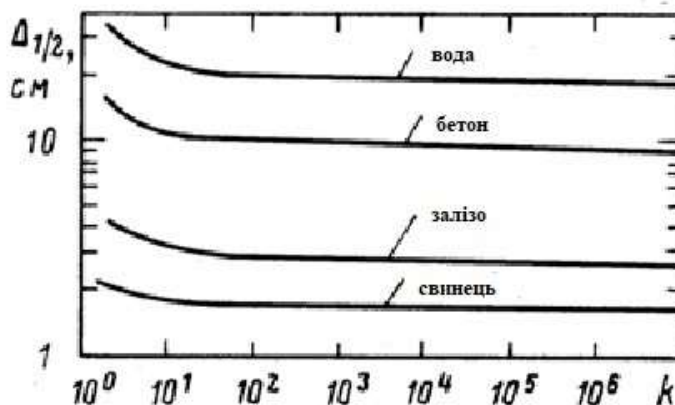


Рисунок 5.1 -Залежність величини напівзагасної кулі екранами з різних матеріалів (нескінченна геометрія) від коефіцієнта ослаблення випромінювання (в перерахунку на поглинену дозу в повітрі) для точкових ізотропних джерел фотонів з енергією $E_0 = 3 \text{ MeV}$

Розрахунок можна виконати з хорошою точністю, якщо врахувати зміну величини шару ослаблення з товщиною екранування. Зручно розглянути зміну величини шару ослаблення з товщиною екранування для $k \leq 103$, використовуючи значення шару ослаблення $1/10$, $1/100$ і $1/1000$. Починаючи з товщини екранування, що відповідає коефіцієнту загасання $k > 103$, слід мати на увазі, що величина десяткового шару загасання практично не залежить від товщини середовища і може вважатися постійною і дорівнювати асимптотичному значенню $\Delta_{1/10}$. Для $k = 1 - 10m$ ($1 \leq l \leq 10$, де m - натуральне число) товщину екранування можна з достатньою точністю розрахувати за допомогою наступного рівняння:

$$\begin{aligned} \text{при } m = 0 \quad d &= \Delta_{1/10} \xi, \\ \text{при } m = 1 \quad d &= \Delta_{1/10} + (\Delta_{1/100} - \Delta_{1/10}) \xi, \\ \text{при } m = 2 \quad d &= \Delta_{1/100} + (\Delta_{1/1000} - \Delta_{1/100}) \xi, \\ \text{при } m \geq 3 \quad d &= \Delta_{1/1000} + \Delta_{1/10} (m-3) + \Delta_{1/10} \xi \end{aligned} \quad , (5.17)$$

де ξ - коефіцієнт, що пов'язує шар $\Delta_{1/10}$ з шаром $\Delta_{1/l}$, а $\Delta_{1/l} = \Delta_{1/10} \xi$.

5.7 Метод конкуруючих ліній для розрахунку захисту від немоноенергетичних джерел

Метод конкуруючих ліній зводить розрахунки захисту для немоноенергетичних джерел для розрахунку захисту від моноенергетичних джерел, наприклад по універсальним таблицям або за шарами ослаблення.

Рекомендується наступна послідовність розрахунків методом конкуруючих ліній для немоноенергетичних джерел, що випромінюють m енергетичних груп фотонів з енергією i -ї групи E_{0i} та вкладом фотонів i -ї групи у дозу або керма-еквівалент $p_i (\sum p_i = 1)$:

1. Визначають необхідну кратність послаблення випромінювання джерела захистом k .
2. Розраховують парціальну кратність ослаблення фотонів i -ї енергетичної групи

$$k_i = k p_i \quad (5.18)$$

3. Для кожної енергії фотонів E_{0i} та k_i за універсальними таблицям або за шарами ослаблення визначають необхідну товщину захисту d_i . Енергію фотонів, що потребує найбільшої товщини захисту d_r називають головною лінією спектра. Енергію фотонів, яка є наступною за величиною після головної лінії товщину захисту d_k називають конкуруючою лінією.

4. Остаточну товщину визначають наступним чином:

$$\begin{aligned} d &= d_r + \Delta_{1/2}, \text{ если } (d_r - d_k) = 0; \\ d &= d_k + \Delta_{1/2}, \text{ если } 0 < (d_r - d_k) < \Delta_{1/2} \\ d &= d_r, \text{ если } (d_r - d_k) > \Delta_{1/2} \end{aligned} \quad (5.19)$$

де $\Delta_{1/2}$ - найбільше значення із шарів половинного ослаблення для головної та конкуруючої ліній для подвоєних кратностей ослаблення за максимальної енергії фотонів (визначається, наприклад, за універсальними таблицям для товщини захисту d_r та d_k відповідно).

Особливо слід зазначити, що у конкретній задачі головні та конкуруючі лінії часто змінюються в залежності від товщини захисту, пропорційної кратності ослаблення.

Для деяких типів завдань при розрахунку захисту від гамма випромінювання необхідно враховувати розміри та конфігурації джерел.

5.8 Захист від рентгенівського випромінювання

Одна з основних характеристик рентгенівського генератора випромінювання (рентгенівської трубки) - радіаційний вихід (замість терміну "радіаційний вихід" використовується також термін "променева віддача" рентгенівської трубки) [1].

Радіаційний вихід D_T — потужність поглиненої дози в повітрі, що створюється на відстані 1 м від анода рентгенівської трубки за силою струму 1 мА (рис.5.2).

Радіаційний вихід залежить насамперед від напруги, струму трубки, фільтрації пучка. Радіаційний вихід залежить також від конструкції трубки, матеріалу мішені, геометрії опромінення. Тому, якщо можливо, радіаційний вихід краще визначати для кожної конкретної трубки (установки).

Захист із свинцю від широкого пучка рентгенівського випромінювання можна розрахувати за допомогою номограм (рис.5.3а,б). Параметром номограм є коефіцієнт

$$k_1 = 2,5 \frac{D_T}{D_{T_0}} m \frac{i}{R^2} \quad (5.20)$$

де D_T — радіаційний вихід конкретної рентгенівської трубки, для якої визначається задача захисту; D_{T_0} — радіаційний вихід деякої стандартної рентгенівської трубки, визначається з рис. 5.2.

Зауважимо, що D_T і D_{T_0} виражаються в одних і тих же одиницях; m - відношення проектної гранично допустимої потужності еквівалентної дози для приміщень постійного перебування персоналу категорії А при 36-годинному робочому тижні до проектної потужності еквівалентної дози для даної конкретної задачі при t годинній роботі протягом тижня; i - сила струму в рентгенівській трубці, мА; R - відстань від анода трубки до робочого місця, м.

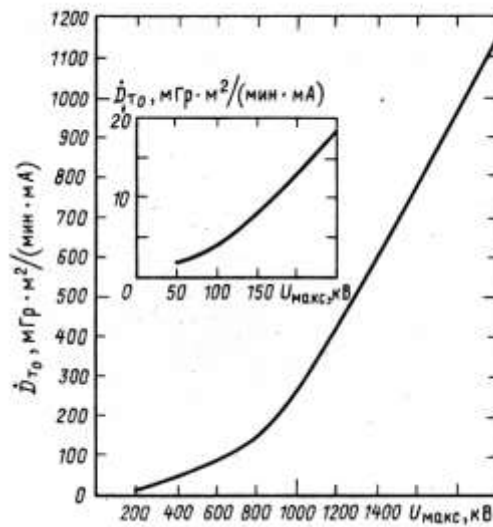


Рисунок 5.2 -Радіаційний вихід рентгенівських трубок в залежності від напруги на трубці (ці дані прийняті за стандартну величину при побудові номограм)

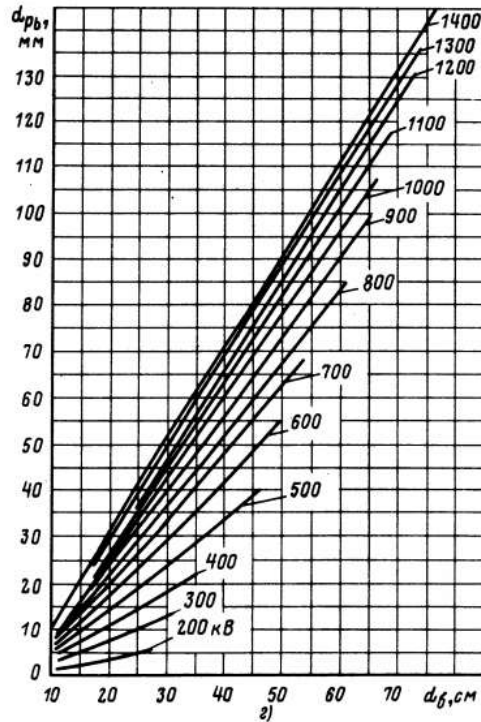
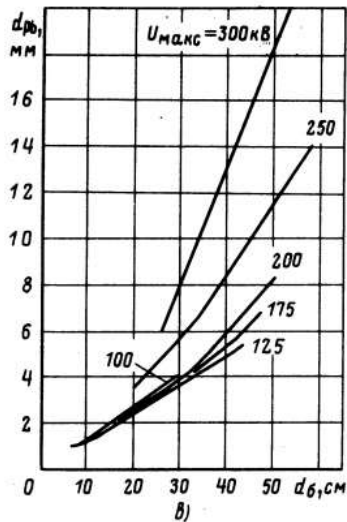
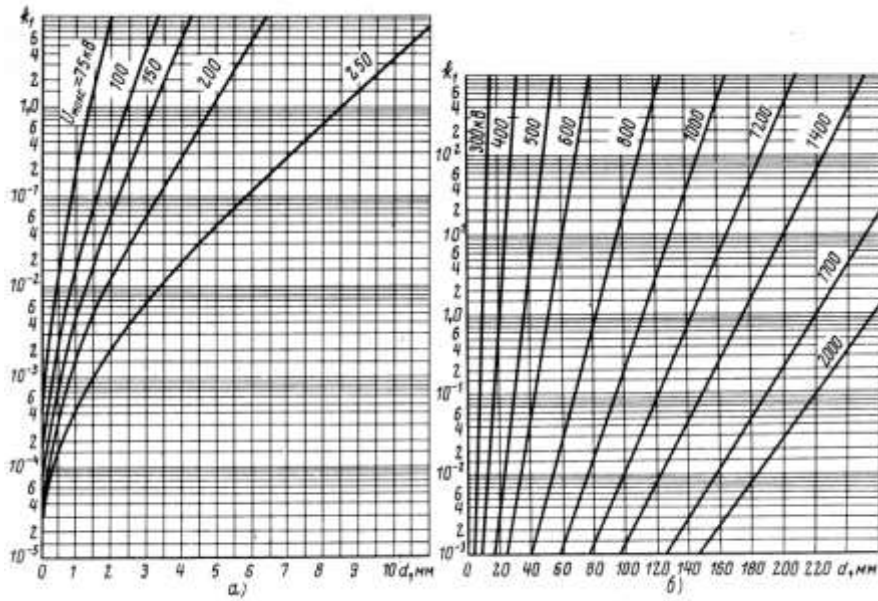


Рисунок 5.3 -Номограма для розрахунку захисту зі свинцю d від рентгенівського випромінювання при різних значеннях максимальної напруги на рентгенівській трубці $U_{\text{макс}}$ (а, б) та відношення між еквівалентною товщиною свинцю та бетону ($\rho = 2,35 \text{ г/см}^3$) для рентгенівського випромінювання різної енергії (в, г)

Якщо величина D_T для використовуваної трубки невідома, можна спробувати підібрати цю величину за допомогою даних, наведених на рис. 5.4.

Якщо це не вдається зробити, то з деякою похибкою для оцінок захисту можна прийняти $D_T = D_{T_0}$. Для 36-годинного робочого тижня при $D_T = D_{T_0}$ і $m=1$ формула (5.21) набуває дуже простого вигляду:

$$k_1 = 2,5i/R^2 \quad (5.21)$$

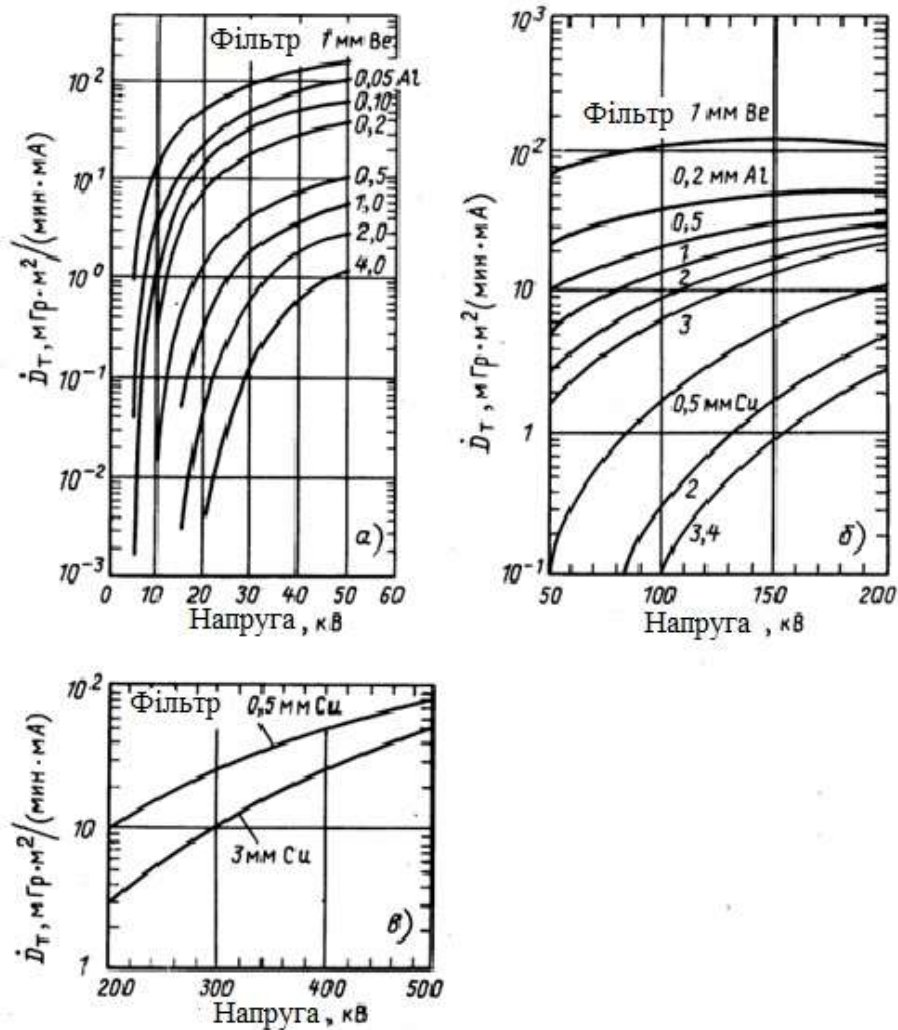


Рисунок 5.4 -Радіаційний вихід рентгенівського випромінювання в залежності від напруги на трубках з вольфрамовою мішенню з вікном трубки з берилію завтовшки 1мм після різних фільтрів (а), з вольфрамовою мішенню з перерізом трубки з берилію завтовшки 1 мм після різних фільтрів (б), з вольфрамовою мішенню після фільтру з міді. На рис. 5.4 наведені дані з радіаційного виходу при відстані від мішені 10 см

Зауважимо, що при використанні даних, наведених на рис. 5.2 -5.4 на більших відстанях, ніж наведені на них, необхідно, строго кажучи,

враховувати ослаблення випромінювання у повітрі, особливо при низьких напругах.

Зазначимо, що захист слід розраховувати виходячи з номінальних значень струму та напруги рентгенівської трубки.

Товщину захисту з бетону ($\rho = 2,35 \text{ г/см}^3$) можна оцінити, за зазначеною вище методикою оцінки товщини захисту із свинцю з використанням даних рис. 5.3.

Якщо щільність використовуваного будівельного матеріалу (цегли, бетону) не дорівнює $2,35 \text{ г/см}^3$, то знайдене значення товщини захисного шару бетону слід помножити на $2,35/\rho$, де ρ - щільність використовуваного матеріалу, г/см^3 .

5.9 Захист від нейронного випромінювання

При розгляді розрахунку захисту від нейронного випромінювання слід враховувати процеси взаємодії нейтронів з речовиною середовища:

1. Захист від нейронного випромінювання ґрунтується на поглинання теплових нейтронів. Швидкі нейтрони повинні бути спочатку уповільнені.
2. Нейтрони з енергією понад $0,5 \text{ MeV}$ розсіюються на ядрах поглинаючого середовища, відчуваючи непружні зіткнення з виходом менших нейтронів енергії. При цьому ядра переходять у збуджений стан і повертаються до основний стан, випускаючи гамма-випромінювання та (або) бетачастинки.
3. Нейтрони, що мають енергію до $0,5 \text{ MeV}$, відчувають здебільшого пружне розсіювання. Внаслідок непружного розсіювання нейтрони сповільнюються до теплових і приходять у теплову рівновагу з навколишнім середовищем. Теплові нейтрони, дифузуючи в системі захисту, можуть або вийти за її межі або бути поглинені. При цьому виникає захоплююче гамма-випромінювання, яке необхідно враховувати під час розрахунку захисту.
4. Під дією нейронного опромінення багато матеріалів активуються. Це слід враховувати під час вибору захисту.

Ослаблення вузького моноенергетичного пучка швидких нейтронів відбувається за експоненціальним законом:

$$\varphi_x = \varphi \cdot \exp(-\Sigma_t x), \quad (5.22)$$

де φ_x - щільність потоку нейтронів, після ослаблення захисту товщиною x ; φ - щільність потоку без захисту; Σ_t - повний макроскопічний переріз

захисного матеріалу; $\Sigma_t = \sigma_t n_A$ (n_A - число ядер, що знаходяться в 1 см^3 поглинаючої речовини, $n_A = \rho \cdot 6,023 \cdot 10^{23} / A$). Для складного захисту

$$\Sigma_t = \sigma_1 n_{A_1} + \sigma_2 n_{A_2} + \dots \quad (5.23)$$

де σ_1, σ_2 - мікроскопічні перерізи окремих елементів, що входять до складу складної речовини, см^2 ; n_{A_1}, n_{A_2} - числа ядер окремих елементів, що знаходяться в 1 см^3 речовини.

Ослаблення щільності потоку нейтронів (формула (5.23)) залежно від товщини захисту x та довжини релаксації нейтронів $\lambda = 1/\Sigma$ може бути визначено за формулою

$$\varphi_x = \varphi \cdot \exp(-x/\lambda) \quad (5.24)$$

Форма кривої ослаблення (на початковій ділянці від джерела в 2-3 довжини релаксації) може відрізнятись від експонентної форми. Ця відмінність враховується запровадженням коефіцієнта f . Щільність потоку нейтронів від моноенергетичного точкового ізотропного джерела за захистом завтовшки x (захист знаходиться між джерелом та детектором) буде дорівнювати

$$\varphi_x = \frac{Ff}{4\pi r^2} \exp(-\Sigma x) \quad , \quad (5.25)$$

де F - Потік нейтронів, нейтр./с для джерел нейтронів спектра поділу f_1 .

Під час розрахунку захисту від швидких нейтронів можна використовувати величину шару половинного та десятикратного ослаблення

$$\begin{aligned} \Delta_{1/2} &= 0,693/\Sigma \\ \Delta_{1/10} &= 2,303/\Sigma \end{aligned} \quad (5.26)$$

Знаючи кратність ослаблення (відношення будь-якого параметра, наприклад, щільності потоку без захисту, аналогічній величині із захистом)

$$k = \varphi / \varphi_x = \exp(\Sigma x) = 2^n \cdot 10^{n'} \quad (5.27)$$

можна знайти товщину захисного шару

$$x = n\Delta_{1/2} + n'\Delta_{1/10} \quad (5.28)$$

Для розрахунку водного захисту від (α, n) – джерел нейтронів можна використовувати номограми, як це показано нижче.

5.10 Номограми для розрахунку водного захисту від нейтронів (α, n) -джерел

У цьому параграфі наведено номограми трьох типів для розрахунку (за максимальною еквівалентною дозою) захисту від нейтронів найбільш широко використовуваних лабораторних (α, n) -джерел: Po- α -Be, Ra- α -Be, Pu- α -Be, Po- α -В .

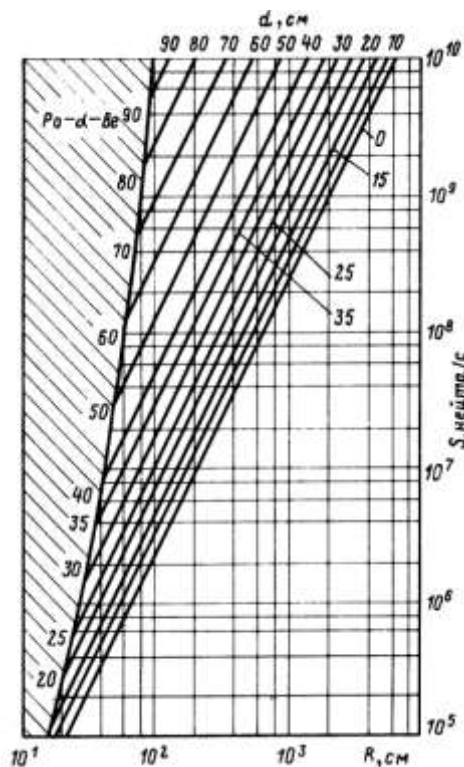


Рисунок 5.4 - Номограма першого типу для розрахунку захисту від нейтронів (Po- α -Be)

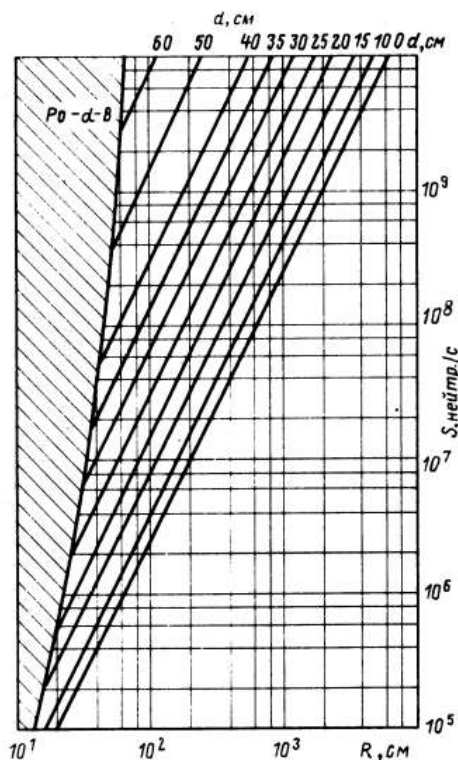


Рисунок 5.5 - Номограма першого типу для розрахунку захисту від нейтронів (Po- α - β)

Номограми побудовані за даними просторово-енергетичного розподілу нейтронів у нескінченному водному середовищі від точкових моноенергетичних джерел.

Розраховані за допомогою методу моментів. Оцінки показують, що для бар'єрних захистів очікується зменшення повної дози на границі порівняно з розрахунками за номограмами приблизно 25-50 %.

Номограми першого типу (рис.5.5, 5.6) пов'язують потужність джерела S відстань від джерела до точки детектування R і товщину водного захисту d . Номограми збудовані для часу опромінення 36 год/тиждень та гранично допустимої дози для персоналу (категорія опромінення А) $1 \text{ м}^3/\text{тиждень}$.

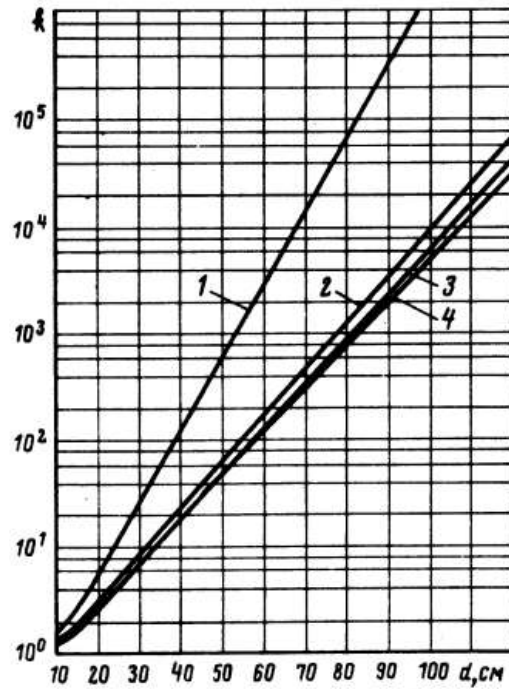


Рисунок 5.6 - Номограма другого типу для розрахунку захисту за кратності ослаблення водою для джерел: 1 – Po- α -Be; 2 -Ra- α -Be; 3 - Po- α -Be; 4 -Pu- α -Be

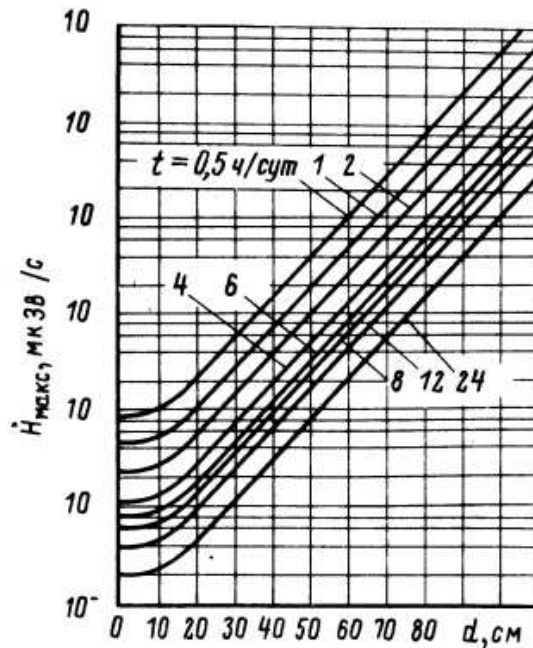


Рисунок 5.7 - Номограма третього типу для розрахунку захисту від нейтронів (Po- α -Be)-джерела залежно від потужності максимальної еквівалентної дози $H_{\text{макс}}$ та часу опромінення t , ч/сут, при шестиденному робочому тижні

Номограми другого типу показують залежність (рис.5.6) кратності ослаблення k від товщини водного захисту для різних джерел нейтронів.

Номограми третього типу (рисунки 5.7 і 5.8) пов'язують між собою виміряну або розраховану потужність максимальної еквівалентної дози, час опромінення та товщину захисту. Номограми побудовані для гранично допустимої дози для персоналу. Номограми першого та третього типів для (Po- α -Be)-джерела можуть бути з достатньою точністю застосовані для (Pu- α -Be)-джерел та з декілька гіршою точністю для (Ra- α -Be)-джерел. Неточність наразі можна оцінити виходячи з номограми другого типу, за якою визначають довжину релаксації нейтронів по дозі (табл.5.1).

Таблиця 5.1 Довжина релаксації нейтрону L при максимальній еквівалентній дозі у воді для різних джерел

Источник	L, см
Po- α -B	6,3
Ra- α -Be	9,8
Po- α -Be	10,3
Pu- α -Be	10,5

У разі розрахунків для гранично допустимих доз, відмінних від умов професіонального опромінення слід вводити фіктивну потужність джерела для номограм першого типу чи фіктивну потужність дози для номограм третього типу.

Значення фіктивних потужностей джерела та потужностей дози повинні відрізнятися від справжніх значень у стільки разів, скільки гранично допустима доза для персоналу відрізняється від прийнятої для цієї задачі гранично допустимої дози.

Аналогічно можна ввести поправку на час роботи, відмінне від прийнятого в розрахунках.

При розрахунку захисту з парафіну слід враховувати, що довжина релаксації в парафіні менша за довжину релаксації в воді в 1,2 рази для (Po- α -B)-джерела та в 1,16 рази для (Po- α -Be)-джерела. При розрахунку захисту нейтронних лабораторних джерел необхідно відомими способами перевіряти придатність обраного захисту та від γ - випромінювання.

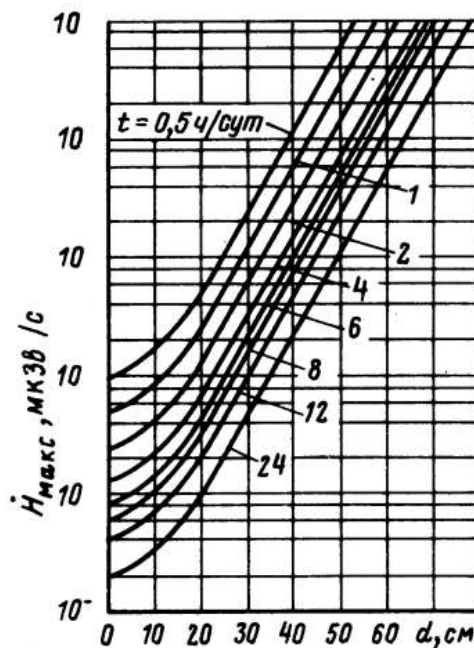


Рисунок 5.8 - Номограма третього типу для розрахунку захисту від нейтронів (Ро- α -В)-джерела в залежності від потужності максимальної еквівалентної дози H_{\max} та часу опромінення t , год/добу, при шестиденному робочому тижні

5.11 Активація матеріалів у полі нейтронного опромінення

Для розрахунку наведеної активності зручно запровадити поняття активаційного інтеграла q , що характеризує швидкість протікання реакції. Віднесений до одного ядра ізотопу мішені активаційний інтеграл

$$q = \int_0^{\infty} \sigma(E) \varphi(E) dE, \quad (5.29)$$

де $\sigma(E)$ - енергетична залежність перерізу активації; $\varphi(E)$ - енергетичний спектр нейтронів.

Об'ємна активність AV ізотопу продукту реакції з постійною розпаду в матеріалі з початковим числом атомів ізотопу мішені в одиниці об'єму n_0 за час опромінення T у стабільному потоці нейтронів через час після закінчення опромінення t у потоці нейтронів з енергетичним спектром $\varphi(E)$, перерізом активації $\sigma(E)$, перетином вигорання ізотопу продукту реакції $\sigma^*(E)$, активаційними інтегралами

$$\begin{aligned} q &= \int_0^{\infty} \sigma(E) \varphi(E) dE \\ q^* &= \int_0^{\infty} \sigma^*(E) \varphi(E) dE \end{aligned} \quad (5.30)$$

визначається за наступними формулами:

а) з урахуванням вигорання ядер ізотопу мішені та ізотопу продукту реакції:

$$A_V = \frac{\lambda n_0 q [1 - e^{(-\lambda + q^* - q)T}]}{\lambda + q^* - q} e^{-qT} e^{-\lambda t} \quad (5.31)$$

б) з урахуванням вигорання ізотопу продукту реакції, нехтуючи вигоранням ядер ізотопу мішені:

$$A_V = \frac{\lambda n_0 q [1 - e^{(-\lambda + q^*)T}]}{\lambda + q^*} e^{-\lambda t} \quad (5.32)$$

в) без урахування процесів вигорання:

$$A_V = n_0 q (1 - e^{-\lambda T}) e^{-\lambda t} \quad (5.33)$$

Якщо активація відбувається лише на теплових нейтронах, то у формулах (5.31) - (5.33)

$$q = \sigma_{т.н} \Phi_{т.н}, \quad q^* = \sigma^*_{т.н} \Phi_{т.н} \quad (5.34)$$

і тоді, наприклад, формула (5.34) запишеться у вигляді

$$A_V = n_0 \sigma_{т.н} \Phi_{т.н} (1 - e^{-\lambda T}) e^{-\lambda t} \quad (5.35)$$

Якщо при цьому n_0 виразити в числі ядер 1 см^3 , $\sigma_{т.н}$ в см^2 , в $1/(\text{см}^2 \cdot \text{с})$, то об'ємну активність A_V визначимо в $\text{Бк}/\text{см}^3$.

Якщо в процесі активації поряд із основним ізотопом (G) з постійною розпаду λ_G утворюється його ізомер (M) з постійної розпаду λ_M , що розпадається з ймовірністю p_M до основного рівня, а активаційні інтеграли для основного і ізомерних станів дорівнюють q_G і q_M відповідно, то об'ємна активність основного ізотопу без урахування процесів вигорання

$$A_{V_G} = n_0 \left(q_G + p_M \frac{\lambda_M}{\lambda_M - \lambda_G} q_M \right) (1 - e^{-\lambda_G T}) e^{-\lambda_G t} - p_M \frac{\lambda_M}{\lambda_M - \lambda_G} n_0 q_M (1 - e^{-\lambda_G T}) e^{-\lambda_G t} \quad (5.36)$$

Якщо $M_T \gg 1$; $T_M \ll T_G$; $\lambda_M \gg \lambda_G$, то співвідношення (5.36) переходить у

$$A_{V_G} = n_0 (q_G + p_M q_M) (1 - e^{-\lambda_G T}) e^{-\lambda_G t} \quad (5.37)$$

Для нестабільного за часом потоку нейтронів можна зазвичай виділити деяке число l часових інтервалів, коли протягом j -го інтервалу T_j щільність потоку ϕ можна вважати стабільною. Тоді повна наведена активність

визначається суперпозицією наведених активностей від кожного j -го інтервалу. Наприклад, у цьому випадку, формула (5.37) набуває вигляду

$$A_{V_g} = n_0 \sum_{i+1}^l q_j (1 - e^{-\lambda T_j}) e^{-\lambda t_j} \quad (5.38)$$

$$q_j = \int_0^{\infty} \sigma(E) \varphi_j(E) dE$$

T_j - час "витримки" після опромінення для j -го інтервалу.

Зауважимо, що у наведених вище формулах число атомів ізотопу мішені в одиниці об'єму n_0 , атом/см³,

$$n_0 = p \rho \frac{N_A}{A} \quad (5.39)$$

де p - відносний вміст ізотопу мішені в хімічний елемент; ρ - щільність матеріалу мішені, г/см³; N_A - Число Авогадро; A - атомна маса ізотопу мішені.

Питому активність A_m можна розрахувати із простого співвідношення

$$A_m = A_V / \rho$$

Наведені формули справедливі, якщо в межах розглянутого активованого об'єму можна знехтувати зміною нейтронного потоку внаслідок поглинання та розсіювання.

5.12 Вторинне гамма-випромінювання у захисних системах

Нагадаємо, що під вторинним розуміється іонізуюче випромінювання, що виникає внаслідок взаємодії первинного випромінювання з аналізованим середовищем.

Одним з найбільш проникливих видів вторинного випромінювання є вторинне гамма-випромінювання в захисті, супроводжує захоплення та непружне розсіювання нейтронів на ядрах ізотопів конструкційних, будівельних матеріалів та матеріалів біологічного захисту.

Потоки нейтронів у захисті ядерно-технічних пристроїв можуть створювати високу щільність джерел вторинного гамма-випромінювання. Тому в ряді випадків радіаційна обстановка за захистом ядерно-технічних елементів цілком визначається вторинним гамма-випромінюванням.

Завдання визначення поля вторинного гамма-випромінювання в середовищі зводиться до інтегрування вкладів у поле випромінювання в даній точці детектування, обумовлених вторинними фотонами, що утворюються в актах взаємодії з нейтронами у всьому обсязі захисту. Вирішення таких завдань наводиться, наприклад, у роботі .

На закінчення відзначимо деякі важливі закономірності формування вторинного гамма-випромінювання у середовищах:

1. У легких середовищах відношення $N_{\text{макс}} / N_{\text{макс,п}}$ зростає із n збільшенням товщини середовища d , проходить при деякому d_0 через 1 і з подальшим зростанням d стає більше 1. Масштаб d_0 для нейтронів спектра поділу при вимірюванні дозових характеристик дорівнює 36 см для води, 50 см для водню, 67 см для гідриду літію, 54 см для збагаченої бором води з масовим вмістом бору 1%.
2. Для важких речовин $N_{\text{макс}} / N_{\text{макс,п}}$ з товщиною захисту d змінюється слабо (значно слабше, ніж у легких середовищах).
3. Відношення $N_{\text{макс}} / N_{\text{макс,п}}$,, як функція товщини захисту практично не залежить від кутового розподілу нейтронів а вході захисту для широкого класу азимутально-симетричних кутових розподілів джерел випромінювання нейтронів[9].
4. Гамма-випромінювання, що супроводжує непружне розсіювання нейтронів на ядрах, зазвичай суттєво впливає на характеристики поля вторинного гамма-випромінювання, коли на вході маємо досить жорсткий спектр нейтронів.
5. Завдання розрахунку спектру гамма-випромінювання, що генерується при радіаційному захопленні, яке не залежить від енергії нейтронів, що захоплюються, може призводити до похибок залежності $N_{\text{макс}} / N_{\text{макс,п}}$ від d до 30-40 % .
6. До суттєвих похибок у розрахунках може приводити неврахування вкладу в поле вторинного гамма-випромінювання ізотопів домішок з великими перерізами захоплення, особливо для матеріалів, що мають, подібно до свинцю, невеликі перерізи радіаційного захоплення.
7. Найкращими з точки зору досягнення мінімуму виходу вторинного гамма-випромінювання є середовища, що складаються з суміші легких та важких речовин.
8. Для зниження виходу захватного гамма-випромінювання можна використовувати гомогенне або гетерогенне борування середовища.

РОЗДІЛ 6 ЗАХИСТ ВІД ВПЛИВУ ВІБРАЦІЙ

Існує значна кількість шкідливих і небезпечних факторів, які впливають на людину, з деякими з них вона стикається щодня. До таких факторів належать віброакустичні фактори, зокрема вібрація [17,18]. Робота сучасних машин та обладнання супроводжується значними рівнями віброакустичних факторів. Джерелами вібрації в житлових і громадських будівлях є інженерне та санітарно-технічне обладнання, а також промислове обладнання і транспорт (неглибоке залягання метрополітену, важкі вантажні автомобілі, залізничний транспорт і трамваї), які генерують значні динамічні навантаження під час роботи і спричиняють поширення вібрації на ґрунт і будівельні конструкції. Вібрації також часто є джерелом шуму в приміщеннях. Таким чином, оскільки ми часто стикаємося з вібраціями на робочому місці, у виробничих приміщеннях, на транспорті (автомобілі, поїзди, метро тощо) та в побуті, необхідно розуміти особливості їх шкідливого впливу на організм людини, методи та засоби захисту. З точки зору охорони праці, віброакустичні фактори, зокрема вібрація, є одними з найпоширеніших небезпечних виробничих факторів. Вона посідає друге і третє місце серед професійних захворювань. У повсякденному житті понад 30% населення великих міст живуть в умовах віброакустичного дискомфорту. Тому необхідно посилити експертизу відповідних розділів проектної документації на будівництво або реконструкцію об'єктів, з метою перевірки достатності передбачених заходів віброзахисту та забезпечення дотримання вимог гігієнічних нормативів щодо допустимого вібраційного впливу. Питання вібрації пов'язані з питаннями шуму, але вібраційні ефекти також можуть бути викликані причинами, відмінними від шуму, і спосіб поширення вібрації (і, отже, боротьба з нею) може відрізнитися від способу боротьби з шумом. З цієї причини вирішення проблеми захисту від шкідливого впливу вібрації повинно регулюватися незалежно.

6.1 Класифікація вібрацій

Вібрація - це вид механічних коливань, який викликається передачею механічної енергії від джерела вібрації до об'єкта. Вібрація - це рух точки або механічної системи, при якому значення хоча б однієї координати поперемінно збільшується або зменшується з часом. Вібрація як фактор

виробничого середовища виникає в різних процесах будівельного виробництва. Вона використовується в різних технічних процесах, таких як вібраційне формування, лиття, пресування, вібраційне свердління, розпушування і вібраційний транспорт. Вібрація пов'язана з роботою стаціонарних і пересувних машин, механізмів і агрегатів, заснованих на обертальному або зворотно-поступальному русі. У міських умовах інтенсивними джерелами вібрації є залізничний міський транспорт (трамваї, метро), залізничний транспорт, інженерне обладнання в будівлях (ліфти, насосне обладнання), системи опалення, каналізації та утилізації відходів. До вібронебезпечного обладнання належать клепальні, рубальні, відбійні молотки, бетоноломи, трамбовки, вібратори, дрилі, шліфувальні машини та електропилки. Вплив вібрації посилюється інтенсивним шумом, що створюється цими машинами.

Вплив вібрації на організм людини можна класифікувати наступним чином:

- за способом передачі вібрації;
- за джерелом вібрації;
- за напрямком дії вібрації;
- за характером спектру;
- за частотним складом.

Загальна вібрація передається на тіло людини через опорну поверхню. Загальна вібрація характеризується передачею через опорну поверхню на ноги (стоячи), стопи, сідниці, спину (сидячи) і все тіло (сплячи) і може спостерігатися, наприклад, поблизу транспортних засобів, будівель і працюючого обладнання. Вібрації вимірюються в напрямку осей системи координат з центром в точці, де тіло людини контактує з віброуючою поверхнею. У базовій центрованій системі координат ступінь комфорту сидячої людини вимірюється в шести напрямках (три напрямки поступальної вібрації: осі x , y і z і три напрямки кутової вібрації: r_x , r_y і r_z) для загальних вібрацій в діапазоні частот від 0, 5 до 80 Гц, що діють на подушку сидіння, поступальної вібрації (x , y , вісь z) на спинку сидіння і поверхню опори для ніг, вісь z), а також вібрації підошов ніг сидячої людини. Для комфорту в положенні стоячи і лежачи враховуються поступальні вібрації в трьох напрямках (вісь x , y і z) на поверхні основної опори. Локальні коливання це такі, що передаються через руку людини.

Локальну вібрацію необхідно вимірювати в напрямку осей декартової системи координат. При вимірюванні локальної вібрації

положення базової системи координат визначається об'єктом (наприклад, заготовка, рукоятка інструменту, важіль керуючого пристрою тощо), через який вібрація передається на захоплену руку. Вісь x_h проходить через початок координат, перпендикулярна до осі z_h і спрямована вгору, коли рука знаходиться в анатомічно нормальному положенні (долонею вгору). На практиці часто використовується базова центрована система координат, в якій плоска (y-z) система координат обертається так, щоб вісь y_h була паралельна осі об'єкта, який тримають (наприклад, ручки). Кожну вісь можна вимірювати по черзі, за умови, що від вимірювання до вимірювання використовуються однакові умови експлуатації. Вимірювання слід проводити на поверхні, що коливається, якомога ближче до центру маніпулятора верстата, інструмента або захоплення заготовки. Положення датчика повинно бути фіксованим. Залежно від джерела вібрації можна виділити наступні види вібрації:

- 1) Локальні вібрації, що передаються на тіло людини;
- 2) Ручні механізовані інструменти (моторизовані): від ручного керування машинами та обладнанням;
- 3) Ручні немеханізовані інструменти (моторизовані): наприклад, від виправлення молотків та заготовок різних моделей;
- 4) Загальні вібрації:

- Категорія 1 - це транспорт, що впливає на людей на робочому місці. Сюди відносяться самохідні та буксировані машини, транспортні засоби під час пересування по місцевості, сільськогосподарських угіддях і дорогах (у тому числі під час будівництва). Джерелами транспортної вібрації є трактори, самохідні сільськогосподарські машини (включаючи комбайни), вантажні автомобілі (включаючи тягачі, скрепери, грейдери та котки) і снігоочисники. Два типи вібрації - транспортна та машинна - впливають на людей на робочому місці, коли техніка рухається по спеціально підготовлених поверхнях, таких як виробничі приміщення, промислові майданчики та шахти. Джерелами транспортної та машинної вібрації є екскаватори (включаючи роторні екскаватори), промислові та будівельні крани, шахтні навантажувачі, самохідні екскаваторні візки, бетоноукладальники та машини для настилення підлогових покриттів.

Друга - це технологічна вібрація, яка впливає на людей на робочих місцях біля статичних машин або передається на робочі місця без джерел вібрації. Джерелами технологічної вібрації є метало- та деревообробне обладнання, ковальсько-пресове обладнання, ливарне обладнання, електричні машини,

стаціонарне електрообладнання, насосне обладнання та вентилятори, обладнання для буріння свердловин, бурові установки та обладнання в промисловості будівельних матеріалів (за винятком бетоноукладальників). Зовнішні вібрації створюються в житлових і громадських будівлях (наприклад, міський залізничний і автомобільний транспорт, промислові установки, бетономішалки, дробарки, будівельна техніка). Загальні вібрації можуть мати місце в житлових і громадських будівлях від інженерного обладнання та машин (наприклад, ліфти, вентиляційні системи, насосні системи, пилососи, холодильники, пральні машини), а також зсередини комерційних приміщень (холодильне обладнання), котелень тощо.

Категорія 3 (технічна) загальна вібрація поділяється на наступні типи в залежності від місця розташування: а) Постійні робочі місця у виробничих приміщеннях підприємств. б) Склади, їдальні, житлові будинки, місця чергування та інші виробничі приміщення, де немає обладнання, що генерує вібрацію. с) Управління заводу, конструкторські бюро, лабораторії, навчальні центри, комп'ютерні центри, медичні центри, кабінети працівників розумової праці, офіси та інші приміщення. Вібрації поділяються відповідно до напрямку осей декартової системи координат: - де вісь X_1 паралельна осі джерела вібрації (кермо, штурвал, важіль ручного управління і т.д.), вісь Y паралельна осі джерела вібрації.), вісь Y ортогональна до осі X , а вісь Z - площина, утворена віссю X або напрямком прикладання сили (вісь передпліччя, якщо сила не прикладена); - X_0 (спина до грудей), Y_0 (праве плече до лівого плеча) - горизонтальна вісь, паралельна опорній поверхні, Z_0 - вертикальна вісь, перпендикулярна опорній поверхні поверхні контакту тіла з поверхнею (наприклад, сидіння або підлога). Всі вібрації описуються в декартових координатах X_0 , Y_0 і Z_0 і поділяються за допомогою осей X_0 , Y_0 і Z_0 . Залежно від характеру спектра вібрації розрізняють наступні типи вібрації - вузькосмугова вібрація, коли контрольний параметр в 1/3 октавній смузі частот перевищує значення в сусідній 1/3 октавній смузі частот більш ніж на 15 дБ.

6.2 Основні параметри вібрації

Параметрами, що характеризують вібрацію: частота f (Гц), амплітуда a (м), швидкість V (м/с) та прискорення W (м/с²).

Частота коливань означає кількість повних коливань за одиницю часу. Одиницею виміру частоти коливань є герц (Гц), що означає одне коливання за секунду. Частота коливань є величиною, обернено пропорційною періоду коливань.

Амплітудою коливань є найбільше зміщення точки, що коливається від нейтрального положення.

Швидкість вібрації є першою похідною зміщення у часі – частоти та амплітуди коливань:

$$V=2\cdot\pi\cdot f\cdot a, \text{ м/с}, \quad (6.1)$$

де f - частота вібрації, Гц; a - амплітуда вібрації.

За умови знання швидкості вібрації можна визначити амплітуду коливань:

$$2fVa\pi = M \quad (6.2)$$

Прискорення вібраційного руху є другою похідною від зміщення за часом

6.3 Вплив вібрації на організм людини

Несприятливий вплив вібрації проявляється в розвитку різних патологій і за поширеністю серед професійних захворювань поступається лише пиловим захворюванням. При впливі вібрації тіло людини як маса складається з пружних тіл, власні частоти яких становлять 4-6 Гц (стоячи) для плечового поясу, стегон і голови відносно поверхні опори і 25-30 Гц (сидячи) для голови відносно плечей. Власні частоти багатьох внутрішніх органів також знаходяться в діапазоні 6-9 Гц. Однак формування вібраційної патології залежить не тільки від частоти, але і від амплітуди вібрації, тривалості впливу, положення і напрямку осі, до якої прикладена вібрація, демпфуючих властивостей тканин і резонансних явищ. Індивідуальна сприйнятливність також має важливе значення. Шкідливий вплив вібрації посилюється шумом, кондиціонером, втому і значним м'язовим напруженням. Коли організм піддається впливу загальної вібрації, в першу чергу страждає нервова система і органи чуття (вестибулярний, зоровий і тактильний). Ці порушення можуть викликати головний біль, запаморочення, порушення сну, зниження працездатності, фізичні захворювання, проблеми з серцем, порушення зору,

оніміння і набряк пальців, захворювання суглобів і зниження чутливості. Поширені низькочастотні вібрації впливають на обмінні процеси, що проявляється у зміні вуглеводного, білкового, ферментного, вітамінного, холестеринового обміну та хімічного складу крові; поширені вібрації нижче 0, 7 Гц визначаються як "тряска" і є неприємними, але не призводять до вібраційної хвороби. Одним з наслідків таких вібрацій є заколисування, яке викликається резонансними явищами, що порушують нормальну діяльність вестибулярного апарату. Механічні пошкодження або розриви також можуть виникнути, якщо частота вібрації на робочому місці близька до власної частоти внутрішніх органів. Низькочастотні загальні вібрації можуть викликати біль у спині, розвиток і прогресування дегенеративних змін у хребті, хронічний попереково-крижовий мієліт і хронічний гастрит через тривале пошкодження дисків і кісткової тканини, зміщення органів черевної порожнини і зміни руху гладкої мускулатури в шлунку і кишечнику. Ударна вібрація, зокрема, створює ризик мікротравм і подальших змін у різних тканинах. Систематичний вплив загальної вібрації з високою віброшвидкістю може викликати вібраційну хворобу, що характеризується порушеннями фізіологічних функцій організму, пов'язаними з ураженням центральної нервової системи. Вона може викликати головний біль, запаморочення, порушення сну, зниження працездатності, фізичні та психологічні розлади.

Особливо чутливою до впливу локальної вібрації є частина симпатичної нервової системи, яка регулює тонус периферичних судин. Доведено, що напрямок пошкодження судин визначається в основному параметрами вібрації. Найбільш небезпечним для розвитку спазму судин є діапазон частот 35-250 Гц. Наприклад, вібрації ручних машин з максимальними рівнями енергії на низьких частотах (до 35 Гц) викликають вібраційні патології, які спричиняють переважно ураження нервово-м'язової та кісткової систем. Робота на ручних машинах з максимальними рівнями енергії у високочастотному діапазоні (вище 125 Гц) викликає судинну патологію зі спазмом периферичних кровоносних судин. Початок проявляється протягом 8-10 років при впливі низькочастотної вібрації (формувальні машини, дрилі) і протягом 5 років при впливі високочастотної вібрації (шліфувальні машини, рихтувальні машини). Вестибулярні подразники, включаючи вібрацію, погіршують сприйняття та оцінку часу і знижують швидкість обробки інформації. Ряд досліджень показав, що низькочастотна вібрація погіршує рухову координацію,

причому найбільш виражені зміни спостерігаються при частотах 4-11 Гц. Зі збільшенням інтенсивності вібрації та тривалості її впливу відбуваються зміни, які в деяких випадках призводять до розвитку вібраційної хвороби - професійного захворювання. Гігієнічні нормативи, викладені в нормативних документах, обмежують параметри вібрації робочого місця і контактних поверхонь рук оператора, виходячи з фізіологічних вимог, які не призводять до розвитку вібраційної хвороби. Наприклад, ступінь шкідливості вібрації ручних машин оцінюється за спектром віброшвидкості в діапазоні частот 11-2800 Гц. Для кожної октавної смуги в межах зазначеної частоти визначено гранично допустиму ефективну віброшвидкість і рівень для порогового значення 5-10-8 м/с.

Вага ручного вібраційного пристрою та його компонентів не повинна перевищувати 10 кг, а прикладена сила не повинна перевищувати 20 кг. Загальний рівень вібрації нормується з урахуванням характеристик джерела вібрації. Місця, де відбувається розумова праця (наприклад, конференц-зали, диспетчерські, бухгалтерії тощо), висувають високі вимоги до нормування технічних вібрацій. Вплив віброуючих машин та обладнання на організм людини можна зменшити шляхом: заміни інструментів та обладнання на невіброуючі робочі органи (наприклад, заміна електромеханічних записуючих пристроїв на електронні); ізоляції віброуючих механізмів від їх основи (наприклад, пружинами, гумовими прокладками, демпфуючими матеріалами); дистанційного керування технічним процесом (наприклад, використання телекомунікацій для керування вібраційними конвеєрами з сусідніх приміщень). Час контакту з вібраційними механізмами, що відповідають гігієнічним стандартам, не повинен перевищувати 2/3 робочого дня. Виробничі операції не повинні піддаватися безперервній вібрації, включаючи мікропаузи. Вплив безперервної вібрації, включаючи мікропаузи, не повинен перевищувати 15-20 хвилин. Крім того, необхідні дві регулярні перерви.

6.4 Нормування вібрації

Санітарні норми вібрації встановлюють параметри виробничої вібрації та правила експлуатації машин і устаткування, небезпечних щодо вібрації. Частотний (спектральний) аналіз параметра, що нормується складається з інтегральної оцінки частоти нормованого параметра, інтегральної оцінки нормованого параметра на еквівалентному (енергетичному) рівні з урахуванням часу впливу вібрації, діапазону

частот, що нормуються, (встановлюються для локальної вібрації у вигляді октавних смуг із середньо геометричними частотами): 8; 16; 31, 5; 63; 125; 250; 500; 1000 Гц. Загальна вібрація встановлюється в октавних або 1/3-октавних смугах із середньгеометричними частотами. Для ефективного контролю вібрації необхідні знання частотної структури вібраційного процесу.

При частотному (спектральному) аналізі параметрами, що підлягають нормуванню, є віброшвидкості, виміряні в 1/1-октавній і 1/3-октавній смугах частот, віброприскорення або їх середнє логарифмічне значення. В октавній смузі $f_2/f_1 = 2$ (f_2 і f_1 - частоти вище і нижче смуги), а в триоктавній смузі $f_2/f_1 = 3$. У цьому випадку смуга характеризується значенням $f_{\text{сер}}$. Оскільки абсолютні значення швидкості та прискорення змінюються в широкому діапазоні, для оцінки вібрації використовують відносні рівні віброшвидкості та віброприскорення, виражені в децибелах (дБ):

$$L = 20 \lg \frac{W}{W_o}, \text{ дБ} \quad (6.4)$$

$$L = 20 \lg \frac{V}{V_o}, \text{ дБ} \quad (6.5)$$

де V_o - порогове значення віброшвидкості, що відповідає $5 \cdot 10^{-8}$ м/с, а W_o - граничне значення. Використання логарифмічної шкали для гігієнічної оцінки вібрації обумовлено тим, що чутливість організму до вібрації змінюється пропорційно логарифму інтенсивності вібрації. Для загальної та локальної вібрації залежність допустимої віброшвидкості V_1 (м/с) від фактичного часу дії вібрації, що не перевищує 480 хвилин, визначається наступним рівнянням

$$V_1 = V_{480} \sqrt{\frac{480}{T}}, \text{ м/с.} \quad (6.6)$$

де V_{480} - допустиме значення віброшвидкості при експозиції 480 хвилин, м/с. Максимальне значення VT для локальної вібрації не повинно перевищувати значень, визначених при $T = 30$ хв і $T = 10$ хв для загальної вібрації. Гранично допустимі значення нормованих параметрів виробничої локальної вібрації при експозиції 480 хв (8 год) наведені в таблиці 6.1.

Таблиця 6.1 - Гранично допустимі значення виробничої локальної вібрації

Середньо-геометричні частоти октавних смуг	Гранично допустимі значення по осях X_n, Y_n, Z_n			
	віброприскорення		віброшвидкості	
Гц	м/с ²	дБ	м/с·10 ⁻²	дБ
8	1,4	123	2,8	115
16	1,4	123	1,4	109
31,5	2,8	129	1,4	109
63	5,6	135	1,4	109
125	11,0	141	1,4	109
250	22,0	147	1,4	109
500	45,0	153	1,4	109
1000	89,0	159	1,4	109
Коректовані та еквівалентні коректовані значення та їх рівні	2,0	126	2,0	112

Для гармонічної вібрації нормованим параметром є амплітуда вібропереміщення (мм), яка встановлюється з урахуванням частоти і характеру виконуваних робіт і використовується при розрахунку будівельних конструкцій під час проектування (табл. 6.2).

Таблиця 6.2 Допустимі амплітуди вібропереміщень для загальної технологічної вібрації (для розрахунку будівельних конструкцій під час проектування) для розрахунку будівельних конструкцій під час проектування)

частота гармонійно і складової, Гц	Амплітуда вібропереміщення, $a, 10^{-3}m$		
	на постійних робочих місцях у виробничих приміщеннях	в виробничих приміщеннях без без віброуючих машин	у приміщеннях адміністративно-управлінських та для працівників розумової праці
2	1,4	0,57	0,2026
1	2	3	4
4	0,25	0,1	0,0354
8	0,063	0,025	0,0090
16	0,0282	0,112	0,0039
31,5	0,0141	0,0056	0,0020
63	0,0072	0,0028	0,0010

6.5 Фізичні механізми та методи зниження вібрації на їх основі

Загальноприйняті методи зниження вібрації базуються на аналізі рівнянь, що описують вібрацію машин та обладнання. Для спрощення аналізу передбачається, що змінна збурююча сила діє за синусоїдальним законом, а рівняння, що описує зв'язок між амплітудою віброшвидкості (V_m) і збурюючою силою (F_m), має наступний вигляд:

$$V_m = \frac{F_m}{\sqrt{\mu^2 + \left(m\omega - \frac{q}{\omega}\right)^2}} \quad (6.7)$$

де m - маса системи, кг, q - коефіцієнт жорсткості системи, Н/м і ω - кутова частота збурюючої сили, рад/с. Знаменник цього рівняння являє собою повний механічний опір системи збурюючій силі, величина μ характеризує активну частину цього опору, а решта - реактивну частину. У резонансному режимі, коли частота коливань системи дорівнює частоті збурюючої сили, $q/m\omega = \omega_0$, реактивний опір дорівнює нулю, а амплітуда коливань швидко зростає. Аналізуючи наведене вище рівняння, можна визначити основні технічні заходи для контролю вібрації: Усунення або зменшення вібрації в джерелі (усунення або зменшення F_m); Демпфірування вібрації; Динамічне гасіння вібрації. Усунення або зменшення джерел вібрації повинно здійснюватися на етапі проектування машини і технологічного процесу. Особливу увагу слід приділяти усуненню або мінімізації динамічних процесів, викликаних ударами і швидкими прискореннями. Гасіння вібрації в джерелі вібрації досягається шляхом зменшення змінних сил, що діють на систему. Такого зменшення можна досягти шляхом заміни динамічних процесів статичними, ретельного балансування обертових компонентів тощо. Там, де є контакт з віброуючими об'єктами, передачу вібрації можна зменшити за допомогою дистанційного керування, автоматичного контролю та огорожувальної сигналізації. Ці методи повинні повністю виключати контакт оператора з об'єктом, що вібрує. Гасіння вібрації ґрунтується на зниженні рівня вібрації шляхом перетворення механічної енергії вібрації в теплову. Для цього можуть бути використані наступні методи:

- використання в якості конструкційних матеріалів матеріалів з високим внутрішнім тертям;

- нанесення еластичних матеріалів на віброуючі поверхні;
- використання поверхневого тертя, серед інших методів.

Віброгасники, які використовують принцип антирезонансу, що виникає в системі з двома ступенями свободи, є ефективними пристроями контролю вібрації. Принцип антирезонансу полягає в тому, що одна з мас системи залишається нерухомою при дії на неї гармонічного збурення певної частоти. Динамічні демпфери найбільш ефективні при використанні в режимі резонансних коливань.

Динамічне гасіння вібрацій здійснюється шляхом розміщення машин і агрегатів на фундаментах. Маси розраховуються таким чином, щоб амплітуда коливань на дні фундаменту не перевищувала 0, 1-0, 2 мм, або 0, 005 мм для окремих конструкцій. Також можуть використовуватися віброгасники, які являють собою вібраційні системи, власні частоти яких налаштовані на основну частоту об'єкта. Віброгасники жорстко прикріплені до об'єкта, що вібрує, і тому генерують коливання, які знаходяться в протифазі з коливаннями об'єкта. Поглинання вібрації полягає в прикріпленні еластичного матеріалу з високим внутрішнім тертям (гума, пластик, антивібраційна мастика) до поверхні, що вібрує. Демпфірування вібрації досягається шляхом поглинання енергії вібрації еластичними матеріалами. Вібропоглинаючі мембрани ефективні, якщо товщина шару відповідає декільком довжинам хвиль згинальних коливань. Вібропоглинаючі мембрани наносяться в місці максимальної амплітуди вібрації, яка визначається на основі дослідження швидкості вібрації в різних частинах конструкції. Товщина вібропоглинаючого шару зазвичай в два-три рази перевищує товщину конструкції, що покривається. Якщо описані вище захисні заходи недостатньо ефективні для зниження рівня вібрації до прийняттого рівня, застосовується віброізоляція. Віброізоляція заснована на зменшенні передачі коливань від джерела вібрації до об'єкта, що захищається, за допомогою пристрою, встановленого між ними. Між джерелом вібрації та об'єктом, що захищається, створюється пружний зв'язок, який знижує рівень вібрації. В якості таких пружних елементів можуть використовуватися віброізолятори у вигляді пружин, ресор, гумових прокладок і т.д. Встановлення обладнання на віброізоляторах (амортизаторах) зменшує шкідливі вібрації на робочому місці, оскільки вібрації з меншою ймовірністю передаються на основу. Віброізоляція називається активною віброізоляцією, коли вона використовується для зменшення вібрації від джерела збудження (машини)

до несучої конструкції. Найефективнішим способом створення безвібраційного середовища є проектування активної віброізоляції для зменшення динамічних навантажень, що передаються від вібруючого обладнання на опорну конструкцію. Існує два типи віброізоляції: опорна і підвісна. У разі опорної віброізоляції віброізолятор встановлюється під корпусом машини, яку потрібно ізолювати, або під жорстким фундаментним блоком. У разі підвісної віброізоляції об'єкт, що ізолюється, підвішується до віброізолятора, закріпленого над подошвою фундаменту. Пасивна віброізоляція застосовується, коли об'єкт, що ізолюється, необхідно захистити від вібрації несучого фундаменту. Пасивна віброізоляція використовується для захисту людей, що знаходяться в зоні передачі вібрації. У багатьох випадках пасивна віброізоляція влаштовується у вигляді гігантських плит, які контактують з вібраційною основою через інші амортизатори. Розрахунок такої віброізоляції базується на виборі співвідношення між масою плити і коефіцієнтом жорсткості пружної опори, щоб вібрація плити була нижчою, ніж вібрація основи (коефіцієнт жорсткості пружної опори (кг/см) - це сила (кг) при осіданні пружної опори на 1 см). Віброізоляція - єдиний спосіб зменшити вібрацію, що передається на руки від ручних механізованих інструментів. Якщо працівник піддається впливу локальної вібрації, використовується метод захисту в часі. Це означає, що при використанні ручних інструментів з вібраційною небезпекою загальний час контакту з вібрацією протягом робочої зміни встановлюється відповідно до величини перевищення гігієнічних нормативів і згідно з розробленим режимом роботи. З фізичної точки зору, вібрація - це рух точки або механічної системи під дією зовнішніх сил, що викликає коливання скалярних величин, які її характеризують (вібропереміщення, віброшвидкість і віброприскорення). Вібрацію можна виміряти за допомогою абсолютних (вібропереміщення, віброшвидкість і віброприскорення) і відносних величин (рівень віброшвидкості). Загальні та локальні вібрації оцінюються за допомогою середньоквадратичного значення віброшвидкості (м/с) і віброприскорення (м/с²) та значень поправок (вертикальної, поздовжньої та поперечної).

Рівень віброшвидкості:

$$L_v = 20 \lg(v/v_0), \quad (6.8)$$

де v_0 - порогове значення віброшвидкості, м/с; v - середньоквадратичне значення віброшвидкості, м/с.

Основні джерела вібрації - технологічне обладнання ударної дії (молоти, преси, гуркоти), енергетичні установки (наноси, компресори, двигуни), транспортні засоби (особливо рейковий - трамвай, залізниця). Вібрація поширюється ґрунтом і досягає фундаментів будівель і споруд, нерідко руйнуючи їх. Вібрації згасають у ґрунті з темпом близько 1 дБ/м. На відстані 50-60 м від транспортних магістралей вони майже не відчуються.

Розрізняють такі види вібрації:

- загальна - впливає на весь організм (на транспорті, при віброущільненні бетону та ін.);
- локальна (місцева) – що діє окремі частини тіла (робота з ручним пневмоінструментом, віброущільнювачами та інших.).

Вібрації в діапазоні від 50 до 250 Гц впливають на серцево-судинну і нервову системи, часто викликають вібраційну хворобу, яка проявляється болями в суглобах, підвищеною чутливістю до охолодження, судомами.

Основними нормуємими параметрами вібрації є середньоквадратичні величини рівнів віброшвидкості L_v (дБ), віброприскорення, вібросмещения в октавних смугах з середньгеометричними частотами 2, 4, 8, 16, 31,5, 63 Гц. L_v визначається за формулою (6.8), де v_o - порогова віброшвидкість, що дорівнює 5×10^{-8} м/с; V – середньоквадратична віброшвидкість, м/с.

Порогові значення віброприскорення та вібросміщення відповідно дорівнюють 3×10^{-4} м/с², 8×10^{-12} м.

6.6 Шумові впливи

Шум - будь-який небажаний звук або сукупність звуків, що надають несприятливий вплив на ОС і людину.

Звук - механічні коливання частинок пружного середовища, що утворюються під впливом будь-якої сили, що обурює. Акустичні коливання в діапазоні 20-20 000 Гц (від 20 до 20000 коливань в с), що сприймаються слуховим апаратом людини, називаються звуковими, а простір їх поширення - звуковим полем. Коливання нижче 20 Гц є інфразвуковими, нижня межа частот інфразвуку не обмежена. Коливання вище 20 кГц вважають ультразвуковими, вони теж не викликають слухових відчуттів. У діапазоні частот 10^9 - 10^{13} Гц знаходяться коливання пружних середовищ, які називаються гіперзвуком. Верхня межа частот

гіперзвуку в газах обмежена частотою 10^9 Гц, а в твердих тілах і рідинах - 10^{12} - 10^{13} Гц.

Джерела звуку можна розділити на такі основні типи :

- коливальні або автоколивальні системи, в яких під впливом локального джерела енергії виникають або власні затухаючі коливання, або незагасаючі автоколивання (всі музичні інструменти, людський голос, парові та пневматичні свистки і т. п.);
- обертальні системи, в яких періодичні зміни тиску і швидкості середовища викликаються від тіл, що обертаються (гвинт літака або корабля; ротор електромеханічного пристрою; турбіни; сирени, що створюють звук в результаті періодичних змін швидкості газового струменя і т. п.);
- електроакустичні перетворювачі (телефони, гучномовці, еталонні джерела звуку – темофони тощо).

Джерелами звуку можуть бути різноманітні процеси, явища, що викликають обурення пружного середовища щодо середнього рівноважного стану.

Для опису коливальних процесів пружного середовища в акустиці прийнято такі об'єктивні характеристики та поняття .

Швидкість поширення звуку (V), яка у разі періодичних коливань пов'язана з довжиною хвилі (λ), частотою (f) та періодом (T) співвідношенням

$$V = f \lambda = \lambda / T \quad (6.9)$$

Звукова енергія ($E_{зв}$) складається з кінетичної енергії коливань частинок і потенційної енергії пружної деформації.

Щільність звукової енергії ($zв$) визначає звукову енергію, віднесену до одиниці обсягу пружного середовища. Потік (потужність) звукової енергії ($W_{зв}$) визначає енергію, перенесену в одиницю часу через одиницю площі, перпендикулярної напрямку поширення.

Звуковий тиск (p) в пружному середовищі за наявності звукових коливань складається з тиску в необуреному середовищі і змінного додаткового тиску, що виникає в кожній точці середовища в даний момент часу. При цьому звуковий тиск протягом періоду коливань змінює свою величину і знак між позитивними та від'ємними амплітудними значеннями.

Об'ємна швидкість (v_0) визначається як добуток коливальної швидкості і площі, яку за одиницю часу перетинають всі частки з обсягу $v_1 S$, тобто $v_0 = v_1 S$.

Інтенсивність (сила) звуку (J) визначається середньою за часом енергією. Звуковою хвилею, що переноситься в одиницю часу через одиницю площі, перпендикулярною до напрямку поширення хвилі за формулою

$$J = E_{зв}/(tS). \quad (6.10)$$

Крім зазначених характеристик акустичних величин користуються відносними параметрами, тобто застосовуються відносини вимірюваних величин до деяких граничних значень. Тому введені поняття відносних рівнів звукового тиску та інтенсивності. Різниця двох рівнів J_1 та J_2 визначається за формулою

$$L_J = \lg(J_2/J_1). \quad (6.11)$$

Одиницею вимірювання різниці рівнів є білий (В), який визначається як логарифм відношення інтенсивностей при $J_2/J_1=10$. У цьому випадку логарифм десяткового дробу дорівнює 1. Іншою одиницею є децибел (дБ), який дорівнює 0, 1В. Таким чином, якщо різниця рівнів становить 1 дБ, співвідношення буде

$$J_2/J_1=100,11,26 \quad (6.12)$$

У цьому випадку різниця між рівнями J_2 і J_1 визначається наступним співвідношенням

$$L_J = 10 \lg(J_2/J_1). \quad (6.13)$$

Використовуючи співвідношення

$$J = p_2^2/v, \quad (6.14)$$

де p_2 - густина середовища; - амплітуда звукового тиску, різниця в рівнях звукової потужності визначається наступним рівнянням

$$\lg(J_2/J_1) = 2 \lg(p_2/p_1). \quad (6.15)$$

Якщо рівень звукового тиску вимірюється в децибелах, рівняння набуває вигляду

$$L_p = 20 \lg(p_2/p_1). \quad (6.16)$$

Рівень шуму (L_p) дорівнює 20-кратному логарифму відношення звукового тиску до порогового значення звукового тиску (p_0)

$$L_p = 20 \lg (p/p_0). \quad (6.17)$$

Умовне порогове значення звукового тиску приймається еквівалентним 2×10^{-5} Па. Звукова потужність (Вт) - це повна кількість енергії, що випромінюється у вигляді звуку об'єктом в ОС і проходить через поверхню

півсфери радіусом r за одиницю часу. Рівень звукової потужності (L_w) розраховується за наступною формулою

$$L_w + 10 \lg(W/W_0), \quad (6.18)$$

де $W_0 = 10^{-12}$ Вт. Звук виникає внаслідок взаємодії між тілом, що коливається, і середовищем, "швидкого" вивільнення енергії в скінченному об'ємі середовища, надходження (відтоку) скінченної кількості матеріалу в область середовища і обтікання матеріалу навколо твердого тіла. Спектральні та часові властивості шуму дуже різноманітні. Залежно від характеру спектра шум можна розділити на широкосмуговий і тональний. Перший - це шум з безперервним спектром шириною в одну октаву і більше. На виробництві поширені октавні смуги з середньгеометричними частотами 63, 125, 250, 500, 1000, 2000, 4000 і 8000 Гц. Ще однією особливістю є наявність окремих звуків, які можна почути в спектрі. За часовими характеристиками шум можна розділити на постійний і непостійний. Непостійний шум можна поділити на імпульсний, переривчастий та змінний у часі. Шум негативно впливає на слухові апарати і викликає неспецифічні зміни в інших органах і системах людини: вплив інтенсивного шуму (наприклад, вибухи, ударні хвилі) при гучності до 130 дБ викликає біль, а при гучності вище 140 дБ - пошкодження слухового апарату. Допустимою межею інтенсивного шуму є 154 дБ, що викликає задишку, сильний головний біль, порушення зору та нудоту. Типові рівні шуму наступні: Тиха сільська місцевість - 20-30 дБ; - Звичайна розмова - 40-50 дБ; Салон автомобіля, пилосос - 60-70 дБ; Важкі дизельні вантажівки - 90 дБ; Галасливі заводські цехи - 100 дБ; постріл над вухом - 160 дБ. Згідно з існуючими нормами, сума фактичних шумів, що генеруються різними техногенними джерелами, не повинна перевищувати допустимих рівнів шуму. Для постійного шуму використовуються такі параметри: Рівень звукового тиску (потужності) L_p (дБ) на середньгеометричних частотах 31, 5, 63, 125, 250, 500, 1000, 2000, 4000 і 8000 Гц октавних смуг; Рівень інтенсивності звуку L_J (дБ). Для нестаціонарного шуму слід використовувати: Еквівалентний рівень шуму $L_{J_{eq}}$ (дБ); Максимальний рівень шуму $L_{J_{max}}$ (дБ). Під час вимірювання рівень шуму поділяється на піддіпазони. Максимально допустима доза визначається відповідно до часу експозиції. При розробці та виборі методів боротьби з шумом застосовується ряд заходів, що включають:

- Необхідні акустичні розрахунки та вимірювання, порівняння з нормованими та фактичними шумовими характеристиками;
- Ідентифікацію небезпечних і безпечних зон; розробку і застосування звукопоглинального і звукоізоляційного обладнання та конструкцій;
- Вибір відповідного обладнання та найбільш оптимального режиму роботи; Зменшення коефіцієнта спрямованості шумового випромінювання по відношенню до території, що цікавить;
- Вибір оптимальних зон орієнтації та оптимальних відстаней від джерел шуму спирається на: проведення будівельних та планувальних робіт; організаційні та технічні запобіжні заходи, такі як своєчасний ремонт та змащення обладнання;
- Заборона використання застарілого обладнання, яке генерує високий рівень шуму тощо.

Звукопоглинання - це перетворення частини енергії звукових хвиль в теплову енергію в середовищі, через яке поширюється звук. Звукопоглинання в суцільному середовищі характеризується зменшенням амплітуди звукової хвилі, що поширюється, з відстанню. Звукопоглинальні матеріали мають коефіцієнт звукопоглинання K_p 0, 3.

Їх можна розділити на три основні типи: 1) матеріали, які поглинають повітря за рахунок в'язкого тертя в порах (волокнисті пористі матеріали); 2) матеріали з релаксаційними втратами через деформацію нежорсткого каркасу на додаток до в'язкого тертя в порах (наприклад, повсть, деревні волокна); 3) матеріали, які поглинають звук через деформацію всієї або частини поверхні матеріалу плитоподібні матеріали (наприклад, фанера, штори). Звукоізоляційні заходи покликані знизити рівень шуму, що проникає в приміщення ззовні. До звукоізоляційних заходів відносяться огорожі, звукоізоляційні шафи, звукоізоляційні екрани і т.д. Відповідно до СНиП, заходи щодо зниження шуму на промислових майданчиках повинні враховуватися при розробці планувальних, технічних, архітектурних і будівельних рішень. Архітектурно-планувальні методи включають - видалення джерел шуму від об'єктів шумозахисту - розміщення джерел шуму в напрямку, протилежному до об'єктів шумозахисту - концентрація джерел шуму у виробничих приміщеннях або в окремих комплексах всередині будівель – локалізація джерел шуму по відношенню до будівлі або споруди, що підлягає захисту, а не до джерела шуму. До методів будівельної акустики відносяться: Екранування,

віброізоляція, звукоізоляція та вібродемпфування обладнання та пристроїв, що є джерелами шуму.

Вибір заходів шуму та визначення їх шумових характеристик; вибір розрахункових точок на території об'єкта, що підлягає захисту; визначення шляху розповсюдження шуму від джерела шуму до розрахункової точки розрахунок акустичних елементів ОС (екранів, озеленення тощо), що впливають на поширення шуму; визначення очікуваного рівня шуму в розрахунковій точці та порівняння з допустимим рівнем шуму; визначення необхідного зниження рівня шуму. При оцінці шумового впливу на промисловий майданчик і прилеглу територію необхідно виявити всі джерела шуму, включаючи автомобільні та залізничні транспортні шляхи, вантажно-розвантажувальні майданчики, обладнання, агрегати, цехи і виробничі приміщення.

Джерела шуму можна розділити на наступні категорії:

а) точкові джерела - припливні та витяжні труби, окремі агрегати, транспортні засоби тощо;

б) просторові джерела - окремі будівлі, які випромінюють шум через огорожувальні конструкції або їх елементи.

Методи вимірювання шуму: рівні шуму від будівель цехів з технічним обладнанням, що генерує шум, визначаються за тим, чи орієнтовані елементи зовнішньої стіни зі зниженою звукоізоляцією (наприклад, вікна, двері, ворота) в бік розрахункової точки. У сільських рекреаційних зонах розрахункова точка повинна розташовуватися на межі ділянки, найближчої до джерела шуму, на висоті 1, 5 м над рівнем поверхні. У житлових районах вимірювання шуму проводяться шумоміром у діапазоні 2 Гц. Дослідження показали, що рівень шуму 85 дБ триває 8 годин, 91 дБ - 4 години, 97 дБ - 2 години, 103 дБ - 1 годину і 121 дБ - 7 хвилин. Для безперервного інфразвуку рівень звукового тиску не повинен перевищувати 90 дБ в октавних смугах з середньгеометричними частотами 2, 4, 8, 16, 31 Гц. Для третин октавних смуг із середньгеометричними частотами 1, 6, 2, 5, 3, 15, 4, 5, 6, 3, 8, 10, 12, 5, 16, 20, 25, 31 і 40 Гц рівень звукового тиску не повинен перевищувати 80 дБ. Ослаблення низькочастотних коливань біля поверхні атмосфери становить 8×10^{-6} дБ/км, і на великих відстанях захисні заходи не ефективні. Джерелами техногенного низькочастотного шуму є низькошвидкісні поршневі двигуни та поршневі насоси. Короткочасні інфразвукові імпульси генеруються вибухами, пострілами та руйнуванням

звукових бар'єрів. Для запобігання впливу інфразвуку вживаються такі заходи - поглинання низькочастотних коливань - оптимізація режимів роботи обладнання - спеціальні інженерні рішення. Низькочастотна звукоізоляція неефективна на частотах нижче 10 Гц, в цьому випадку створюються міцні, жорсткі конструкції з поверхневою щільністю 10^5 - 10^6 кг/м², а обладнання фактично з'єднується з усією будівлею. Низькочастотне звукопоглинання поєднується з використанням резонансних явищ. Найбільш ефективні методи пов'язані з використанням різних типів шумоглушників, вибором режимів роботи і застосуванням спеціальних конструкцій. Ультразвукові хвилі визначаються, як коливання з частотою 16 000 Гц і вище. Тому прийнятні рівні на робочому місці визначаються, як 80 дБ на 12500 Гц, 90 дБ на 16000 Гц, 100 дБ на 20000 Гц, 105 дБ на 25000 Гц.

Контрольні питання до розділу 6.

1. Дайте визначення понять "шум", "ультразвук", "інфразвук", "вібрація".
2. Якими фізичними параметрами характеризується шум?
3. Якими фізичними параметрами характеризуються ультразвукові та інфразвукові коливання?
4. Яка дія шуму, ультра- та інфразвуку, а також вібрації на організм людини?
5. У чому полягає нормування шуму, ультра- та інфразвуку, а також вібрації?
6. Перерахуйте основні методи захисту від впливу шуму, ультра- та інфразвуку, вібрації.
7. Що таке звукоізоляція, звукопоглинання?
8. Що таке віброізоляція?
9. Що таке глушники ш. Дайте визначення понять "шум", "ультразвук", "інфразвук", "вібрація".
10. Перерахуйте індивідуальні засоби захисту від шуму, ультразвуку та вібрації.
11. Якими приладами вимірюють шум, ультра- та інфразвук, а також вібрацію?

РОЗДІЛ 7 ВПЛИВ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ

7.1 Вплив та нормування електромагнітного опромінювання

Електромагнітна енергія, що випромінюється антеною радіоустановки, поширюється в просторі і зазвичай перетворюється в електромагнітне поле (ЕМП), яке характеризується двома протилежними компонентами: електричною (Е) і магнітною (М).

В існуючих методах вимірювання ЕМП оцінюються через густину потоку поверхневої енергії (ППЕ) - Вт/м² (1 Вт/м² - 0, 1 мВт/см² - 100 мкВт/см²). Для оцінки біологічного впливу електромагнітного випромінювання розрізняють індуктивну (ближню) та радіаційну (дальню) зони. Близня зона розташована на відстані, що відповідає 1/6 довжини хвилі від джерела. Тут магнітна складова інтенсивності електромагнітної хвилі виражена слабо, тому її вплив на організм незначний. На більших відстанях вплив обох складових електричного поля стає більш вираженим. Основними джерелами низькочастотних електромагнітних коливань є лінії електропередач та системи транспортних засобів (електрообладнання). Високочастотні електромагнітні хвилі використовуються в металургії для плавлення металів в індукційних печах і в машинобудуванні для термічної обробки. Електричний транспорт є джерелом як низькочастотних, так і високочастотних електромагнітних коливань, а надвисокочастотна та надвисокочастотна електромагнітна енергія використовується в системах зв'язку (наприклад, радіо, телебачення). Електробезпека повинна відповідати певним вимогам. Максимально допустима напруга і сила струму дотику повинні відповідати вимогам до допустимого рівня і контролю електростатичних полів на робочому місці. Гранично допустимі рівні електромагнітних полів (ГДР) (24-годинний безперервний вплив) відповідають наступним класифікаціям :номер діапазону , ціна поділки діапазону , частота, довжина хвилі . Кілометрова хвиля (низька) з 30 до 300 кГц , до 1 км. Гектометрова хвиля (середня) з 0, 8 до 8 МГц 1 до 0, 1 км .Дециметрова хвиля (висока) з 8 до 80 МГц 100 до 10 м. Метрова хвиля (дуже висока) з 80 до 800 МГц 10 до 1 м. Дециметрова хвиля (надвисока) з 800 до 8000 МГц 1-0, 1 м .Сантиметрова хвиля (надвисокі) з 8 до 80 ГГц 10 до 1 см. Гранично допустимі рівні електромагнітного випромінювання в радіочастотному діапазоні для населення визначені в спеціальних стандартах. Залежно від частоти (довжини хвилі) визначається рівень ГДК, потужність електричної складової електромагнітної хвилі, виражена як

ефективне значення, і ГДК, виражена як середнє значення. Рівні електромагнітного випромінювання в діапазоні частот 9-11 при імпульсному опроміненні в зонах дії діючих радіолокаційних станцій, територій, на яких планується розміщення радіолокаційних станцій, населених пунктів у зонах дії реконструйованих радіолокаційних станцій та територій, призначених для майбутньої містобудівної діяльності в зонах дії діючих радіолокаційних станцій, не повинні перевищувати гранично допустимі рівні 150-300 МГц Для інших типів станцій, не зазначених у таблиці 150-300 МГц (включаючи радіолокаційні установки, що працюють в імпульсному режимі в цій смузі частот), рівні ЕМП на території житлової забудови не повинні перевищувати 10 мкВт/см². Смути частот (хвиль) мають такі позначення. Номер смуги Діапазон частот (тільки нижня та верхня межі частот). Відповідні метрові одиниці: 5 30 - 300 кГц, 104 - 10 м. Кілометрові хвилі (низька частота, НЧ) : 300 - 3000 кГц, 10³ - 10 м. Кілометрові хвилі (низька частота, НЧ) : 300 - 3000 кГц, 10³ - 10² м. Гектометрові хвилі (середня частота, МС) : 3 - 30 МГц, 10⁻¹⁰ м. Декаметрові хвилі (висока частота, HF) : 30 - 300 МГц, 10⁻¹ м. Декаметрові хвилі (дуже коротка частота, VHF) : 300 - 3000 МГц, 1 - 0,1 м. Декаметрові хвилі (дуже висока частота, UHF) 1: 3 ГГц - 30 ГГц, 10 см - 1 см. Сантиметрові хвилі (дуже висока частота, UHF) : 30 ГГц - 300 ГГц, 10, 1 см. Міліметрові хвилі (дуже висока частота, EHF).

В якості гранично допустимого рівня (ПДУ) опромінення населення приймаються такі значення ЕМП, які при щоденному опроміненні у властивих для даного джерела випромінювання режимах не викликають у населення без обмеження статі та віку захворювань або відхилень у стані здоров'я, що виявляються сучасними методами дослідження в період опромінення або у віддалені терміни після його припинення.

Гранично допустимі рівні напруженості електричного поля E :

- Приміщення, територія E , кВ/м;-У середині житлових будівель 0,5;
- На території зони житлової забудови 1,0; -У населеній місцевості, поза зоною житлової забудови; на ділянках перетину ПЛ з автомобільними дорогами I-IV категорії -10;
- У ненаселеній місцевості (часто відвідуваної людьми, доступною для транспорту та сільськогосподарські угіддя)-15;
- У важкодоступній місцевості (не доступній для транспорту та сільськогосподарських машин) та на спеціально вигороджених ділянках, де доступ населення виключено) -20.

При величині E більше 500 В/м повинні бути вжиті заходи, що виключають вплив на людину електричних розрядів і струмів стікання.

ПДУ напруженості ЕМП на робочому місці в діапазоні частот 0,06-300 МГц Складова поля, за якою оцінюється його вплив та діапазон частот (МГц) ПДК напруженості поля протягом робочого дня:

Електрична складова: 0,06-3,50, В/м, 3–50 ,20 В/м, 30-50, 10 В/м, 50–300, 5 В/м;

Магнітна складова: 0,06-1,5 5 А/м, 30-50 0,3 А/м.

ПДК електромагнітного опромінення в діапазоні частот 300 МГц-300 ГГц (в термінах :тривалість опромінення, ПДК щільності потоку енергії, мк Вт/см² ·безперервне опромінення, переривчасте опромінення):

24 /33 /165,16 /50 /250,12/ 66/ 330,10/ 80/ 400,8 /100/ 500,6 /135/ 675,4 /200/ 1000,2 /400/ 1700,1 /800/ 2900,0,75 /1000/ 3500,0,5/ 1400/ 5000,0,2 /2800/ 10000.

Майданчики для розміщення проєктованих радіотехнічних об'єктів (РТО) необхідно вибирати з урахуванням потужності та діапазону частот передавачів, характеристики спрямованості, висоти розміщення та конструктивних особливостей антен, рельєфу місцевості, функціонального призначення прилеглих територій, поверх ності та особливостей забудови, щоб ЕМП на селитебній території не перевищували ПДУ.

Згідно з дослідженнями, у радіусі 150 від підстанцій, трансформаторів, поблизу ЛЕП, контактних мереж індукція магнітного поля перевищує 0,3 мкТл . У людей, які живуть поблизу подібних споруд, пухлини та лейкози зустрічаються у 2 рази частіше, ніж у інших. Статистична обробка одержаних матеріалів підтвердила, що при підвищенні індуктивності магнітного поля вище 0,1 мкТл ризик захворювання зростає у 24 рази. Не менш небезпечним є вплив ЕМП на біологічні об'єкти поблизу радіо-, теле- та локаційних станцій, енергетичних установок. Так, в електропоїздах рівень ЕМП перевищує природне тло у тисячі разів, досягаючи величини індукції магнітного поля до 10 мТл (у квартирах допустимий рівень –0,2 мкТл).

З метою захисту населення від впливу ЕМП, створюваного РТО, встановлюються СЗЗ та зони обмеження забудови (ЗОЗ). Санітарно-захисною зоною є площа, що примикає до технічної території РТО. Зовнішня межа СЗЗ визначається на висоті до 2 м від поверхні землі по ПДУ ЕМП. СЗЗ встановлюється від джерел випромінювання електромагнітної енергії, тобто від антени радіотехнічних об'єктів, з

урахуванням перспективного їх розвитку. Санітарно-захисні зони радіо- та телестанцій(в параметрах-тип станцій, діапазон частот СЗЗ, м):

Довгохвильові 30-300 кГц 100-1000,

Середньохвильові 300-3000 кГц 200-1000,

Короткохвильові 3-30 мГц 50-700,

Телевізійні та УКХ радіостанції 30-1000 мГц 25-800.

СЗЗ визначається як територія від рівня землі до висоти не менше 2 м над ПДУ, при цьому зовнішня межа СЗЗ визначається максимальною висотою будівлі, що будується, таким чином, щоб ЕМП не перевищувало значення ГДК тільки на рівні верхніх поверхів. Навколо РТО встановлюються СЗЗ та СЗЗ передавальних радіостанцій, телевізійних станцій та радіолокаційних станцій всенаправленої дії з горизонтальними всенаправленими антенами. Для передавальних радіостанцій і радіолокаційних станцій зі спрямованими антенами, що сканують у постійному або фіксованому напрямку, СЗЗ і СЗЗ встановлюються в напрямку випромінювання електромагнітної енергії, але необхідно також враховувати бічні і задні пелюстки діаграми спрямованості антени. Для радіо-, телевізійних і радіолокаційних передавальних станцій, де антена випромінює електромагнітну енергію під фіксованим кутом до горизонту і рівень електромагнітного випромінювання змінюється з висотою, в житлових районах з вертикальними перепадами слід встановлювати зони відчуження. Щоб зменшити вплив на житлові райони та СЗЗ, радіолокаційні антени слід розташовувати на природних підвищеннях, набережних і шляхопроводах, а негативний кут антени повинен бути максимально обмежений. Планування і забудова територій з існуючими або запланованими об'єктами бездротового зв'язку повинні здійснюватися з урахуванням меж СЗЗ та РЗЗ, встановлених проектами будівництва або реконструкції об'єктів бездротового зв'язку в СЗЗ, за умови дотримання РЗЗ в населеному пункті, де розміщуються об'єкти різного функціонального призначення. Розміщення таких об'єктів має бути дозволено. Існуючі та майбутні будівлі повинні бути забезпечені захисними заходами, щоб рівні ЕМП були знижені до нормативних меж. Такі будівлі, як медичні заклади зі стаціонарними відділеннями, рекреаційні об'єкти, дитячі садки, школи та заклади для інвалідів і людей похилого віку, повинні розташовуватися в зонах утворення радіотіней. При розташуванні приватної забудови в зонах обмеженого доступу слід враховувати екрануючий ефект будівель і споруд, що дозволяє знизити

рівні ЕМП до ГДР в рекреаційних і спортивних зонах, а на ділянці - за рахунок фасадів з мінімальною площею засклення, розташованих на краю житлових, громадських і промислових об'єктів і подалі від джерел електромагнітних випромінювань. слід враховувати. Слід враховувати наступні моменти Там, де необхідно розташувати будівлі на протилежному боці від джерела електромагнітного випромінювання, можна використовувати будівлі галерейного типу, при цьому будівля повинна бути звернена в бік від джерела електромагнітного випромінювання. При проектуванні будівель в зонах обмеженого доступу щільність забудови повинна бути на рівні нижньої межі будівельних норм (СНиП). У зонах обмеженого доступу дахи житлових, громадських і промислових будівель слід огорожувати огорожувальними конструкціями з матеріалів з хорошими радіоекрануючими властивостями (наприклад, залізобетону), а дахи об'єктів бездротового зв'язку повинні бути захищені з боків будівлі заземленою металевою сіткою. Також слід розглянути можливість використання захисних стін або навісів. Території медичних закладів слід максимально озеленювати, мінімізуючи площу твердих поверхонь, таких як під'їзні шляхи, пішохідні доріжки та пішохідні переходи. Перевагу слід надавати піщаним, земляним, гравійним та щебеневим покриттям. Для будівель і споруд, що проектуються на запланованих високовольтних лініях і трасах, допускається створення СЗЗ вздовж ПЛ без будь-яких засобів зниження напруженості поля шляхом розміщення проводів горизонтально і ортогонально до ПЛ на таких відстанях від проекції зовнішнього шару проводів на поверхню землі: 20 м - ПЛ 330 кВ, 30 м - ПЛ 500 кВ, 40 м ПЛ- 750 кВ, 55 м ПЛ- 1150 кВ. Якщо напруженість поля перевищує ГДР, необхідно вжити заходів для зменшення напруженості поля (наприклад, виключення з житлових районів, використання екрануючих пристроїв).

Мінімальна відстань від осі запланованої ПЛ напругою 750-1150 кВ до межі населеного пункту повинна становити не менше 250-300 м. Контроль за дотриманням ЕМП повинен здійснюватися під час проектування, реконструкції та експлуатації радіооб'єкта, а також у сільській місцевості, прилеглий до існуючих або запланованих радіооб'єктів. Результати розрахунків СЗЗ і меж СЗЗ та вихідні дані повинні бути включені до розділу "Заходи з охорони навколишнього середовища" проектної документації. При проектуванні житлової забудови або індивідуальних житлових будинків у районах розташування

радіотехнічних об'єктів контроль за дотриманням нормативних значень на передбачуваній ділянці будівництва буде здійснюватися з використанням розрахункових методів і апаратних способів визначення рівнів електромагнітних полів.

Кожен об'єкт, який випромінює електромагнітну енергію в навколишнє

середовище, повинен мати санітарний паспорт, що містить такі дані:

- потужність кожного передавача та їх кількість;
- положення антени та напрямок її випромінювання;
- тип використовуваної антени;
- коефіцієнт підсилення антени;
- висота, на якій розташована антена;
- максимальний кут випромінювання антени;
- робоча частота;
- тип модуляції.

Неіонізуюче випромінювання. Інфрачервоне (ІЧ) випромінювання це електромагнітне випромінювання з довжинами хвиль від 0, 76 мкм до 700 мкм. Інфрачервоне (ІЧ) випромінювання не сприймається людським оком, але може відчуватися шкірою; ІЧ часто називають тепловим випромінюванням (теплом). Найпоширенішим джерелом штучного ІЧ-випромінювання є лампа розжарювання, тоді як серед некогерентних джерел ІЧ-випромінювання часто використовують селективні випромінювачі. Більш вузьким, когерентним джерелом штучного випромінювання в інфрачервоному діапазоні є лазер, який часто використовується як джерело теплового випромінювання. Точний розрахунок теплового забруднення та його контроль в ОС вимагає аналізу набору показників і розгляду складних фізичних процесів. Прийнятної методики розрахунку теплового забруднення поки що не існує. Ультрафіолетове випромінювання (UVR). Ультрафіолетове випромінювання відноситься до електромагнітного випромінювання з довжиною хвиль від 0, 38 мкм до 100 А₀. Об'єкти, нагріті вище 30 000 К, мають у своєму спектрі ультрафіолетову складову. Електричне іскріння, плазмові установки, електродугове зварювання, електроди-провідники, лазерне штампування і методи лазерної обробки, що використовуються в технічному секторі, є штучними джерелами УФВ. До них також відносяться деякі металургійні печі, де метали і сплави очищаються при високих температурах за допомогою кисневих спреїв і потужних

електронних і плазмових потоків. Велика кількість ультрафіолету може викликати опіки шкіри, канцерогенні реакції, пошкодження очей та інші небажані процеси. Він також має шкідливий вплив на мікроорганізми та клітини рослин і тварин.

7.2 Вплив та нормування іонізуючого випромінювання

Іонізуюче випромінювання - це будь-яке випромінювання, яке в результаті взаємодії з навколишнім середовищем створює заряди (іони, нукліди) іншого знаку. Радіоактивність - це спонтанне перетворення нестабільного нукліда в інший нуклід, який випромінює іонізуюче випромінювання. Основним типом радіоактивного матеріалу є альфа-частинка - ядро гелію з двома позитивними зарядами. Альфа-частинки випромінюються при розпаді елементів з високим масовим числом (наприклад, радію, торію, урану). Вони проникають на 2, 5-9 см у повітрі та до 0, 1 мкм у біологічних тканинах. Бета-частинки - це ядерні частинки з фізичними властивостями, подібними до електронів. Вони утворюються під час радіоактивного розпаду і негайно випромінюються. Вони можуть бути присутніми на відстані кількох метрів у повітрі та кількох міліметрів у тканинах. Гамма-промені - це короткохвильові електромагнітні хвилі (до 10^{-9} см), що утворюються під час ядерних реакцій і розпаду осколків поділу, подібні до рентгенівських променів, але з меншою довжиною хвилі і більшою енергією. В атмосфері вони мають радіус дії кілька сотень метрів і можуть вільно проходити крізь бар'єри. Одиниця виміру - Кл/кг (кулонів на кілограм). Енергія, що випромінюється радіоактивними речовинами, поглинається організмом і викликає іонізацію атомів і молекул матеріалу, руйнуючи молекули тканин і клітин.

Біологічна дія іонізуючого випромінювання залежить від загальної дози, тривалості опромінення, типу випромінювання, розміру опроміненої поверхні та індивідуальних особливостей організму. Найважливішою характеристикою іонізуючого випромінювання є еквівалентна доза випромінювання (ЕДВ) - кількість енергії, поглинутої одиницею речовини з урахуванням якості випромінювання. ЕДВ - доза випромінювання, що вимірюється в бер (біологічний еквівалент дози рентгенівського випромінювання), яка являє собою кількість енергії, поглинутої 1 кг тканини і є поглинутою дозою 1 рад рентгенівського або - випромінювання. До характеристик належить K_i - коефіцієнт якості ($K_i=1$ для іонізуючого випромінювання). Одиниці вимірювання дози

випромінювання та концентрації радіоактивності: Еквівалентна доза Н - зіверт (Зв), бер, 1 бер = 0,01 Зв; Радіоактивність А- Беккерель (Бк), Кюрі (Ки), 1Ки = $3,7 \times 10^{10}$ Бк. Концентрація радіонукліду в повітрі (у воді) (об'ємна радіоактивність) - Бк/м³, (Бк/л), Ки/м³ (Ки/л), 1Ки/м³ = $3,7 \times 10^{10}$ Бк/м³. Важливою характеристикою є радіоактивність А (Бк), яка виражає кількість радіоактивного матеріалу через кількість природних перетворень за одиницю часу: $A = 1,3 \times 10^{16} / M T_{1/2}$, (де М - масова кількість радіонуклідів, $T_{1/2}$ - період напіврозпаду). Основним процесом радіоактивності вважається однократний розпад з випромінюванням частинок, нейтронів і радіації; припускаючи, що один розпад відбувається в секунду, відповідна інтенсивність розпаду (радіоактивність) зазвичай оцінюється в 1 Беккерель (Бк). Природні будівельні матеріали є джерелами радіації (наприклад, радон).

Випромінювання, зафіксоване в конкретному місці, називається фоновим іонізуючим випромінюванням і складається з:

- природного фонового випромінювання від радіонуклідів, присутніх у навколишньому середовищі

- технологічно посиленого природного фонового випромінювання в результаті людської діяльності - штучних джерел випромінювання (напр., радіо ізотопні прилади, детектори гамма-випромінювання).

Середньорічна еквівалентна доза фонового випромінювання становить 24-250 мбер: - внутрішнього опромінення - 135 мбер; - наземного джерела випромінювання - 35 мбер; - космічних променів – 30 мбер; - рентгенівської діагностики - 35-40 мбер; - інших - 2-5 мбер. Джерела з радіоактивністю вище фонові :- довгоживучі радіоізотопи; - продукти випробувань ядерної зброї; - періодичні та аварійні викиди радіоактивних матеріалів з атомних електростанцій та автомобільних ядерних енергетичних установок; - тверді та рідкі радіоактивні відходи.

Одноразове сумарне опромінення до : менше 50 мбер викликає відсутність клінічних симптомів; 50-100 мбер - легку втому; 100-200 мбер - легку променеву хворобу; 200-400 бер - важку променеву хворобу; 600 бер і більше - дуже важку (смертельну). Норми радіаційної безпеки ґрунтуються на принципах: - не перевищення встановлених дозових меж; - виключення переопромінення; - максимальне зниження доз опромінення. Категорії людей, які піддаються впливу радіації, визначаються наступним чином:

- Категорія А (працівники): люди, які працюють з джерелами іонізуючого випромінювання на постійній або тимчасовій основі.

- Категорія В: частина населення, що проживає в безпосередній близькості від підприємства з джерелами іонізуючого випромінювання.

Контрольні питання до розділу 7

1. У чому полягає механізм впливу електричного струму на організм людини?
2. Від яких властивостей залежить теплова дія струму на організм людини?
3. Дайте визначення поняття «фібриляція серця».
4. Яку величину дорівнює мінімальний опір тіла людини впливу сили струму?
5. Який час є тривалим часом дії струму на організм людини?
6. За яких обставин може виникнути електрична дуга?
7. За яких умов доцільно використовувати трифазну чотирипровідну електричну мережу?
8. У якому разі людина може опинитися під напругою дотику?
9. У якому разі "напруга кроку" досягає максимального значення?
10. За якої умови напруга кроку дорівнює нулю?
11. Які засоби захисту використовують у нормальному режимі роботи електроустановки?
12. У чому полягає відмінність захисного заземлення від занулення?
13. Що є причиною виникнення зарядів статичної електрики?
14. У чому полягає класифікація виробничих приміщень залежно та умовами довкілля?
15. З яких елементів складається структурна схема устрою захисного відключення?
16. Які джерела іонізуючих випромінювань відносяться до закритих?

17. Які основні засади забезпечення радіаційної безпеки під час роботи із «закритими» джерелами?
18. Які джерела іонізуючих випромінювань належать до відкритих?
19. Які групи радіонуклідів умовно виділяють за радіотоксичністю?
20. Якими є основні принципи, покладені в основу системи захисту при роботі з відкритими радіоактивними речовинами?
21. Дайте опис поняття "радіаційна асептика".
22. Як здійснюється очищення робочих поверхонь від радіоактивних забруднень?

РОЗДІЛ 8 АЛЬТЕРНАТИВНА ЕНЕРГЕТИКА

Альтернативна енергетика – енергетика, заснована на використанні відновлюваних джерел енергії (ВІЕ) – енергії вітру, сонячного випромінювання, припливів та тепла Землі. Альтернативна енергетиці, заснованій на спалюванні викопного палива, насамперед органічного походження.

Оскільки ВДЕ не тільки відновлювані, але також екологічні та безпечні, деякі розвинені країни світу взяли курс на прискорений розвиток альтернативної енергетики. Особливо далеко в цьому напрямку просунулися Данія, Німеччина та деякі інші європейські країни, де альтернативна енергетика становить значну частку в енергосистемі країни.

Не всі альтернативні джерела енергії однаково доступні та вигідні. Енергія припливів та геотермальна енергія жорстко локалізовані та обмежені, тому реальну економічно реалізовану альтернативу спалюванню палива сьогодні можуть скласти лише вітер та сонячна радіація. Біопаливо, наприклад етанол із цукрової тростини, може мати деяке значення для забезпечення транспорту за високих цін на нафту, але не для енергетики в цілому. Слід, втім, відзначити, що для основної частини деяких територій вітрова та сонячна енергетика також є досить жорстко локалізованими та обмеженими.

Традиційна гідроенергетика (гідроелектростанції на річках) також відноситься до ВДЕ, але через свою масштабність і традиційності зазвичай залишається за дужками, коли йдеться про альтернативні джерела енергії. Якщо ж застосовувати термін поновлювана енергетика, про ГЕС забувати не можна. Іноді до альтернативної енергетики відносять також ядерну енергетику .

Єдиного визначення альтернативних джерел енергії немає. Зазвичай до них відносять джерела не пов'язані зі спалюванням відновлюваного викопного палива. Однак гідроенергетика і навіть ядерна енергетика може ставитись різними авторами і до альтернативних, і до традиційних джерел енергії, хоча альтернативність традиційної гідроенергетики цілком очевидна. Подальші можливості розвитку гідроенергетики обмежені. Тому далі як альтернативи, домінуючій сьогодні традиційній енергетиці будуть розглянуті вітрова, сонячна та «не альтернативна» ядерна енергетика, хоча європейські країни, що інтенсивно розвивають безпечну вітрову та сонячну енергетику, сьогодні намагаються позбутися насамперед ядерної, а чи не традиційної енергетики.

У 2013 році в енергетику ВДЕ обсяг світових інвестицій склав 250 млрд доларів, а 1100 млрд доларів інвестовано в видобуток, транспортування та переробку викопного палива та будівництво теплових електростанцій на викопному паливі (не урані). У 2012 році МЕА зазначило, що споживання вугілля продовжує зростати швидше за всі відновлювані джерела енергії.

До традиційної енергетики відносять вугільні та газові теплові електростанції, а також ТЕЦ, що працюють на мазуті. З погляду екології найбільші нарікання викликає спалювання вугілля та мазуту. В результаті цього в атмосферу викидається велика кількість вуглекислого газу, окису сірки та золи. Збільшення змісту вуглекислоти в атмосфері, на думку вчених, може призвести до небажаної зміни клімату планети. Окис сірки викликає кислотні дощі, попіл може сильно забруднювати середовище у регіоні розташування електростанції. Спалювання газу забруднює атмосферу у всіх відносинах меншою мірою і поки що дає найдешевшу традиційну енергію, але розвідані запаси газу на відміну вугілля дуже обмежені. При існуючому рівні видобутку відомих запасів вистачить 50-60 років.

Сьогодні традиційна енергетика є основним джерелом енергії для людства. Ядерна енергетика, яку іноді відносять до традиційної, має суттєві відмінності. По-перше, перспективи вичерпання запасів палива, з урахуванням технологій напрацювання нового палива в реакторах, набагато віддаленіші. По-друге, вона не забруднює атмосферу ні вуглекислим газом, ні окисом сірки. По-третє, паливо ядерної енергетики не є цінною сировиною для інших галузей промисловості.

Основними перевагами традиційної та ядерної енергетики є стабільність вироблення енергії та відносна свобода розміщення (не локальність).

Транспортування ядерного палива не викликає суттєвих витрат, трубопроводами газ і нафту можна відносно дешево переміщати на великі відстані, рентабельність вугільних станцій від розміщення залежить суттєвіше, але з драматично.

8.1 Енергетика відновлювальних джерел

Очевидними перевагами ВІЕ є безпека, екологічність та практична невичерпність потоку енергії. Однак ВІЕ мають і суттєві недоліки. Це нестабільність, локальність та сезонність.

Нестабільність - це основна проблема відновлюваних джерел. Вироблення енергії вітру та сонця сильно залежить від погоди, яка некерована та в довготривалому плані непередбачувана. Потік сонячної енергії залежить від доби. Тому коли частка «альтернативної енергії» досягає суттєвої величини у загальному виробленні енергії, виникає проблема її накопичення під час пікового вироблення та компенсації втрат під час безвітряної чи похмурої погоди та вночі. Наприклад, Данія, яка сьогодні понад 40% електроенергії генерує вітрогенераторами, вирішує проблему стабільності за допомогою сусідів. У вітряну погоду енергія накопичується за допомогою підйому води на спеціальних норвезьких та шведських гідровузлах у верхні водосховища. У тиху погоду ці гідровузли працюють як ГЕС та повертають енергію. Німеччина у вітряні та сонячні дні скидає надлишок енергії до Польщі та Чехії. Однак пікові навантаження вже створюють проблеми для енергомереж цих країн. Для подальшого збільшення частки відновлюваної енергії необхідна модернізація електромереж в Європі та розвиток потужної системи енергонакопичувачів.

Якість яких сьогодні виступають в основному звичайні та спеціалізовані гідроелектростанції. Якщо вироблення альтернативної енергії у всій Європі стане порівняною з виробленням енергії традиційною енергетикою, то нестабільність стане проблемою для всієї енергосистеми. Технічні шляхи вирішення цієї проблеми поки не зрозумілі, але її рішення, безумовно, вимагатиме нових витрат.

Локальність вітроенергетики пов'язана з тим, що потужність вітрогенератора пропорційна кубу швидкості вітру. При падінні швидкості вдвічі потужність падає у вісім разів.

Приблизно також змінюється собівартість енергії. Тому при сучасному розвитку технологій вітрогенератори рентабельно розміщувати тільки на узбережжі океанів та відкритих морів, де постійно дмуть сильні вітри. Локальність сонячної енергетики пов'язана з тим, що сумарний потік сонячної енергії залежить від широт, розміщення станції та числа сонячних днів у цій місцевості.

Сезонність ВДЕ пов'язана з тим, що потік сонячної енергії, а іноді і середня швидкість вітру залежить від пори року.

8.2 Вітроенергетика

Існують вітрогенератори з вертикальною та горизонтальною віссю обертання ротора. Конструкція перших простіше, але другі мають більший ККД, що досягає 30-40%. Тому для промислової вітроенергетики використовуються генератори з горизонтальною віссю ротора переважно з потужностями від 1 до 2.5 МВт і діаметром ротора від 50 до 80 м. Існують і вітрогенератори потужністю 8 МВт.

Витрати на вітроенергетику зводяться майже виключно до будівництва, а вартість енергії поступово наближається до вартості "традиційної" енергії. В силу шуму та вібрації вітрогенератори ставлять на відстані від житлових будинків 300 та більше метрів, але безпосередньо під вітрогенераторами можна продовжувати сільськогосподарське виробництво. Поки що існує безліч перспективних майданчиків для розміщення потужностей на березі та в морі. У, зокрема, Німеччина, Данії та Нідерландах збираються створити на Північному морі острів для великої вітроелектростанції. У 2014-2015 роках у Данії за допомогою вітрогенераторів вироблялося 42% всієї електрики, у Португалії 27%; в Нікарагуа 21%, в Іспанії 20%, в Ірландії 19%, у Німеччині 8%, а в Європейському Союзі 7,5%. На початок 2016 року загальна встановлена потужність усіх вітрогенераторів становила 432 гігавата і перевершила сумарну встановлену потужність атомної енергетики. Однак, існує так званий capacity factor (Коефіцієнт використання встановленої потужності - КИУМ), який визначає ефективність роботи електрогенератора. За даними US Energy Information Administration (EIA), на 2015 цей коефіцієнт для атомних електростанцій становив 92.3% від встановленої потужності, для вітрогенераторів – 32,2% від встановленої потужності. Застосовувати ці значення для генеруючих потужностей у всьому світі не зовсім правильно, але ставлення навряд чи сильно відрізнятиметься.

На сьогоднішній день вітроенергетика це економічно найперспективніший вид ВДЕ і розвивається за експонентом. Її потенціал дуже великий. Вітряна берегова лінія континентів протяжна. Станції можна будувати як на березі, а й у море. До того ж сьогодні промисловий вітер використовується лише на висоті 200 м від поверхні Землі.

8.3 Сонячна енергетика

Існують два основні різновиди сонячних електростанцій. На станціях першого типу (геліоконцентратори) вода нагрівається світлом, яке концентрується за допомогою системи керованих дзеркал. Ці станції достатньо складні у конструкції. Станції другого типу становлять батарею фотоелементів. Вартість фотоелементів досить висока, а ККД вбирається у 20 %.[1] Однак така станція не тільки проста в конструкції, а й у чистій атмосфері, наприклад у горах, практично не потребує обслуговування. Сьогодні вартість енергії фотоелектричних станцій суттєво нижчі, ніж геліоконцентраторів, і продовжує знижуватися. Тому фотоелектричні станції займають домінуюче місце за кількістю виробленої енергії та над ринком. Вони широко використовуються і для промислового виробництва, та у домогосподарствах. Недоліками сонячної енергетики в порівнянні з вітроенергетикою є:

жорстка залежність вироблюваної потужності від часу суток,

жорстка сезонність ,

нерентабельність у високих широтах,

значна площа електростанції ,

необхідність періодичного очищення фотоелементів.

У зв'язку з цими недоліками, суттєвими для розвитку галузі в окремо взятій європейській країні, встановлені потужності сонячної енергетики сьогодні поступаються встановленим потужностям вітроенергетики.

Стабільність вироблення сонячної енергії, як основної у всі сезони теоретично можуть забезпечити Саудівська Аравія чи Єгипет, але не європейські країни. І навіть африканським країнам доведеться вирішувати проблему нічного енергопостачання за допомогою енергонакопичувачів.

Тим не менш, сонячна енергетика сьогодні також розвивається за експоненційним законом , а її потенціал глобально практично невичерпний вже на рівні сучасних технологій.

Теоретично покриття відносно зовсім невеликої площі пустель північної та південної Африки, Америки, Австралії та Азії сучасними фотоелементами та об'єднання цих електростанцій у світову мережу може певною мірою забезпечити людство чистою і, в силу глобальності, стабільною енергією. Для реалізації проекту необхідне вирішення лише двох проблем, однієї технічної та однієї політичної. По-перше, треба

забезпечити доставку цієї енергії до всіх місць її споживання. По-друге, потрібен один світовий уряд для всього людства.

8.4 Ядерна енергетика

Ядерна енергетика забезпечує стабільне енергопостачання та дозволяє практично необмежено нарощувати потужності, а при безаварійній роботі не завдає шкоди довкіллю. Експлуатація атомної станції щодо дешева, основні витрати йдуть на будівництво. Вартість будівництва сьогодні досягла 4000 \$ / кВт в США, 2000 \$ / кВт -4000 \$ / кВт у Франції та в Китаї 1600 \$ / кВт [16]. Головний недолік ядерної енергетики у тому, що у разі аварії значна територія може бути піддана довготривалому радіоактивному зараженню. Тому низка країн, насамперед із високою щільністю населення, взяли курс на згортання ядерної енергетики. Відмова від ядерної енергетики.

Італія закрила всі АЕС і повністю відмовилася від ядерної енергетики. Бельгія, Німеччина, Іспанія, Швейцарія, Тайвань здійснюють довгострокову політику щодо відмови від ядерної енергетики. Багато інших країн, які не мали АЕС, відмовилися від програм розвитку ядерної енергетики, що призвело до скорочення частки ядерної енергетики у виробництві енергії. Однак провідні економічні держави, окрім Німеччини, не згортають ядерну енергетику, а Китай та Індія активно її розвивають.

Німецька програма енергетичного повороту поставила за мету до 2050 року забезпечувати потреби країни в енергії на 80 відсотків із відновлюваних джерел. У 2013 році 25 відсотків споживаної в країні електроенергії вироблялося із відновлюваних джерел. Однак ціни на електроенергію зросли і необхідні вкладення для будівництва нових електромереж. Уряд Німеччини звільняє заводи з виробництва алюмінію від «зелених» націнок за електроенергію для збереження їхньої конкурентоспроможності.

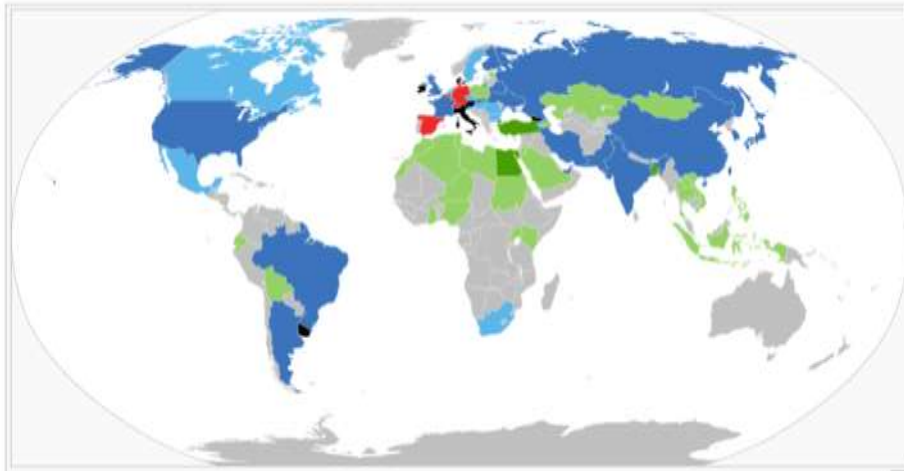


Рисунок 8.1 - Ядерна енергетика у світі (синім позначені ті ареали, де АЕС експлуатуються та на яких також будуються нові енергоблоки, блакитним – АЕС, експлуатуються та на яких планується будівництво нових енергоблоків, темно-зеленим — де немає АЕС, світло-зеленим — де немає АЕС, планується будівництво нових енергоблоків, жовтим — де експлуатуються АЕС, будівництво нових енергоблоків наразі не планується, червоним – де експлуатуються АЕС, розглядається скорочення їхньої кількості, чорним – де цивільна ядерна енергетика заборонена законом, сірим – де немає АЕС

Хоча зростання частки ВДЕ в електроенергетиці значне, говорити про перехід на відновлювані джерела поки не доводиться. У 2016 році порівняно з 2004 ВДЕ компенсували скорочення ядерної енергетики, але частка споживання вугілля скоротилася незначно, а частка споживання газу навіть зросла, ВІЕ включають і спалювання біомаси.

Таким чином, основної мети переходу на ВДЕ — скорочення викиду в атмосферу вуглекислого газу поки що не досягнуто.

8.5 Економічність різних видів енергетики та проблеми використання

Зовнішніми витратами є витрати, понесені у зв'язку з впливом на здоров'я людей та довкілля, включаючи ризики, що піддаються кількісному виміру, але не входять безпосередньо у вартість електроенергії. Зовнішні витрати не включені у будівництво та експлуатацію будь-яких електростанцій і оплачуються не споживачем, а

суспільством загалом. Європейська комісія у співпраці з Міністерством енергетики США почала в 1991 році проект з метою «подати правдоподібні фінансові показники на пошкодження, які можуть виникнути внаслідок різних способів виробництва електроенергії для ЄС». Згідно з висновками комісії ядерна енергія коштує в середньому 0,4 євроцентів/кВт-год, так само, як і енергія, отримана на гідроелектростанціях; вугілля - більше 4,0 центів (4,1 - 7,3), газ - в межах 1,3 - 2,3 центів, і тільки вітроенергетика має кращі показники зовнішніх витрат, ніж атомна - в середньому 0,1 - 0,2 цента / кВт-год.[16]. Капітальні витрати на будівництво сонячних електростанцій (СЕС) без акумуляторів становлять на даний момент не нижче \$1000/кВт встановленої потужності.

Капітальні витрати на будівництво СЕС з акумуляторами становлять на даний момент не нижче за \$1800/кВт зі свинцево-кислотними акумуляторами і не нижче \$3400/кВт – з літєвими.

Проблема утилізації акумуляторів у тому масштабі, який знадобиться, якщо вони все ж таки знайдуть широке застосування в потужних СЕС, далека від рішення.

Капітальні витрати на будівництво вітроелектростанцій (ВЕЗ) у середньому становлять на даний момент не нижче за \$2000/кВт.

Експлуатаційні витрати вітроелектростанцій можна порівняти з такими ж у ТЕС і значним. Цей тип станцій теж генерує електроенергію коли потрібно, крім маловодних років. Найчастіше потребує масштабного відчуження земель. Утилізація відпрацьованої станції вимагає масивної рекультивациі земель.

Контрольні питання до розділу 8

1. Які процеси лежать в основі одержання біогазу з органічних залишків?
2. У чому переваги використання відновлюваних джерел енергії? 2. Як можна отримати біогаз метан з органічних відходів із перетворенням на теплову енергію?
3. Що розуміємо під біоконверсією?
4. Як одержують біопаливо методом піролізу?
5. Що таке геотермальна енергетика?
6. Що розуміється під геліоенергетикою?
7. Чи впливає сонячна енергетика теплове забруднення атмосфери?
8. Як можна використовувати сонячне світло в екодомі?

9. Якими є особливості геліоенергоактивних планувань будівель?
10. Як влаштований та використовується сонячний колектор?
11. Які особливості морської енергетики?
12. Що таке воднева енергетика?
13. Які існують екологічні обмеження використання невідновлюваних джерел енергії?
14. Опишіть проблему забруднення біосфери продуктами згоряння та шляхи її вирішення?
15. Чи може альтернативне паливо знижувати забруднення довкілля?
16. Які методи отримання альтернативного палива?
17. Опишіть метод отримання етанолу із продуктів рослинництва?
18. Які процеси лежать в основі отримання біогазу з органічних залишків?
19. У чому переваги використання відновлюваних джерел енергії?
20. Як можна отримати біогаз метан з органічних відходів із перетворенням на теплову енергію?
21. Що розуміємо під біоконверсією?
22. Як одержують біопаливо методом піролізу?
23. Що таке геотермальна енергетика?
24. Що розуміється під геліоенергетикою?
25. Чи впливає сонячна енергетика теплове забруднення атмосфери?
26. Як можна використовувати сонячне світло в екодомі?
27. Якими є особливості геліоенергоактивних планувань будівель?
28. Як влаштований та використовується сонячний колектор?
29. Які особливості морської енергетики?

РОЗДІЛ 9 ТЕРМОЯДЕРНА ЕНЕРГЕТИКА

За сучасним фізичним уявленням, існує лише кілька фундаментальних джерел енергії, які, в принципі, можуть бути освоєні та використані людством. Ядерні реакції синтезу - це один з таких джерел енергії. У реакціях синтезу енергія виробляється за рахунок роботи ядерних сил, що здійснюється при злитті ядер легких елементів та утворенні більш важких ядер. Ці реакції широко поширені у природі. Так, наприклад, вважається, що енергія зірок і, в тому числі, Сонця виробляється в результаті ланцюжка ядерних реакцій синтезу, в ході яких чотири ядра атома водню перетворюються на ядро гелію. Можна сказати, що Сонце – це масштабний природний термоядерний реактор, що, зокрема, забезпечує енергією екологічну систему Землі.

В даний час, більше 85% енергії, що виробляється людиною отримується при спалюванні органічних палив - вугілля, нафти та природного газу. Це дешеве джерело енергії, освоєне людиною близько 200 - 300 років тому, яке забезпечило швидкий розвиток людського суспільства, його добробут і, як наслідок, зростання населення Землі. Передбачається, що через зростання населення і більш рівномірного споживання енергії по регіонах, виробництво енергії зросте до 2050 р. приблизно втричі в порівнянні з нинішнім рівнем і досягне 10^{21} Дж на рік. Не викликає сумніву, що в найближчому майбутньому колишнє джерело енергії - органічні палива – доведеться доповнити, а може й замінити на інші види виробництва енергії. Це станеться як через виснаження природних ресурсів, так і через забруднення навколишнього середовища, яке за оцінками фахівців має настати набагато раніше, ніж будуть вироблені дешеві природні ресурси (теперішній спосіб виробництва енергії використовує атмосферу як смітник, викидаючи щодня 17 млн. тонн вуглекислого та інших газів, супутніх спалюванню палив). Перехід від органічних палив до широкомасштабної альтернативної енергетики очікується у середині 21 століття. Передбачається, що майбутня енергетика буде ширше і більш ефективно, ніж нинішня енергетична система, використовувати різноманітні та, в тому числі, відновлювані джерела енергії, такі як: сонячна енергія, енергія вітру, гідроелектроенергія, вирощування та спалювання біомаси та ядерна енергія. Частка кожного джерела енергії у загальному виробництві енергії

визначатиметься структурою споживання енергії та економічною ефективністю кожного з цих джерел енергії.

У сучасних індустріальних суспільствах більше половини енергії використовується для постійного споживання, незалежно від часу доби чи пори року. Ця постійно споживана базова енергія схильна до добових і сезонних коливань. Тому енергетична система повинна складатися з базової енергії, яка забезпечує суспільство постійним або квазіпостійним постачанням енергії, і додаткових енергетичних ресурсів, які використовуються в разі потреби. Очікується, що відновлювані джерела енергії, такі як сонячна енергія та спалювання біомаси, використовуватимуться переважно як змінна складова енергоспоживання. Ядерна енергія є головним і єдиним кандидатом на роль базової складової енергоспоживання. Наразі єдиними реакціями, освоєними для виробництва енергії, є реакції поділу, які використовуються на сучасних атомних електростанціях. Керований термоядерний синтез поки що є лише кандидатом на роль базового компонента виробництва енергії. Які переваги термоядерний синтез має над реакціями поділу? І чи можна розвивати термоядерну енергетику у великих масштабах? Головна і фундаментальна відмінність полягає в тому, що тут немає довгоживучих радіоактивних відходів, які характерні для реакторів поділу. Хоча під час роботи термоядерного реактора перший захисний контур активується нейтронами, вибір відповідних низькоактивних конструкційних матеріалів відкриває принципову можливість реалізації термоядерного реактора, в якому індукована радіоактивність в першому захисному контурі повністю знижується до безпечного рівня протягом 30 років після зупинки реактора. Це означає, що реактор, який закінчує свій термін експлуатації, може бути залишений на 30 років, після чого матеріал може бути перероблений і використаний в новому термоядерному реакторі. Це на відміну від реакторів поділу, які генерують радіоактивні відходи, що підлягають переробці, захороненню та зберіганню протягом десятків тисяч років. Крім того, що термоядерна енергетика менш радіоактивна, вона має майже невичерпні запаси палива і необхідних матеріалів і може виробляти енергію протягом сотень і навіть тисяч років. Через ці переваги найбільші ядерні держави розпочали масштабні дослідження керованого термоядерного синтезу в середині 1950-х років. На той час СРСР і США вже успішно випробували водневу бомбу, підтвердивши можливість використання енергії термоядерного синтезу на Землі; у 1956 році ці

дослідження були розсекречені, і з того часу контрольований термоядерний синтез проводився в більш широких міжнародних рамках. Дослідження керованого термоядерного синтезу були розсекречені в 1956 році і відтоді проводяться в широких міжнародних рамках. Лише через кілька років було створено водневу бомбу, і тоді вважалося, що мета близька і що термоядерна плазма буде вироблятися на перших великомасштабних експериментальних установках, побудованих наприкінці 1950-х років. Однак знадобилося понад 40 років досліджень, щоб створити умови, в яких кількість енергії, що виділяється при термоядерному синтезі, була порівнянна з потужністю для нагрівання реакційної суміші; в 1997 році найбільша в Європі термоядерна установка ТОКАМАК (JET) наблизилася до цієї межі з потужністю термоядерного синтезу в 16 МВт. У чому була причина такої затримки? Насправді, в тому, що для досягнення мети фізики та інженери виявили, що їм довелося вирішити багато проблем, про які вони не знали на початку свого шляху. За останні 40 років з'явилася наука фізика плазми, яка дозволила нам зрозуміти і описати складні фізичні явища, що відбуваються в реакційноздатних сумішах. Інженерам довелося вирішувати не менш складні проблеми, такі як навчання створенню великих глибоких вакуумів, вибір і тестування відповідних конструкційних матеріалів, проектування великих надпровідних магнітів, потужних лазерних і рентгенівських джерел, розробка імпульсних енергетичних систем, здатних виробляти потужні пучки частинок, і розробка методів радіочастотного нагріву суміші. Розділ містить огляд досліджень у галузі термоядерного синтезу з магнітною підтримкою. Основна частина цього розділу стосується найсучасніших магнітних систем утримання плазми, таких, як ТОКАМАК. Основна увага приділена дослідженням, пов'язаним з керованим термоядерним синтезом. Література про керований термоядерний синтез обширна. Зокрема, будуть згадані як ті, що вже стали класичними, написані основоположниками досліджень керованого термоядерного синтезу [19,20], так і ті, що з'явилися порівняно недавно, наприклад, ті, що описують сучасний стан досліджень керованого термоядерного синтезу [21].

9.1 Фізичні основи керованого термоядерного синтезу

Хоча ядерних реакцій синтезу, що призводять до виділення енергії досить багато, для практичних цілей використання ядерної енергії, інтерес представляють лише реакції наведені нижче (ми використовуємо стандартне позначення ізотопів водню: p – протон з атомною масою 1, D – дейтрон, з атомною масою 2 і T – тритій, ізотоп з масою 3). Усі ядра, що у цих реакціях крім тритію стабільні. Тритій – це радіоактивний ізотоп водню в період напіврозпаду 12.3 років. В результаті β -розпаду він перетворюється на He_3 , випромінюючи низькоенергійний електрон. На відміну від ядерних реакцій поділу, реакції синтезу не виробляють довгоживучих радіоактивних уламків важких ядер, що дає принципову можливість створити "чистий" реактор, не обтяжений проблемою довготривалого зберігання радіоактивних відходів.

Ядерні реакції, що становлять інтерес для керованого термоядерного синтезу (реакція /Енергетичний вихід, q , (MeV)):

1. $D + T = He_4 + n$, 17.6
2. $D + D = He_3 + n$, 3.27
3. $D + D = T + p$, 4.03
4. $D + He_3 = He_4 + p$, 18.4
5. $p + B_{11} = 3He_4$, 8.7
6. $Li_6 + n = He_4 + T$, 4.8
7. $Li_7 + n = He_4 + T + n$, 2.47

Усі реакції, наведені вище, крім останньої, відбуваються з виділенням енергії у вигляді кінетичної енергії продуктів реакцій, q яка вказана в дужках в одиницях мільйонів електронвольт (MeV), ($1 \text{ eV} = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж} = 11600 \text{ }^\circ \text{K}$). Дві останні реакції відіграють особливу роль у керованому термоядерному синтезі - вони використовуються для виробництва тритію, якого не існує в природі. Ядерні реакції синтезу 1-5 мають відносно велику швидкість реакцій, яку прийнято характеризувати перетином реакції, σ . Перерізи вищенаведених реакцій показані на рис. 9.1, як функція енергії стикаючихся частинок у системі центру мас.

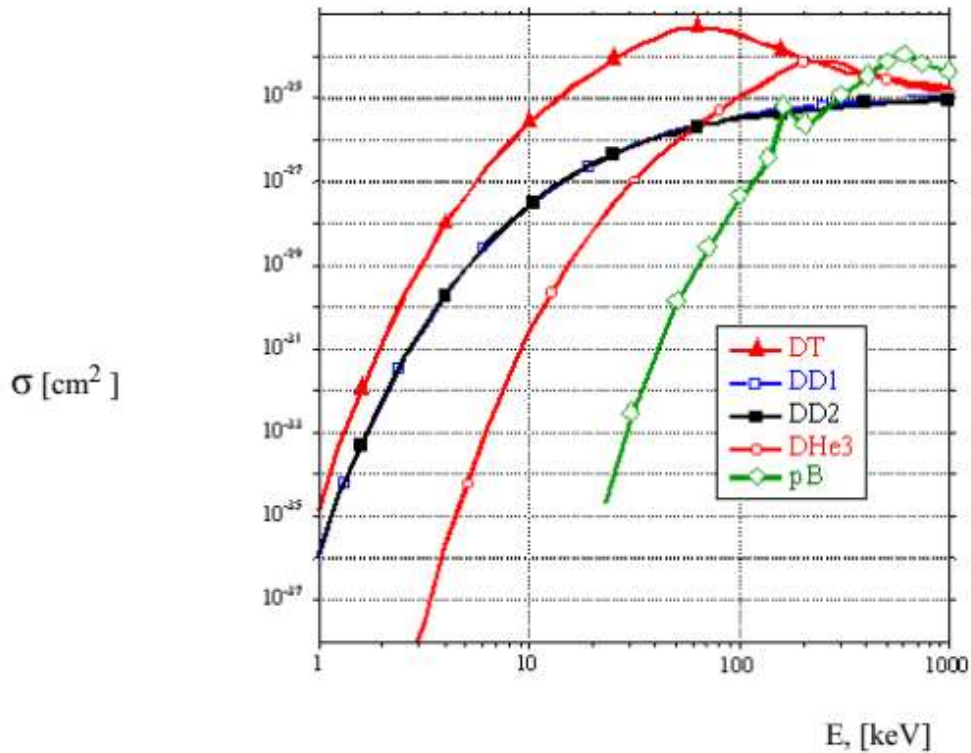


Рисунок 9.1 - Переріз деяких термоядерних реакцій , як функція енергії частинок у системі центру мас

Через наявність кулонівського відштовхування між ядрами, перерізи реакцій при низькій енергії часток мізерно малі, і, тому, за нормальної температури суміш ізотопів водню та інших легких атомів, практично, не реагує. Для того, щоб будь-яка з цих реакцій мала помітний переріз, частинкам, що стикаються, потрібно мати велику кінетичну енергію. Тоді частки зможуть подолати кулонівський бар'єр, зблизитись на відстань порядку ядерних і прореагувати. Наприклад, максимальний переріз для реакції дейтерію з тритієм досягається, при енергії частинок близько 80 КэВ, а для того, щоб DT суміш мати велику швидкість реакцій, її температура має бути масштабу ста мільйонів градусів, $T = 10^8$ °К.

Найпростіший спосіб отримання енергії ядерного синтезу, який відразу спадає на думку, це використовувати прискорювач іонів і бомбардувати, скажімо, іонами тритію, прискореними до енергії 100 Кев, тверду або газову мету, що містить іони дейтерію. Однак, інжектвані іони занадто швидко сповільнюються, зіштовхуючись із холодними електронами мішені, і не встигають виробити енергію достатню для того, щоб покрити енергетичні витрати на їх прискорення, незважаючи на величезну різницю у вихідній (порядку 100 КэВ) і виробленої реакції

енергії (порядку 10 MeV). Іншими словами, за такого “способу” виробництва енергії коефіцієнт відтворення енергії, $Q_{fus} = P_{синтез}/Витрати$ буде менше за 1.

Для того, щоб збільшити Q_{fus} можна підігріти електрони мішені. Тоді швидкі іони будуть гальмуватися повільніше і Q_{fus} зростатиме. Однак, позитивний вихід досягається тільки при дуже високій температурі мішені - близько кількох КэВ. За такої температури інжекція швидких іонів вже не важлива, в суміші існує достатня кількість енергійних теплових іонів, які самі вступають у реакції. Іншими словами, у суміші відбуваються термоядерні реакції або термоядерний синтез.

Швидкість термоядерних реакцій можна розрахувати, проінтегрувавши переріз реакції, показаний на Рис.9.1, за рівноважною максвеллівською функцією розподілу частинок. В результаті, можна отримати швидкість реакцій, $K(T)$, яка визначає число реакцій, що відбуваються в одиниці обсягу, $n_1 n_2 K(T)$, і об'ємну щільність виділення енергії в реагуючій суміші

$$P_{fus} = q n_1 n_2 K(T) \quad (9.1)$$

В останній формулі $n_1 n_2$ - об'ємні концентрації компонентів, що реагують, T – температура реагуючих частинок та q - енергетичний вихід реакції .

При високій температурі, характерної для реагує суміші, суміш знаходиться в стані плазми, тобто. складається з вільних електронів та позитивно заряджених іонів, які взаємодіють один з другим за рахунок колективних електромагнітних полів. Самоузгоджені з рухом частинок плазми електромагнітні поля визначають динаміку плазми та, зокрема, підтримують її квазінейтральність. З дуже великою точністю, щільність зарядів іонів та електронів у плазмі рівні між собою, $n_e = Z n_z$, де Z – заряд іона (для ізотопів водню $Z = 1$). Іонна та електронна компоненти обмінюються енергією, за рахунок кулонівських зіткнень і при параметрах плазми, типових для термоядерних додатків, їх температура приблизно рівні.

За високу температуру суміші доведеться платити додатковими енергетичними витратами. По-перше, потрібно врахувати гальмівне випромінювання, яке випускається електронами при зіткненні з іонами :

$$P_b (W l m^3) = 5.3 \cdot 10^{-37} n_e n_z Z^2 \sqrt{T (keV)} \quad (9.2)$$

Потужність гальмівного випромінювання, як і потужність термоядерних реакцій у суміші, пропорційна квадрату щільності плазми і тому відношення P_{fus}/P_b залежить тільки від температури плазми.

Гальмівне випромінювання, на відміну від потужності термоядерних реакцій, слабо залежить від температури плазми, що призводить до наявності нижньої межі за температурою плазми, при якій потужність термоядерних реакцій дорівнює потужності гальмівних втрат, $P_{\text{fus}}/P_b = 1$. При температурі нижче порогової потужність гальмівних втрат перевищує термоядерне виділення енергії, і тому в холодній суміші позитивний вихід енергії неможливий. Найменшу граничну температуру має суміш дейтерію з тритієм, але і в цьому випадку температура суміші повинна перевищувати 3 КэВ ($3.5 \cdot 10^7$ °К). Порогові температури для DD і DHe3 реакцій приблизно на порядок вище, ніж для DT реакції. Для реакції протона з бором гальмівне випромінювання за будь-якої температури перевищує вихід реакції і, тому, для використання цієї реакції потрібні спеціальні пастки, у яких температура електронів нижче, ніж температура іонів, або щільність плазми настільки велика, що випромінювання поглинається робочою сумішшю.

Крім високої температури суміші, для позитивного виходу реакцій потрібно, щоб гаряча суміш проіснувала досить довго, і реакції встигли відбутися. У будь-якій термоядерній системі з кінцевими розмірами існують додаткові до гальмівного випромінювання канали втрати енергії плазми (наприклад, за рахунок теплопровідності, лінійного випромінювання домішок та ін.), потужність яких не повинна перевищувати термоядерний поріг енерговиділення. У загальному випадку додаткові втрати енергії можна охарактеризувати енергетичним часом життя плазми t_E , визначеним таким чином, що відношення $3nT/t_E$ дає потужність втрат в одиниці плазмового об'єму. Очевидно, що для позитивного виходу необхідно, щоб термоядерна потужність перевищувала потужність додаткових втрат, $P_{\text{fus}} > 3nT / t_E$, що дає умову на мінімальний добуток щільності на час життя плазми, $n t_E$. Наприклад, для DT-реакції необхідно, щоб

$$n t_E > 5 \cdot 10^{19} \text{ s/m}^3 \quad (9.3)$$

Цю умову прийнято називати критерієм Лоусона (строго кажучи, в оригінальній роботі [7] критерій Лоусона був виведений для конкретної схеми термоядерного реактора і, на відміну від (9.3), і включав в себе к.п.д. перетворення теплової енергії на електричну). У тому вигляді, в якому він записаний вище, критерій, практично, не залежить від термоядерної системи та є узагальненою необхідною умовою позитивного виходу. Критерій Лоусона для інших реакцій на один-два порядку вищий, ніж для

DT реакції, вищій і порогова температура. Близькість пристрою до досягнення позитивного виходу прийнято зображати на площині $T - n\tau_E$, що показано на рис.9.2.

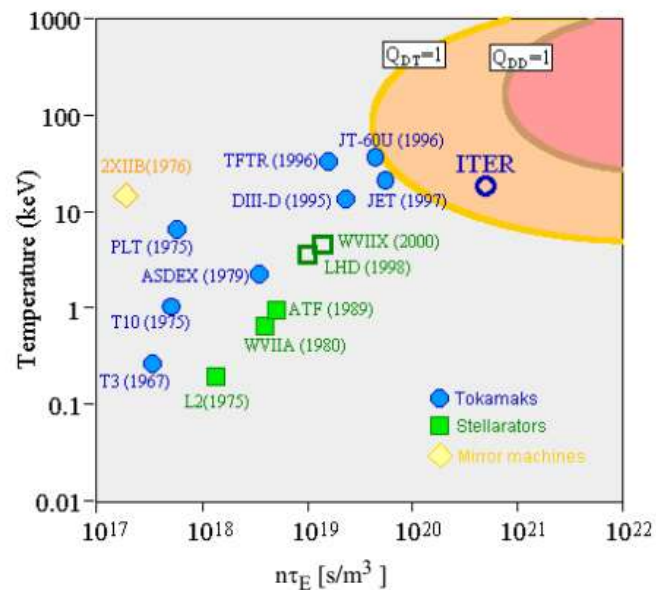


Рисунок 9.2 - Область із позитивним виходом ядерної реакції на площині $T - n\tau_E$. Показані досягнення різних експериментальних установок щодо утримання термоядерної плазми

Видно, що DT-реакції легко здійсненні - вони вимагають істотно меншої температури плазми, ніж DD-реакції та накладають менш жорсткі умови на її утримання. Сучасна термоядерна програма націлена на здійснення керованого синтезу DT. Таким чином, керовані термоядерні реакції, в принципі, можливі і основне завдання термоядерних досліджень - це розробка практичного устрою, який міг би конкурувати економічно з іншими джерелами енергії.

Всі винайдені за 50 років пристрої можна розділити на два великі класи: 1) стаціонарні або квазістаціонарні системи, засновані на магнітному утриманні гарячої плазми; 2) імпульсні системи.

У першому випадку щільність плазми невелика і критерій Лоусона досягається за рахунок утримання енергії в системі, тобто. великого енергетичного часу життя плазми. Тому, системи з магнітним утриманням мають характерний розмір плазми близько декількох метрів і відносно низька щільність плазми, $n \sim 10^{20} \text{ м}^{-3}$ (це приблизно в 105 разів нижче, ніж густина атомів при нормальному тиску та кімнатній температурі).

В імпульсних системах критерій Лоусона досягається за рахунок стиснення термоядерних цілей лазерним або рентгенівським

випромінюванням та створення суміші з дуже високою щільністю. Час життя в імпульсних системах малий і визначається вільним розльотом мішені. Основне фізичне завдання, у цьому напрямку керованого термоядерного синтезу, полягає у зниженні повної енергії вибуху до рівня, який дозволить зробити практичний термоядерний реактор.

Обидва типи систем, вже, впритул підійшли до створення експериментальних машин з позитивним виходом енергії $Q_{\text{fus}} > 1$, де будуть перевірені основні елементи майбутніх термоядерних реакторів. Проте, перш ніж перейти до обговорення термоядерних пристроїв, ми розглянемо паливний цикл майбутнього термоядерного реактора, який великою мірою не залежить від конкретного пристрою системи.

9.2 Паливний цикл термоядерного реактора

Уявімо, що дешевий та економічно конкурентоспроможний пристрій для утримання реагуючої суміші розроблено. Які ж природні ресурси будуть потрібні для термоядерної енергетики? Для того, щоб відповісти на це питання потрібно зрозуміти, як працюватиме термоядерний реактор. Ми почнемо з DT-реакторів, як найбільш легко здійсненних, і потім розглянемо альтернативні види палива.

Принципова схема термоядерного реактора, що працює на суміші дейтерію з тритієм, показана на рис.9.3.

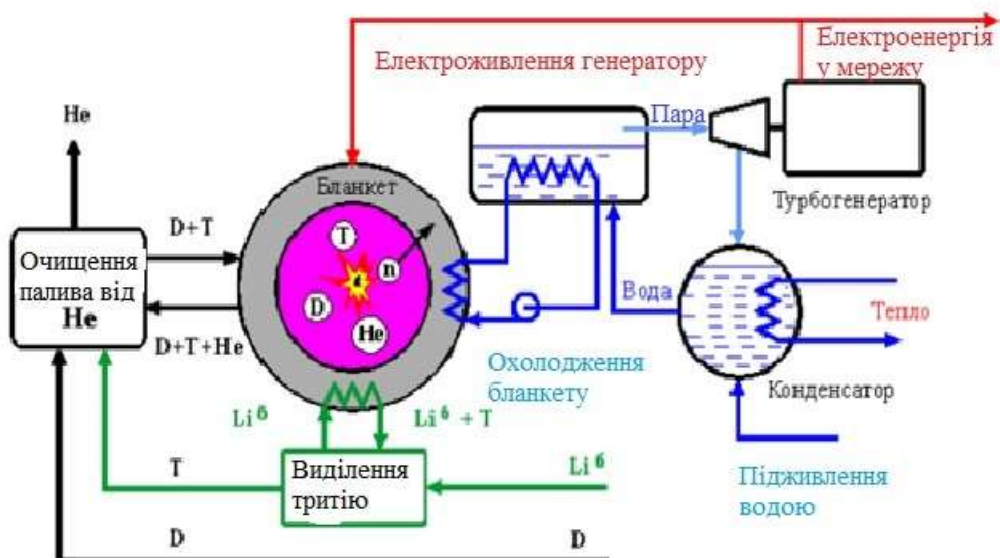


Рисунок 9.3 - Схема основних технологічних контурів термоядерного реактора, що працює на суміші дейтерію (D) та тритію (T)

Енергія термоядерних реакцій, що відбуваються в плазмі, виноситься в основному нейтронами, які поглинаються у бланкеті. Тепло, що виділяється в бланкеті, знімається теплоносієм першого контуру охолодження і використовується для отримання електроенергії. Реактор вимагає постачання дейтерієм та літієм. Тритій напрацьовується з літію у процесі роботи реактора. Енергія термоядерних реакцій виділяється у вигляді енергійних нейтронів (14.1 MeV) та енергійних іонів гелію - альфа-часток (3.5 MeV), поглинається спеціальним пристроєм оточуючим плазму - бланкетом і знімається теплоносієм першого контуру охолодження.

Перший з двох компонентів DT-реакції, що беруть участь, дейтерій - це стабільний, широко поширений ізотоп водню. Наприклад, у звичайній воді міститься приблизно 0.015% важкої води D₂O. На відміну від дейтерію, тритій немає у природі. Тому тритій напрацьовуватиметься в самому реакторі з ізотопів літію, Li⁶ і Li⁷, які опромінюватимуться нейтронами в бланкеті. Обидва ізотопи літію широко поширені в природі у відсотковому відношенні Li⁶: Li⁷ = 7.5%: 92.5% і, обидва здатні виробляти тритій. У разі використання Li⁶, у бланкеті виділятиметься додаткова енергія у кількості 4.8 MeV на кожен вироблений атом тритію. На практиці в бланкеті утримуватиметься суміш ізотопів літію та берилій, який буде використовуватися для розмноження нейтронів у реакції



Зміст матеріалів у бланкеті буде підібрано таким чином, щоб оптимізувати вихід тритію.

Можливі різні схеми використання літію у бланкеті. Один з варіантів використовує окисли літію. Тритій видаляється з бланкета при нагріванні потоком гарячого гелію, а потім витягується з гелію в цеху з очищення палива. Інженерні опрацювання бланкета показують, що можна отримати коефіцієнт відтворення тритію на рівні 1.1, що видається достатнім для постачання реактора. Опрацьовувалися й інші схеми, які використовують рідкометалевий літій. У цьому випадку, літій, окрім напрацювання тритію, може виконувати роль теплоносія першого контуру. На схемі, представленій на рисунку 9.3, літієвий цикл показаний умовно у вигляді окремого літієвого контуру. Поєднуючи DT-реакцію з реакцією Li, можна записати:



Енергія термоядерних реакцій, що відбуваються в плазмі, виноситься в основному нейтронами, які поглинаються у бланкеті. Тепло, що

виділяється в бланкеті, знімається теплоносієм першого контуру охолодження і використовується для отримання електроенергії. Реактор вимагає постачання дейтерієм та літієм. Тритій напрацьовується з літію у процесі роботи реактора. Енергія термоядерних реакцій виділяється у вигляді енергійних нейтронів (14.1 MeV) та енергійних іонів гелію - альфа-частинок (3.5 MeV), поглинається спеціальним пристроєм оточуючим плазму - бланкетом і знімається теплоносієм першого контуру охолодження.

Перший з двох компонентів DT-реакції, що беруть участь, дейтерій - це стабільний, широко поширений ізотоп водню. Наприклад, у звичайній воді міститься приблизно 0.015% важкої води D₂O. На відміну від дейтерію, тритію немає у природі. Тому тритій напрацьовуватиметься в самому реакторі з ізотопів літію, Li⁶ і Li⁷, які опромінюватимуться нейтронами в бланкеті. Обидва ізотопи літію широко поширені в природі у відсотковому відношенні Li⁶: Li⁷ = 7.5%: 92.5% і обидва здатні виробляти тритій. У разі використання Li⁶, у бланкеті виділятиметься додаткова енергія у кількості 4.8 MeV на кожен вироблений атом тритію. На практиці в бланкеті утримуватиметься суміш ізотопів літію та берилій, який буде використовуватися для розмноження нейтронів у реакції. Зміст матеріалів у бланкеті буде підібрано таким чином, щоб оптимізувати вихід тритію.

Розглянемо можливі різні схеми використання літію у бланкеті. Один з варіантів [9] використовує окисли літію. Тритій видаляється з бланкета при нагріванні потоком гарячого гелію, а потім витягується з гелію в цеху з очищення палива. Інженерні опрацювання бланкета показують [9], що можна отримати коефіцієнт відтворення тритію на рівні 1.1, що видається достатнім для постачання реактора. Опрацьовувалися й інші схеми, які використовують рідкометалевий літій. У цьому випадку, літій, окрім напрацювання тритію, може виконувати роль теплоносія першого контуру. На схемі, представлений на рисунок 9.3, літієвий цикл показаний умовно у вигляді окремого літієвого контуру. Таким чином, термоядерний реактор спалюватиме дейтерій та літій, а в результаті реакцій буде утворюватися зола – інертний газ гелій.

Термоядерний реактор споживатиме дуже невелику кількість літію та дейтерію. Наприклад, реактор з електричною потужністю 1 ГВт спалюватиме близько 100 кг дейтерію та 300 кг літію на рік, що за умов, скажімо загального виробництва 10²⁰ Дж на рік (а це приблизно половина енергопотреб у майбутньому), приведе до річного споживання дейтерію та

літію в масштабах 1500 і 4500 тонн, відповідно. За таких умов, використання ,скажімо водних ресурсів(воді міститься дейтерію 0.015%) забезпечить людство енергією на мільйони років. Термоядерна енергетика на базі DD-реакції має б практично необмежені енергетичні ресурси. Для DT-циклу енергетичні ресурси обмежені наявними запасами літію. За оцінками [20, 22], розвідані рудні запаси літію становлять $8-10 \cdot 10^6$ тонн. Тільки цих запасів вистачить на багато сотень років. Крім того, літій, хоч і в меншій кількості, ніж дейтерій, міститься в морській воді із середньою концентрацією $1.7 \cdot 10^{-7}$ і загальною кількістю, що перевищує приблизно в 10^3 разів розвідані рудні запаси. Оцінки показують, що витрати на виробництво палива для термоядерної енергетики дають мінімальний внесок у вартість виробленої енергії.

Як уже зазначалося вище, термоядерна енергетика, мабуть, почне використовувати DT-цикл, а потім перейде до інших перспективних палив таким, як DD, DHe₃ або PB. Кожне з цих перспективних палив має свої переваги щодо DT-реакції. Основні переваги DD-реакції полягають у наявності величезних природних ресурсів дейтерію на Землі та відсутність необхідності відтворення тритію. Хоча у DD-реакції менша частка енергії виноситься у вигляді нейтронів, проте, в DD-реакторі, як і в DT-реакторі, відбуватиметься активація першої стінки.

Ще менше нейтронів виробляє DHe₃ суміш, в якій народжуються нейтрони в результаті DD-реакцій. Оптимізація складу суміші та її температури дозволяє зменшити нейтронний потік на порядок величини по порівняно з DT-реакцією, що суттєво знижує вимоги до стійкості матеріалів першої стінки. DHe₃-реакція має відносно високий переріз, але водночас потребує високих температур суміші. Недоліком цієї реакції є практична відсутність He₃ на Землі, що робить освоєння цієї реакції у Земних умовах практично безнадійною справою. У той же час, цього ізотопу багато на поверхні Місяця, і деякі проекти, користуючись тим, що споживання невелике, пропонують добувати це паливо на Місяці і доставляти його на Землю.

Цей цикл можна замкнути енергетично навіть з урахуванням енергії, що витрачається на доставку палива, хоча сумнівно, що ця схема буде здійснена в найближчому майбутньому.

Активація матеріалів реактора принципово відсутня в безнейтронної реакції, що відбувається в суміші водню з бором. Всі продукти цієї реакції є зарядженими частинками, які мають дуже малий пробіг у твердому тілі

та можуть утримуватися магнітними та електричними полями. Останнє відкриває принципову можливість створення низькоактивованих реакторів та усунення низькоефективного теплового циклу із виробництва електроенергії. У разі pV-реакцій електроенергія, в принципі, може вилучатися за допомогою прямого перетворення енергії заряджених частинок на електричну енергію з к.к.д. набагато більшим, ніж у тепловому циклі. На жаль, ці реакції мають ще менші перерізи, ніж DD або DHe₃ реакції та вимагають спеціальних умов для отримання позитивного виходу. Тому, освоєння повністю безнейтронних палив - справа майбутнього.

Таким чином, майбутні термоядерні реактори мають достатні запаси палива для забезпечення потреб людства в енергії протягом багатьох сотень років, а у випадку деяких реакцій і багатьох десятків тисяч років.

Термоядерна енергетика споживатиме дуже невелику кількість вихідних матеріалів і не вимагатиме розвитку широкомасштабного виробництва палив. Сам паливний цикл використовуватиме лише малу частину виробленої енергії та відповідно паливна складова в ціні електроенергії буде незначною. Як вихідні складові робочої суміші, так і кінцеві продукти реакцій не є радіоактивними речовинами та не вимагають довготривалого зберігання. Ці обставини вигідно відрізняють термоядерну енергетика як від звичайних ядерних реакторів поділу, і електростанцій, що спалюють органічні палива.

Основна проблема здійснення керованого термоядерного синтезу полягає у створенні практичного пристрою, здатного забезпечити виконання умови Лоусона за досить високої температури суміші.

9.3 Системи для утримання плазми

9.3.1 Магнітне утримання (ТОКАМАК)

Принцип магнітного утримання полягає у використанні сильного магнітного поля для гарячої ізоляції суміші від першої стінки реактора. Нижче ми розглянемо лише загальні принципи, що лежать в основі магнітного утримання.

При тих температурах, які потрібні для термоядерних реакцій, суміш, що реагує, повністю іонізована і складається з заряджених частинок

іонів та електронів, які рухаються незалежно один від одного з відносно рідкісними зіткненнями між собою. Сила Лоренца, що діє на заряджену частинку в магнітному полі, змушує її обертатися так званим ларморівським колом з радіусом

$$r_L = \frac{mv_{\perp}}{eB} \quad (9.6)$$

Тут m – маса частинки, e – заряд частинки. B - індукція магнітного поля, v_{\perp} - проекція швидкості частинки на напрямок уперек магнітного поля. Уздовж постійного магнітного поля частка може рухатися вільно і, тому, її траєкторія в магнітному полі являє собою спіраль, що навивається на магнітну силову лінію. Збільшуючи магнітне поле, можна зменшити ларморівський радіус частки і зробити його суттєво меншим розмірів системи і, таким чином, перешкодити розльоту плазми вперек магнітного поля. Для того, щоб уникнути поздовжніх до магнітного поля втрат, можна або замкнути силові лінії, або поставити на кінцях силової лінії спеціальні магнітні або електростатичні пробки для заряджених частинок.

Для збільшення об'ємної щільності виділення енергії суміші в реакторі вигідно збільшувати щільність і температуру плазми до таких меж, коли газокінетичний тиск плазми (p) становить помітну частку від тиску магнітного поля B ($2/8$) p . Відношення тиску плазми p до тиску зовнішнього магнітного поля прийнято характеризувати параметром β

$$\beta = \frac{8\pi p}{B^2} \quad (9.7)$$

який відіграє важливу роль у визначенні вартості та економічної ефективності пастки. Чим більше β , тим краще використовується магнітне поле для утримання плазми у пастці. Очевидно, що β не може бути більше 1. В іншому випадку тиску магнітного поля не вистачить для того, щоб утримати тиск плазми і забезпечити її рівновагу. Однак, як показали теоретичні та експериментальні дослідження різних магнітних пасток, тиск плазми, як правило, обмежується не умовою рівноваги плазми, а плазмовими нестійкостями, які призводять до жорсткіших обмежень на максимальну величину β .

Разом з частинками плазми магнітне поле утримуватиме у пастці та заряджені продукти реакцій. В разі DT-реакцій, це альфа-частинки, що народжуються з енергією 3.5 MeV. Охолоджуючи при кулонівських

зіткнення з частинками основної плазми, швидкі заряджені частинки будуть передавати свою енергію плазмі. Це відкриває можливість отримувати режими з термоядерним горінням, що само підтримується і в якому втрати енергії з пастки компенсуються термоядерним нагріванням плазми. В цьому випадку додатковий нагрів плазми не потрібний.

За минулі роки напружених термоядерних досліджень було винайдено та перевірено в експерименті велика кількість різних пристроїв для утримання гарячої плазми. Деякі системи показали себе непрацездатними з перших експериментів. Багато систем потребували багатьох років досліджень перш, ніж стало ясно, що вони програють своїм успішнішим конкурентам. Серед систем, що "вижили" магнітного утримання плазми, в даний час, лідирують ТОКАМАК і СТЕЛАРАТОРИ.

Слово "ТОКАМАК" - це скорочення слів Тороїдальна, Камера, Магнітної Котушки, які описують основні елементи цієї магнітної системи. Схема Токамак показана на рис.9.4.

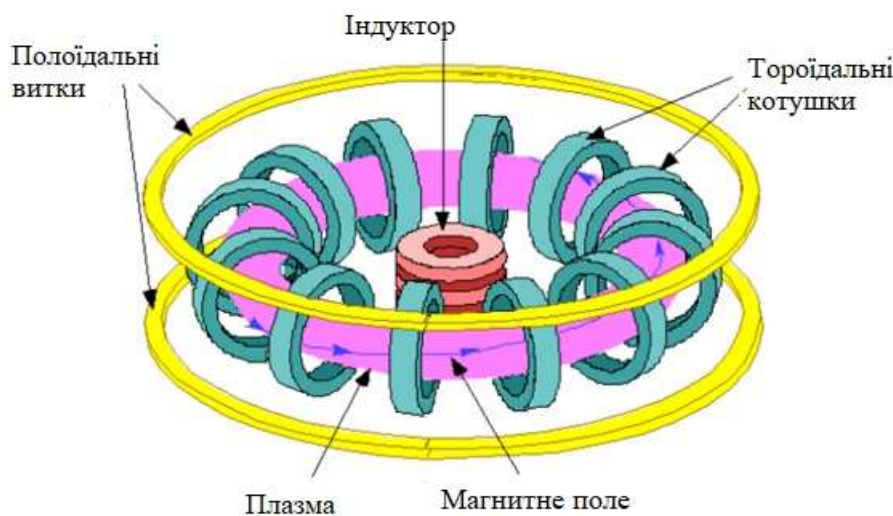


Рисунок 9.4 - Схема важливих вузлів ТОКАМАКа

Основне магнітне поле в тороїдальній камері, що містить гарячу плазму, створюється тороїдальними магнітними котушками. Істотну роль у рівновазі плазми відіграє плазмовий струм, який протікає вздовж тороїдального плазмового шнура і створює полоїдальне магнітне поле, B_p , спрямоване вздовж малого обходу тора. Результуюче магнітне поле має силові лінії у вигляді нескінченних спіралей, що охоплюють центральну лінію плазмового тора – магнітну вісь. Таким чином, силові лінії магнітного поля у ТОКАМАК замкнуті, вкладені одна в одну

тороїдальні магнітні поверхні. Струм у плазмі підтримується вихровим електричним полем, яке створюється первинною обмоткою індуктора. При цьому, плазмовий виток грає роль вторинної обмотки. Очевидно, що індукційна підтримка струму в ТОКАМАЦІ обмежена запасом потоку магнітного поля в первинній обмотці і можлива лише протягом кінцевого часу.

Крім тороїдальних котушок і первинної обмотки індуктора в ТОКАМАКУ повинні бути обмотки полоїда, які потрібні для підтримки рівноваги плазми та контролю її положення в камері. Струми, що поточні в полоїдальних котушках створюють електромагнітні сили, що діють на плазмовий струм і таким чином можуть змінити її положення в камері та форму перерізу плазмового шнура.

Перший Токамак був побудований в Інституті Атомної Енергії ім І.В. Курчатова в 1956 р. Десять років напружених досліджень і вдосконалень цього пристрою призвели до суттєвого прогресу в плазмових параметрах ТОКАМАКів .Токамак Т-3 отримав до 1968 р температуру плазми 0.5 KeV і досяг $nt_E = 5 \cdot 10^{17}$, що значно перевищувало параметри, досягнуті інших магнітних пастках [19]. З цього моменту почався активний розвиток цього напрямку та в інших країнах. У сімдесяті роки були збудовані ТОКАМАКи наступного за Т-3 покоління: Т-7, Т-10, Т-11 у СРСР, PLT та DIII-D у США, ASDEX у Німеччині, TFR у Франції, JFT-2 в Японії та інш. На ТОКАМАКах цього покоління були розроблені методи додаткового нагрівання плазми, такі як інжекція нейтральних атомів, електронний та іонний циклотронний нагрівання, різні плазмові діагностики та розроблені системи управління плазмою. В результаті на ТОКАМАКах другого покоління були отримані значні параметри плазми: температура в кілька KeV, щільності плазми що перевищують 10^{20} м^{-3} . Параметр nt_E досяг величини $5 \cdot 10^{18}$. Крім того, ТОКАМАК отримав додатковий, важливо для реактора елемент - дивертор. За допомогою струмів у системі полоїдальних витків силові лінії магнітного поля виводяться в сучасному Токамаку в спеціальну частину камери. Диверторна конфігурація плазми показана на рис.9.5

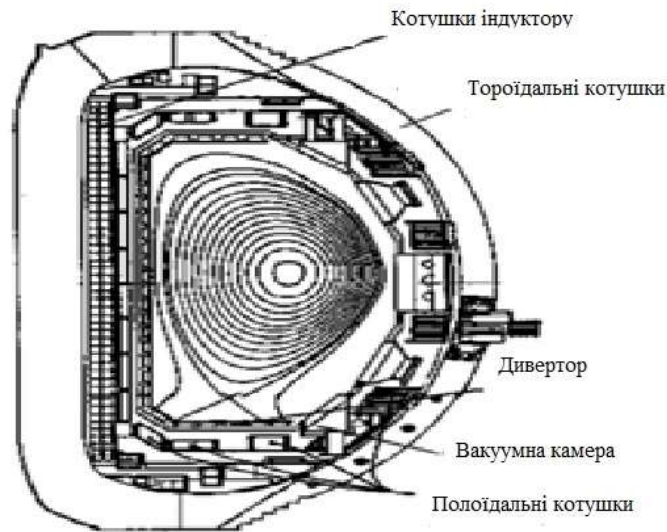


Рисунок 9.5 - Поперечний переріз сучасного DIII-D ТОКАМАКА з вертикальним подовжувачем плазми і дивертором магнітного поля

Основні параметри великих експериментальних ТОКАМАКів наведені в таблиці 9.1.

Дивертор дозволяє краще контролювати потік енергії з плазми і зменшити потрапляння домішок у плазму. Важливим досягненням цього покоління ТОКАМАКів стало відкриття режиму, який покращує утримання плазми: H-режиму, який дозволяє плазмі бути більш стабільною і стійкою. На початку 1980-х років почало працювати третє покоління ТОКАМАКів. Ці машини мають великий радіус тору 2-3 м і струм плазми в кілька МА. Було побудовано п'ять таких машин: JET і TORUS-SUPRA в Європі, JT60-U в Японії і TFTR у США. Параметри великих токамаків наведені у таблиці 9.1.

Таблиця 9.1 - Основні параметри великих експериментальних ТОКАМАКів

	Великий радіус, R (m)	Малий радіус, a (m)	Струм у плазмі, I _p (МА)	Потужність нагріву плазми, (МВт)	B, (Тл)	Q _{fus}	Особливості машини
JET	3	1	7	30	3.5	0.9	DT плазма, дивертор
JT60-U	3.3	1	3	30	4	1.06 ²⁾	Дивертор, пучки енергійних нейтральних атомів
T-15	2.4	0.7	2.5	20 ¹⁾	3.5	-	Надпровідна магнітна система (Nb ³ Sn)
TFTR	2.6	0.9	3	50	6	0.3	DT плазма
TORUS SUPRA	2.4	0.8	2	15	4	-	Надпровідна магнітна система (NbTi)

Дві з них, JET і TFTR, були спроектовані для використання тритію і отримання виходу синтезу $Q_{fus} = P_{fusion}/P_{cost} = 1$. T-15 і TORUS-SUPRA оснащені надпровідними магнітними котушками, подібними до тих, що використовуються в реакторі ТОКАМАК. Основними фізичними завданнями цього покоління установок були дослідження утримання плазми термоядерними параметрами, поліпшення граничних параметрів плазми і набуття досвіду роботи з диверторами. Технічні завдання включали розробку надпровідної магнітної системи, здатної генерувати великі величини індукованих магнітних полів до 5 Тл, розробку системи поводження з тритієм, набуття досвіду відведення високих теплових потоків у диверторі, розробку системи дистанційного збирання та розбирання внутрішніх компонентів установки, вдосконалення діагностики плазми тощо. TFTR на токамаку вже завершив свою програму і був зупинений у 1997 році.

ТОКАМАК T-15 поки працював тільки в режимі з омичним нагріванням плазми і, тому, параметри плазми, отримані на цій установці досить низькі. У майбутньому передбачається запровадити 10 МВт нейтральної інжекції та 10 МВт електронно-циклотронного нагріву. Наведений Q_{fus} перерахований з параметрів DD-плазми, отриманих в установці, на DT-плазму.

І хоча експериментальна програма на цих ТОКАМАКАх ще не закінчена, це покоління машин практично виконало поставлені перед ним

завдання. ТОКАМАК JET і TFTR вперше отримали велику термоядерну потужність DT-реакцій у плазмі, 11 МВт у TFTR та 16 МВт у JET. На рис.9.6 показані часові залежності термоядерної потужності у DT експериментах.

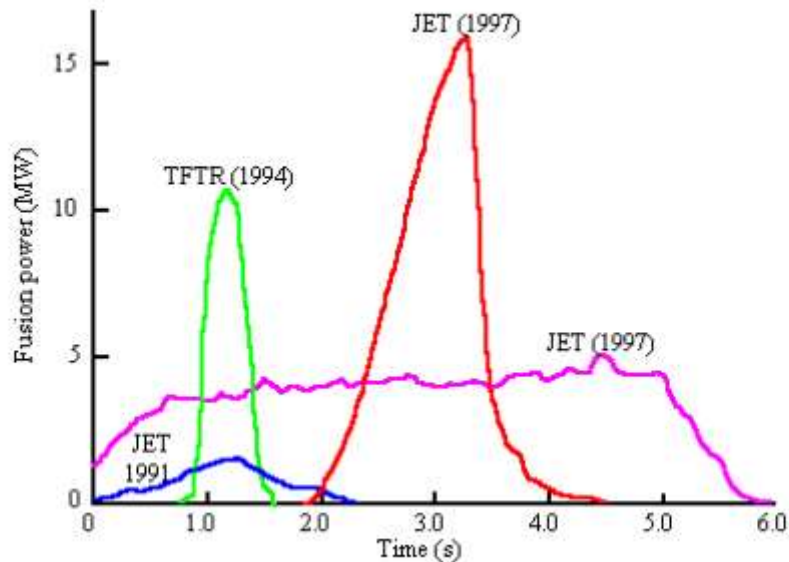


Рисунок 9.6 - Залежність термоядерної потужності від часу в рекордних дейтерієво-тритієвих розрядах на токамаках JET та TFTR

Це покоління ТОКАМАК досягло порогової величини $Q_{\text{fus}} = 1$ і отримало nT_E всього в кілька разів нижче, ніж те, що потрібне для повномасштабного ТОКАМАКа-реактора. У ТОКАМАКах навчилися підтримувати стаціонарний плазмовий струм за допомогою ВЧ полів та нейтральних пучків. Була вивчена фізика нагріву плазми швидкими частинками і, в тому числі, термоядерними альфа-частинками, вивчено роботу дивертора та розроблено режими роботи з низькими тепловими навантаженнями. Результати цих досліджень дозволили створити фізичні основи, необхідні для наступного кроку – першого ТОКАМАКа-реактора, який працюватиме в режимі горіння.

Максимальний тиск плазми в ТОКАМАК або максимальна величина β визначається стійкістю плазми і наближено описується співвідношенням Тройона

$$\beta = \beta_N \frac{I_p}{\alpha B_T} \quad , \quad (9.8)$$

де β виражено у %, I_p – струм, що протікає в плазмі та β_N – безрозмірна константа, яка носить назву коефіцієнту Тройона. Параметри в (9.8) мають розмірність МА, Тл, м, відповідно. Максимальні значення коефіцієнта Тройона $\beta_N = 3 \div 5$, досягнуті в експериментах, добре узгоджуються з

теоретичними пророкуваннями, які базуються на розрахунках стійкості плазми. Рис.9.7 показує граничні значення β , отримані в різних ТОКАМАКАх.

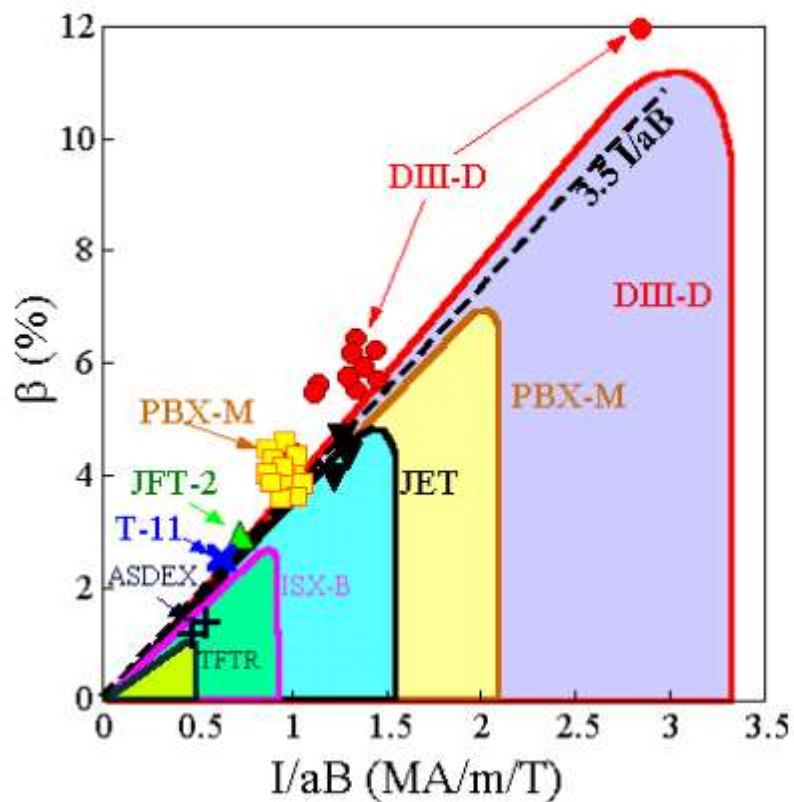


Рисунок 9.7 - Порівняння граничних значень, досягнутих в експериментах зі скейлінгом Тройона

При перевищенні граничного значення β у плазмі ТОКАМАКА розвиваються великомасштабні гвинтові збурення, плазма швидко охолоджується та гине на стінці. Це явище називається зривом плазми.

Як видно з Рис.9.7 для Токамаків характерні досить низькі значення β на рівні декількох відсотків. Існує принципова можливість збільшення значення β за рахунок зменшення аспектного відношення плазми до гранично низьких значень $R/a = 1.3 \div 1.5$. Теорія передбачає, що у таких пристроях β може досягати кількох десятків відсотків. Перший токамак з ультра низьким аспектним ставленням, START, побудований кілька років тому в Англії вже отримав значення $\beta = 30\%$. З іншого боку, ці системи технічно більш навантажені та вимагають спеціальних технічних рішень для створення тороїдальної котушки, дивертора та нейтронного захисту. В даний час будуються декілька більших, ніж START, експериментальних ТОКАМАКів з низьким аспектним ставленням і плазмовим струмом вище

1 МА. Очікується, що протягом наступних декількох років експерименти дадуть достатньо даних для того, щоб зрозуміти, чи буде досягнуто очікуване покращення плазмових параметрів і чи зможе воно компенсувати технічні труднощі, які існують в цій галузі.

Багаторічні дослідження довели наявність великої кількості складних турбулентних нелінійних явищ які стоять на перешкоді збільшенню часу життя плазми. Тому для екстраполяції часів життя плазми, отриманих у сучасних установках, до масштабів. Токамак-реактора, в даний час, використовуються деякі емпіричні закони - скейлінги. Які у середньому показують, що час життя зростає зі зростанням розміру плазми, R , плазмового струму I_p , витягнутості перерізу плазми k і падає зі зростанням потужності нагріву, P .

Залежність енергетичного часу життя з інших плазмових властивостей досить слабка. Рис.9.8 показує, що час життя виміряний, практично, у всіх експериментальних ТОКАМАКАх добре описується цим скейлінгом.

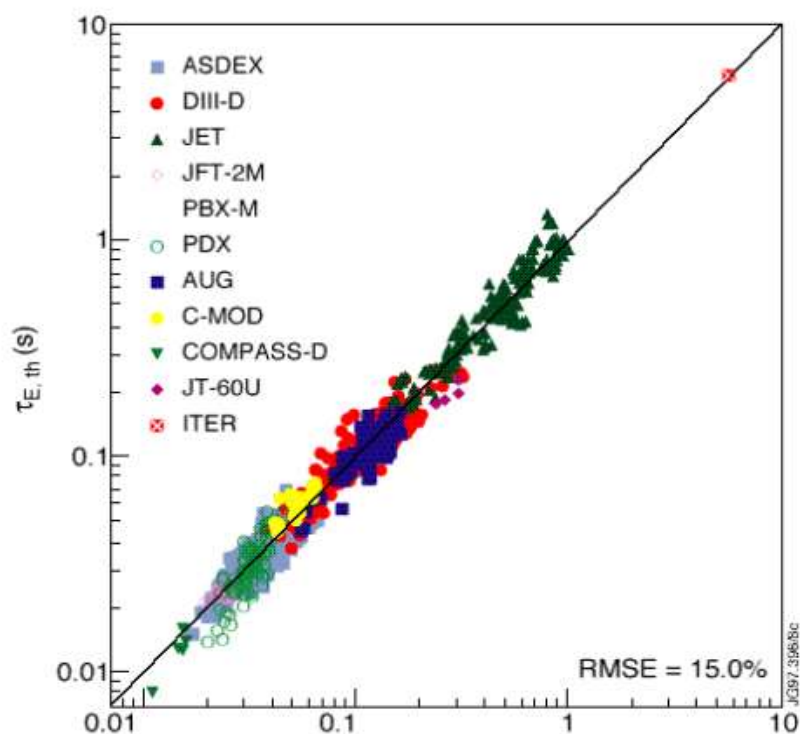


Рисунок 9.8 - Залежність енергетичного часу життя, що експериментально спостерігається, від передбаченого скейлінгом ITER-97

Середнє відхилення експериментальних точок від скейлінгу 15%. Різні мітки відповідають різним ТОКАМАКАм і проєктованого ТОКАМАКУ-реактору ITER [40].

Цей скейлінг передбачає, що ТОКАМАК, в якому відбуватиметься термоядерне горіння, що само підтримується, повинен мати великий радіус 7-8 м і плазмовий струм на рівні 20 МА. У такому Токамаку енергетичний час життя перевищуватиме 5 секунд, а потужність термоядерних реакцій буде на рівні 1-1.5 ГВт.

У 1998 р закінчено інженерний проект ТОКАМАКа-реактора ІТЕР . Роботи проводилися спільними зусиллями чотирьох сторін: Європи, Росії, США та Японії з метою створення першого експериментального ТОКАМАКа-реактора, розрахованого досягнення термоядерного горіння суміші дейтерію з тритієм. Основні фізичні та інженерні параметри установки наведені у таблиці 9.3, а його перетин показано на рис.9.9.

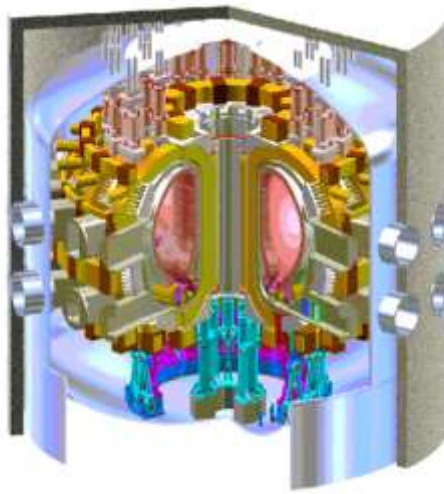


Рисунок 9.9 - Загальний вид проектованого ТОКАМАКа-реактора ІТЕР [40]

ІТЕР матиме, вже, всі основні риси ТОКАМАКа-реактора. Він матиме повністю надпровідну магнітну систему, охолоджуваний бланкет та захист від нейтронного випромінювання, систему дистанційного обслуговування установки. Передбачається, що на першій стінці буде отримано потоки нейтронів із щільністю потужності 1 МВт/м^2 та повним флюєнсом $0.3 \text{ МВт} \times \text{літ/м}^2$, що дозволить провести ядернотехнологічні випробування матеріалів та модулів бланкету, здатних відтворювати тритій.

Таблиця 9.3 - Основні параметри першого експериментального термоядерного ТОКАМАКа-реактора, ІТЕР

Параметр	Значення
Великий / малий радіус тора (A / a)	8.14 м/2.80 м
Конфігурація плазми	З одним тороїдальним дивертором
Плазмовий об'єм	2000 м ³
Струм у плазмі	21 МА
Тороїдальне магнітне поле	5.68 Тл (на радіусі R = 8.14 м)
β	3%
Повна потужність термоядерних реакцій	1.5 ГВт
Нейронний потік на першій стінці	1 МВт/м ²
Тривалість горіння	1000 с
Потужність додаткового нагріву плазми	100 МВт

ІТЕР планується побудувати в 2010-2011 р. Експериментальна програма, яка продовжуватиметься на цьому експериментальному реакторі близько двадцяти років, дозволить отримати плазмово-фізичні та ядерно-технологічні дані, необхідні для будівництва у 2030-2035 р першого демонстраційного реактора ТОКАМАКу, який уже вироблятиме електроенергію. Основне завдання ІТЕРу полягатиме в демонстрації практичності реактора-ТОКАМАКу для виробництва електроенергії.

Поряд із ТОКАМАКами, які в даний час є найбільш просунутою системою для здійснення керованого термоядерного синтезу, існують інші магнітні пастки, що успішно конкурують з ТОКАМАКом.

9.3.2 Стелларатор

СТЕЛЛАРАТОР, як і ТОКАМАК - це магнітна пастка із замкнутими магнітними поверхнями, але, на відміну від ТОКАМАКа, полоидальное магнітне поле, що утворює магнітні поверхні, створюється в СТЕЛЛАРАТОРі за допомогою зовнішніх витків, а не струмом, що протікає по плазмі. Ця магнітна пастка була винайдено в Принстонській лабораторії в США Л. Спітцером. Там же були збудовані і перші експериментальні СТЕЛЛАРАТОРИ.

СТЕЛЛАРАТОР має велику перевагу перед ТОКАМАКом - це стаціонарна машина, яка не вимагає складних методів підтримки плазмового струму для її стаціонарної роботи У той же час, на відміну від ТОКАМАКа, СТЕЛЛАРАТОР це принципово аксіально-несиметрична

пастка з магнітною віссю являє собою тривимірну криву і змінним, у тороїдальному напрямку, перерізом плазми. Схема СТЕЛЛАРАТОРА показана на рис.9.10.

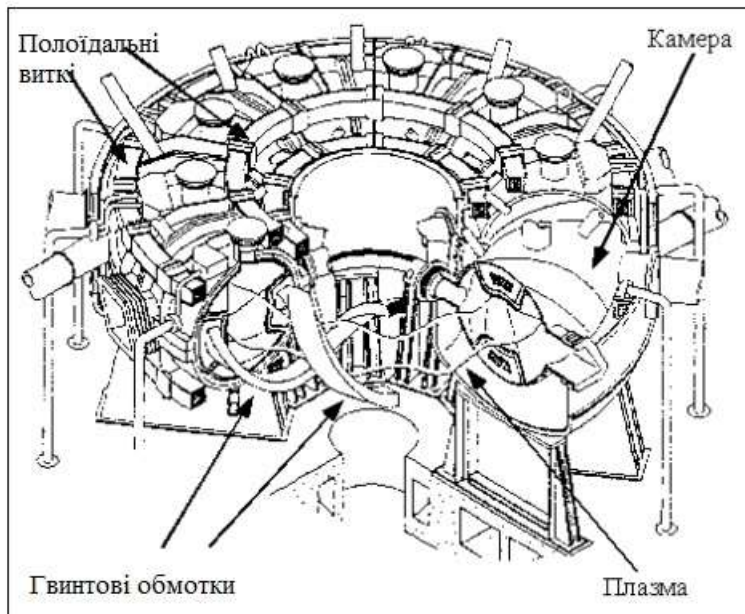


Рисунок 9.10 - Основні елементи конструкції СТЕЛЛАРАТОРА на прикладі СТЕЛЛАРАТОРА, що збудований в Японії LHD

Існують різні модифікації СТЕЛЛАРАТОРних конфігурацій, які відрізняються тим, як створюється обертальне перетворення, тобто. навівання магнітних силових ліній навколо магнітної осі, і які магнітні котушки використовуються для створення полоїдального поля. Обертальне перетворення можна отримати і за рахунок більш складної просторової конфігурації магнітної осі, наприклад, у вигляді замкнутої просторової вісімки.

Відносна складність магнітної конфігурації порівняно з ТОКАМАКОМ дещо загальмували розвиток цієї системи на початковому етапі розвитку. У перших стелаторах утримання плазми суттєво поступалося утриманню плазми в Токамаку і знадобилися багато років досліджень для того, щоб з'ясувати причину втрат енергії зі СТЕЛЛАРАТОРА. Виявилось, що, через тороїдальну несиметрію, траєкторії частинок у перших СТЕЛЛАРАТОРИ мали великі відхилення від магнітних поверхонь. Відповідно, були більшими та втрати енергії з плазми. Крім того, з'ясувалося, що магнітні поверхні в СТЕЛЛАРАТОРИ чутливі до зовнішніх збурень магнітного поля, які створюються завдяки не зовсім точної установки зовнішніх гвинтових обмоток, що було

притаманно першим СТЕЛЛАРАТОРАМ. В результаті, частина магнітних поверхонь була зруйнована збуреннями, що також зменшувало час утримання плазми.

Істотний прогрес у розвитку концепції СТЕЛЛАРАТОРів був досягнутий після появи потужних чисельних кодів, які були використані для оптимізації магнітної системи СТЕЛЛАРАТОРА. Два недавніх відкриття дозволили принципово покращити концепцію цієї пастки.

По-перше, було показано, що можна відмовитися від вкладених один в одного гвинтових витків, що оточують плазму (рис.9.10), а замість них використовувати модульні тривимірні тороїдальні котушки. Такі катушки, які показані на рис.9.11, створюють не тільки тороїдальне поле, але і необхідне полоїдальне поле, що створює замкнуті магнітні поверхні.

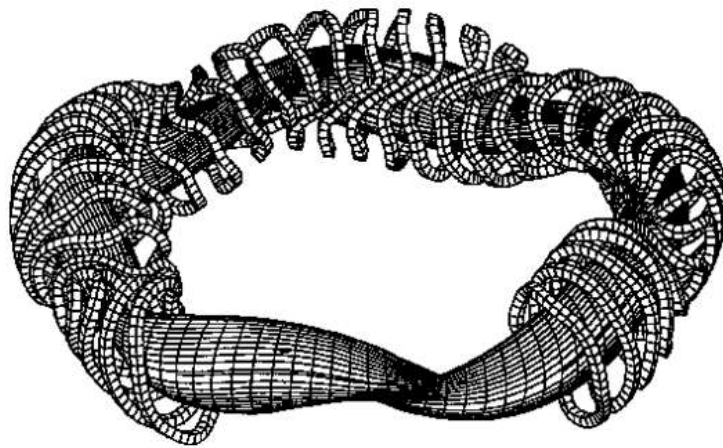


Рисунок 9.11 - Модульні магнітні котушки СТЕЛЛАРАТОРА

Концепція модульних котушок суттєво спростила складання та розбирання магнітної системи СТЕЛЛАРАТОРА-реактора та підвищило його привабливість.

По-друге, теоретичні дослідження геометрії магнітних полів показали, що існують такі магнітні поля конфігурації, у яких, незважаючи на відсутність геометричної симетрії, у частинок плазми зберігається адіабатичний інваріант руху, що забезпечує їхнє добре утримання. З погляду утримання окремих частинок, такі квазісиметричні СТЕЛЛАРАТОРИ еквівалентні аксіально-симетричним ТОКАМАК. Відповідно, очікується зростання енергетичного часу життя плазми в системах із такою конфігурацією магнітного поля. Нинішнє покоління

СТЕЛЛАРАТОРів суттєво покращило свою здатність утримувати гарячу плазму. Відповідно, зросли й параметри плазми у цих пастках. Та перевага, яка була у ТОКАМАКів у На самому початку розвитку - омічний нагрівання плазми струмом, що протікає по ній - вже не так важливо. Зараз і ТОКАМАК і СТЕЛЛАРАТОР використовують одні й самі додаткові методи нагрівання плазми з повною потужністю, що істотно перевищує потужність омічного нагріву в ТОКАМАКУ. СТЕЛЛАРАТОРИ поки що невеликі машини у більшому радіусом плазми менше ніж 2.2 м малим радіусом плазми 0.2-0.3 м, магнітним полем меншим 2.5 Тл та максимальною потужністю додаткового нагріву 3÷4 МВт. Рекордна температура плазми, $T = 3$ КэВ та максимальний час утримання енергії, $t_E = 0.04$ с, поки що, приблизно, на порядок величини менші, ніж ті, які досягнуті зараз у ТОКАМАКАх. Граничне β в СТЕЛЛАРАТОРІ, як і в ТОКАМАЦІ, визначається МГД стійкістю плазми, яка обмежує максимально можливе значення β на рівні кількох відсотків. Через те, що в СТЕЛЛАРАТОРІ рівновага плазми створюється зовнішніми магнітними обмотками, а не струмом, що протікає по плазмі, в СТЕЛЛАРАТОРІ відсутні плазмові зриви. Перевищення параметрами плазми своїх граничних значень, як правило, веде в СТЕЛЛАРАТОРІ до насичення цих параметрів або повільного розпаду плазми.

Це, безсумнівно, велика перевага СТЕЛЛАРАТОРА, відносно ТОКАМАКУ, в якому зриви плазмового струму створюють великі механічні та теплові навантаження на першій стінці та в диверторі і, як наслідок, ускладнюють їхню конструкцію.

Дослідження утримання енергії в СТЕЛЛАРАТОРАх показало, що час життя в цих пастках близький до того, що спостерігається в ТОКАМАКАх у L-режимі, тобто. в режимі з високими аномальними переносами та, відповідно, низьким часом утримання енергії. На рис.9.12 з роботи [23] показано, що час утримання енергії в L-режимі ТОКАМАКА і СТЕЛЛАРАТОРІ добре описується одним і тим же скейлінгом і, отже, утримання енергії в СТЕЛЛАРАТОРІ не гірше, ніж у ТОКАМАКУ, що працює в L-режимі.

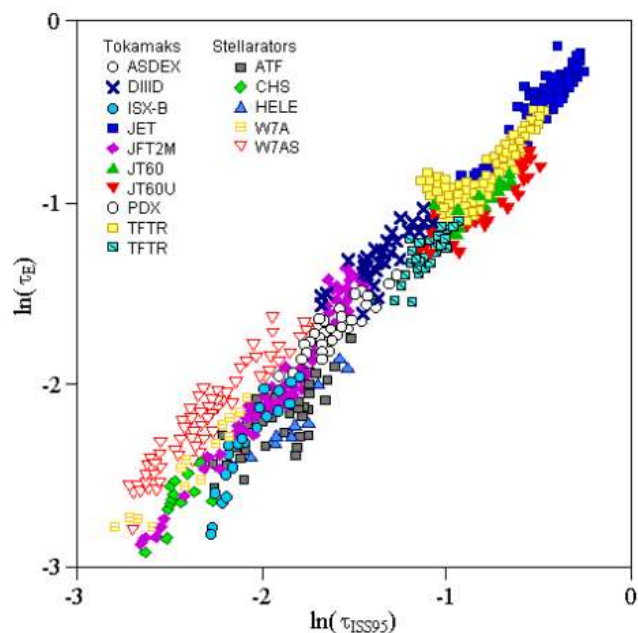


Рисунок 9.12 - Порівняння часу утримання енергії в СТЕЛЛАРАТОРАХ і часу утримання енергії в L-моді Токамак [23]

Спостережуваний час життя показано, як функція емпіричного скейлінгу для часу утримання в СТЕЛЛАРАТОРІ, ISS95.

Однак, основний режим роботи ТОКАМАКів з дивертором - це режим з покращеним утриманням енергії та частинок, H-режим, з часом утримання приблизно вдвічі вище, ніж у L-режимі. H-режим добре освоєний і є основним робочим режимом нинішніх експериментальних установок із дивертором. Передбачається, що ТОКАМАК-реактор також працюватиме в H-режимі. Поки СТЕЛЛАРАТОРАм не вдалося отримати подібного збільшення часу життя - режими з покращеним утриманням у СТЕЛЛАРАТОРІ хоч і існують, але дають зростання часу життя лише 20-30 % проти L-режимом [18]. Якщо СТЕЛЛАРАТОР не освоїть режими подібні до H-режиму в ТОКАМАКУ і не зможе суттєво збільшити енергетичний час життя, то утримання енергії залишиться в 1.5 -2.5 рази нижче, ніж у ТОКАМАК і відповідно для виконання критерію Лоусона СТЕЛЛАРАТОР-реактор вимагатиме набагато більших розмірів, ніж ТОКАМАК-реактор. Підвищення часу життя плазми за рахунок оптимізації плазмових параметрів та магнітної конфігурації є основним експериментальним завданням СТЕЛЛАРАТОРної програми. СТЕЛЛАРАТОРна програма проводиться досить активно, і СТЕЛЛАРАТОРИ зараз існують у багатьох країнах, включаючи Японію, Німеччину та Росію. Досягнення деяких нинішніх та запланованих

СТЕЛЛАРАТОРів показані на рис.9.2. В даний час будуються два великі СТЕЛЛАРАТОРИ: LHD в Японії та WVII-X у Німеччині. Очікується, що LHD буде введено в дію в 1998 р. а WVII-X в 2002 р. установок наведені в Таблиці 9.4.

Таблиця 9.4 - Основні параметри СТЕЛЛАРАТОРів, що будуються

	Великий радіус, R (м)	Малий радіус, R (м)	Потужність нагріву плазми (МВт)	Магнітне поле	Коментарі
LHD (Японія)	3.9	0.6	28	4	надпровідна магнітна система, гвинтовий дивертор
WVII-X (Німеччина)	5.5	0.5	20	3	надпровідна магнітна система, модульні котушки, оптимізована магнітна конфігурація

СТЕЛЛАРАТОР WVII-X матиме модульні котушки з оптимізованою геометрією магнітного поля. Японський СТЕЛЛАРАТОР, LHD, буде забезпечений гвинтовим дивертором. Обидва СТЕЛЛАРАТОРИ матимуть надпровідні магнітні котушки.

Крім ТОКАМАКів і СТЕЛЛАРАТОРів експерименти, хоч і в меншому масштабі, продовжуються на деяких інших системах із замкнутими магнітними конфігураціями. Серед них слід відзначити пінчі зі зверненим полем, СФЕРОМАКи та компактні тори. Пінчі зі зверненим полем мають відносно низьке значення тороїдального магнітного поля. У СФЕРОМАКу або компактних торах тороїдальна магнітна система зовсім відсутня. Відповідно всі ці системи обіцяють можливість створення плазми з високим значенням параметра β і, отже, у перспективі можуть бути привабливими для створення компактних термоядерних реакторів або реакторів, що використовують альтернативні реакції, такі як DHe₃ або pB, у яких низьке поле потрібно зниження магнітно-гальмівного випромінювання. Нинішні параметри плазми, досягнуті в цих пастках, поки що, істотно нижчі, ніж ті, що отримані в ТОКАМАКАх і СТЕЛЛАРАТОРі.

9.3.3 Відкриті системи для магнітного утримання плазми

Якщо в ТОКАМАЦІ або СТЕЛЛАРАТОРІ хороше утримання плазми забезпечується наявністю замкнутих магнітних поверхонь, то у відкритих системах утримання частинок у напрямку вздовж магнітного поля досягається за рахунок створення магнітних або електростатичних пробок на кінцях магнітних пасток.

Якщо збільшити магнітне поле на обох кінцях прямого соленоїда, то частинки з низькою поздовжньою до магнітного поля швидкістю, що володіють великим магнітним моментом, відбиватимуться від таких магнітних пробок і, таким чином, будуть утримуватись у пастці. Подібні магнітні пастки, які отримали назву дзеркальних чи адіабатичних пасток, були запропоновані Г.І. Будкером у СРСР та Р.Ф. Лостом у США. Одна з найбільших відкритих пасток, ОГРА-1, було збудовано 1958 р в Інституті Атомної Енергії ім. І.В. Курчатова [19]. І хоча на початку термоядерних досліджень очікувалося, що ці системи призведуть до швидкого вирішенню проблеми керованого термоядерного синтезу, з'ясувалося, що прості адіабатичні пастки мають два принципові недоліки. Виявилось, що плазма в прямих аксіально-симетричних пастки нестійка і викидається впоперек магнітного поля. Цю складність вдалося подолати за рахунок ускладнення магнітної конфігурації адіабатичної пастки та створення пасток більш складної форми, яких магнітне поле наростало до периферії плазми.

Друга проблема, з якою зіткнулися дослідники – це низький час життя плазми в адіабатичній пастці.

Магнітні пробки добре утримують частинки з великою поперечною та малою поздовжньою компонентами швидкості. Частинки, що рухаються строго вздовж магнітного поля, не мають магнітного моменту і тому не утримуються. Тому у просторі швидкостей існує конус втрат частинок. Кулонівські зіткнення частинок призводять до їхнього розсіювання в конус втрат і догляду через магнітні пробки. Детальний аналіз часу утримання плазми у простий адіабатичній пастці, який вдалося виконати до середини 70 років показав, що максимальне значення $Q_{\text{fus}} = P_{\text{fus}}/P_{\text{витрат}}$, яке можна отримати в такій системі, лише трохи перевищує 1 і тому ці системи мало привабливі (n_{E} істотно відстає від досягнень ТОКАМАКів і СТЕЛЛАРАТОРів).

Подальші дослідження в галузі відкритих систем були спрямовані на вдосконалення адіабатичних пасток з метою збільшення часу життя частинок. В даний час ці дослідження сконцентровані на, так званих, амбіполярних або тандемних системах [23, 24], які використовують електричні поля для "затикання" магнітних пробок та збільшення часу життя частинок. Амбіполярні системи, в принципі, дозволяють суттєво збільшити Q_{fus} , у порівнянні зі звичайною відкритою пасткою. Термоядерні дослідження на подібних пастках продовжуються в Росії та Японії, проте, активність у цьому напрямі суттєво знизилася з початку 80-х років. Привабливість відкритих систем пов'язана з можливістю отримувати високі значення β і, отже, з потенційною можливістю використання цих пасток для освоєння в майбутньому DHe₃ чи pV реакцій.

Ми можемо зробити висновок, що серед систем для магнітного утримання плазми нині лідирують пастки із замкнутими магнітними поверхнями – ТОКАМАКИ та СТЕЛЛАРАТОРИ. Передбачається, що наступним кроком у цьому напрямку буде експериментальна машина, що має всі риси термоядерного реактора і здатна працювати у режимі термоядерного горіння.

9.3.4 Імпульсні системи

В імпульсних системах з інерційним утриманням плазми виконання критерію Лоусона досягається не за рахунок тривалого утримання плазми, а за рахунок збільшення її густини в результаті стиснення суміші. Якщо при стисканні вдасться досягти необхідної температури 10-50 Кев, а щільність суміші після її стиснення буде досить велика, то вона встигне прореагувати під час інерційного розльоту суміші. Такі системи, які фактично використовують мікроривбухи невеликої кількості реагуючої суміші називаються системами з інерційним утриманням.

Основне фізичне завдання в цьому напрямку керованого термоядерного синтезу – отримання високих ступенів стиснення в такій малій кількості палива, яке дозволить використовувати термоядерну енергію, що виділилася без руйнування камери.

Історично, одними з перших таких систем були швидкі Z-пінчі, в яких потрібне стиснення суміші передбачалося отримати, пропускаючи великий електричний струм через розріджений газ, що складається із суміші дейтерію з тритієм. Передбачалося, що тиск магнітного поля,

створюваного струмом, стискатиме суміш всередині струмового каналу до густин, що призводять до виконання критерію Лоусона. Подібні експерименти, яких струм у суміші створювався розрядом конденсаторної батареї, інтенсивно проводилися в різних країнах на початку 50 років [19]. І хоча Z-пінчі не змогли досягти очікуваних параметрів суміші, вони суттєво просунули наше розуміння фізичних процесів, що відбуваються у гарячій термоядерній плазмі. Виявилось, що стиск плазмового шнура в Z-пінчах обмежено розвитком плазмових нестійкостей, які за наявності час потужностях не дозволяли отримати позитивний термоядерний вихід. На той час невдачі Z-пінчів помітно охолодили інтерес до подібних систем та направили термоядерні дослідження у бік квазістаціонарних магнітних пасток.

Імпульсні системи для здійснення керованого термоядерного синтезу отримали своє друге народження після винаходу у 1960 р. лазерів, здатних у коротких імпульсах генерувати величезні потужності. Ідея лазерного термоядерного синтезу полягає в опроміненні лазерним випромінюванням невеликої сферичної оболонки, заповненої газоподібним чи твердим паливом. Під дією випромінювання матеріал оболонки випаровується і створює реактивні сили, здатні стиснути оболонку і реагуючу суміш, що міститься в ній (див.рис.9.13).

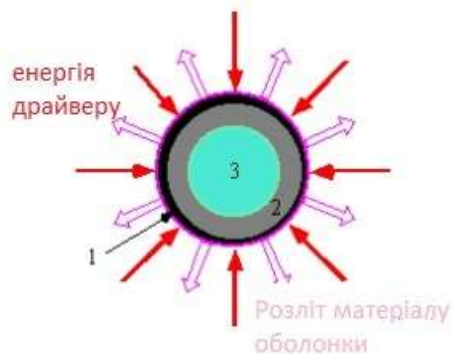


Рисунок 9.13 - Мішень для інерційного синтезу складається з порожнистої оболонки (1), шару твердої замороженої ДТ суміші (2) та ДП газу низької щільності в центрі мішені (3)

Паралельно з лазерами, у 60 роки розвивалися й інші потужні драйвери - іонні та електронні пучки, які також могли б забезпечувати необхідні потужності на поверхні мішеней. Були розроблені імпульсні системи живлення, здатні створювати та підводити до мішеней енергію 1-

10 МДж за 10-8 с, тобто отримувати пікові потужності лише на рівні 10^{15} Вт. Поява нової технології спричинила інтенсивні дослідження фізики взаємодії потужного випромінювання і пучків частинок з твердим тілом і призвела до розробки термоядерних мішеней, здатних давати позитивний вихід енергії.

9.3.5 Мішені для інерційного керованого термоядерного синтезу

Одна із можливих схем мішені показана на рис.9.13. Основне паливо міститься всередині мішені у вигляді твердої DT суміші, намороженої на внутрішній бік оболонки мішені. Центральна частина мішені заповнена розрідженим DT газом (приблизно 5 % від повної маси палива), який служить для запалювання мішені в процесі її стискування. Випаровування матеріалу оболонки мішені та його розліт створює реактивну силу, стискаючи оболонку та що містяться в ньому DT паливо. Зрештою, стиснутому стані тиск має бути приблизно однорідним по перерізу, але температура в центральній області, що вийшла з розрідженого газу (область 3 на Рис.9.13), буде вищою, тому, в центрі загориться термоядерна реакція, яка розігріватиме більш щільну зовнішню область. В результаті термоядерне горіння пошириться на всю суміш, що міститься всередині оболонки. Після цього суміш буде розлітатися, приблизно, зі швидкістю звуку, що відповідає температурі суміші, $T = 20\div 40$ КэВ. Очевидно, що при заданій температурі час життя стиснутої таблетки буде пропорційно до її радіусу, і тому критерій запалювання (умова nt_E) можна записати в термінах добутку щільності суміші, ρ , на її радіус у стисломому стані, $\rho \cdot r$. Розрахунки показують [20], що для вигорання 30% суміші потрібно, щоб після стиснення виконувалася умова: $\rho \geq 3$ г/см²

Остання умова еквівалентна критерію Лоусона для магнітного термоядерного реактора. З наведеної умови випливає, що критична маса палива, M , буде зменшуватися зі зростанням щільності суміші, $M \sim r^3 \sim 1/\rho^2$, а, отже, і енергія мікрровибуху буде тим меншою, чим більшої щільності суміші вдасться досягти при стиску.

Обмеження на ступінь стиснення пов'язані з невеликою, але завжди існуючою неоднорідністю падаючого на оболонку випромінювання та з несиметрією самої мішені. Наприклад, якщо прискорення g оболонки неоднорідне з збуренням δg , то очевидно, що до кінця стиснення відхилення від сферичної симетрії досягне величини $\delta r/r \gg C_r \delta r/g$, де $C_r =$

R/g – лінійний коефіцієнт стиснення мішені. При неоднорідності опромінення близько 1%, що цілком досяжно за сучасних технологій виготовлення мішеней, лінійний коефіцієнт стиснення буде обмежений величиною $C_r = 30-40$.

Несиметрія мішені може наростати у процесі стиснення оболонки через розвиток нестійкостей.

Справді, на початку стиснення на оболонку діють сили інерції, спрямовані по радіусу від центру до периферії. Оскільки щільність також спадає по радіусу, то в мішені може розвиватися нестійкість Релея-Тейлора, подібна до тієї, яка розвивається у важкій рідині, поміщеній над легкою в полі тяжкості.

Виявляється, що нестійкість може розвиватися, як на стадії прискорення оболонки, так і при її розльоті призводить до експоненційного зростання вихідних збурень. Чисельні розрахунки показують, що якщо дозволити обуренням нарости не більше, ніж у 1000 разів, то товщина оболонки $D R$ повинна бути не надто мала $R/D R = 25-35$, а щільність потужності драйвера повинна перевищувати $(3\div 4) \cdot 10^{14} \text{ Вт/см}^2$.

Оцінимо типові параметри мішені та вимоги до потужності драйвера. Якщо прийняти, що щільність суміші в стислому стані $= 400 \text{ Г/см}^3$, тоді зразок з масою палива $M = 5 \text{ мг}$ і, відповідно, початковим радіусом $1.5-2 \text{ мм}$ із запасом забезпечить виконання умови запалення. Повний термоядерний вихід буде $6 \cdot 10^8 \text{ Дж}$, що відповідає тротиловому еквіваленту $\sim 100 \text{ кг}$ і може бути утримано достатньо міцною камерою. Оцінимо тепер, яка мінімальна енергія має бути витрачена на нагрівання та стиснення мішені.

Якби драйвер мав нагрівати всю суміш до термоядерних температур $T = 10 \text{ КеВ}$, то під час стиснення було б витрачено енергія $3/2NT = 6 \cdot 10^6 \text{ Дж}$, де N - повне число частинок суміші (іонів і електронів). При типовій ефективності драйвера 5%, на стиснення таблетки доведеться витратити $1.2 \cdot 10^8 \text{ Дж}$, тому величина термоядерного виходу буде невисокою $Q_{fus} \sim 5$. Отже, дуже важливо, щоб основне паливо залишалось холодним під час стиснення. У цьому випадку робота буде витрачатися на стиснення тільки електронної компоненти суміші, яка буде близька до виродженої Фермі-рідини. Оцінки показують, що в цьому випадку на стиснення буде витрачено енергія $6 \cdot 10^4 \text{ Дж}$, що дозволить отримати величину $Q_{fus} \sim 100$. Видно, що підпал мішені за допомогою невеликої

кількості гарячої суміші ("іскри") відіграє важливу роль у створенні мішеней з великим позитивним виходом. Детальні розрахунки показують, що для підпалення мішеней швидкість стиснення має бути на рівні $(3-4) \cdot 10^7$ см/с і, відповідно, час стиснення близько $5 \cdot 10^{-9}$ с.

Нещодавно було запропоновано багатообіцяючу можливість швидкого підпалу попередньо стиснутих мішеней з допомогою надпотужного додаткового імпульсу. Для запалювання потрібні щільності потужності до 10^{20} Вт/см² з повною енергією швидкого драйвера в кілька десятків кДж. За наявності такого драйвера відкривається можливість підпалу дейтерієвих мішеней за допомогою невеликого тритієвого запалу. Поки не ясно, чи буде це можна досягти на практиці - в найближчі роки цей напрямок буде активно досліджуватися теоретично і експериментально.

Термоядерні мішені, подібні до тієї, яка описана вище, вже були перевірені експериментально за допомогою підземних ядерних вибухів. Було показано, що вони дають очікуваний термоядерний вихід, що довело можливість цього напрямку. З того часу, основним завданням імпульсного керованого синтезу стала демонстрація великого позитивного виходу у лабораторних умовах, що потребує вдосконалення мішеней та розробки ефективних неядерних драйверів для їх обтиснення. Одночасно з перспективним завданням створення керованого термоядерного реактора, подібні драйвери дозволять, в умовах повної заборони ядерних випробувань, продовжувати дослідження в галузі ядерних озброєнь. Саме перспектива оборонних додатків дала останніми роками потужний поштовх дослідженням у сфері імпульсних систем.

Прості міркування дозволяють сформулювати вимоги ефективності драйвера. Справді, якщо позначити $P_{ел}$ повну електричну потужність, вироблену термоядерною електростанцією, а $P_{др}$ - електричну потужність, що споживається драйвером, то для потужності, що поставляється в мережу, можна записати просте співвідношення:

$$P_{мережа} = P_{ел} - P_{др} = P_{ел} (1 - P_{др} / P_{ел})$$

Для того, щоб електростанція була ефективною, частка потужності, що циркулює в ній, $P_{др} / P_{ел}$, повинна бути не більше 20-25%. Відношення $P_{др} / P_{ел}$ визначається добутком ефективності драйвера, η (рівною відношенню енергії, що вкладається в стиснення мішені, до повної електроенергії, що споживається драйвером), термоядерному виходу мішені, Q_{fus} , та ефективності виробництва електроенергії, ϵ

$$P_{др} / P_{ел} = 1/\eta Q_{fus}^\varepsilon$$

Якщо прийняти, що $\varepsilon = 30-40\%$, то необхідна ефективність драйвера буде визначатися умовою, $Q_{fus} > 10 \div 15$, [25].

Таким чином, підсумовуючи наведені вище вимоги, можна зробити висновок, що для підпалу мішені міліметрового розміру, що містить кілька міліграм DT суміші, до неї потрібно підвести повну енергію на рівні декількох МДж за час менший, або близько 10 наносекунд. Відхилення від симетрії опромінення мішені має бути не більше 1%. У термоядерному реакторі з електричною потужністю 1 ГВт слід підпалювати $5 \div 6$ мішеней на секунду. Розглянемо тепер, які існують драйвери для обтиснення подібних мішеней і які їх зможуть задовольнити наведеним вище вимогам.

Якщо прийняти, що $\varepsilon = 30-40\%$, то необхідна ефективність драйвера буде визначатися умовою, $Q_{fus} > 10 \div 15$.

Таким чином, підсумовуючи наведені вище вимоги, можна зробити висновок, що для підпалу мішені міліметрового розміру, що містить кілька міліграм DT суміші, до неї потрібно підвести повну енергію на рівні декількох МДж за час менший або близько 10 наносекунд. Відхилення від симетрії опромінення мішені має бути не більше 1%. У термоядерному реакторі з електричною потужністю 1 ГВт слід підпалювати $5 \div 6$ мішеней на секунду. Розглянемо тепер, які існують драйвери для обтиснення подібних мішеней і які їх зможуть задовольнити наведеним вище вимогам.

9.3.6 Драйвери для інерційного керованого синтезу

В даний час в інерційному термоядерному синтезі розробляються кілька типів драйверів: пучки легких іонів та пучки важких іонів. Певний час тому великий інтерес викликали релятивістські електронні пучки, але потім стало ясно, що їх важко фокусувати і підводити до мішеней, тому це напрямок, в даний час, трансформувався в потужні Z-пінчі.

Перш ніж переходити до обговорення кожного драйвера, розглянемо, яким чином в експерименті домагаються необхідної рівномірності опромінення. Існують два принципові підходи. За прямої схеми опромінення, що використовується у разі оптичних драйверів, однорідність досягається за рахунок використання великої кількості променів, рівномірно розподілених поверхнею мішені. При цьому використовуються різні додаткові оптичні методи, що дозволяють більш

рівномірно "розмазати" окреме випромінювання пучка поверхнею мішені . Другий підхід, який можна використовувати не лише для оптичних, а й пучкових драйверів, полягає у використанні холрауму - додаткової камери з невеликими отворами, яка виготовлена із матеріалів з великим Z , наприклад таких, як вольфрам. Ця схема проілюстрована на рис.9.14.

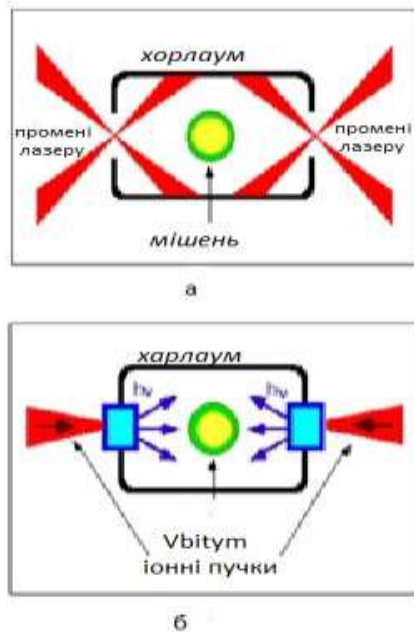


Рисунок 9.14 - Схема опромінення мішені в хорлаумі лазерного випромінювання (а) і пучків важких іонів (б)

Лазерне випромінювання направляєтся в хорлаум через невеликі отвори та нагріває стінки кожуха, виготовлені з матеріалу з великим Z , які випромінюють м'яке рентгенівське випромінювання.

Непряма схема опромінення дозволяє перетворювати лазерне випромінювання на випромінювання з меншою довжиною хвилі (м'яке рентгенівське випромінювання), яке забезпечує кращі характеристики стиснення мішені, ніж вихідне випромінювання. Крім того, досягається більша рівномірність опромінення мішені. Незважаючи на наявність "посередника" в цій схемі ефективність перетворення лазерного випромінювання в рентгенівське досягає в експериментах 40-80 %. На рис.9.15 показана фотографія холрауму в рентгенівських променях в момент його опромінення на установці NOVA.

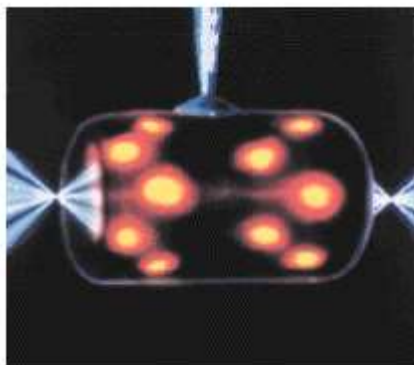


Рисунок 9.15 - Фотографія в рентгенівському промені холрауму, освітленого десятима променями лазера NOVA. Зразок знаходиться всередині кожуха і тому не видно

Схема з холраумом є основною схемою стиснення під час використання іонних пучків, які мають великий пробіг у речовині і отже не можуть бути використані для прямого опромінення мішені.

Перевага технологій із використанням лазерного випромінювання полягає у відносній легкості його транспортування до мішені та його фокусування, можливості отримувати величезні щільності потужності, необхідні ефективного стиснення мішені.

В даний час існують і будуються кілька потужних лазерних установок для обтиснення мішеней. Їх параметри наведено у таблиці 9.5.

Таблиця 9.5 - Основні параметри найбільших лазерних установок для обтиснення термоядерних мішеней

Назва приладу	Тип лазеру	Енергія в імпульсу (кДж)	Довжина хвилі
NOVA (США)	Nd скло	125 / 80 / 55	1.05 / 0.53 / 0.35
OMEGA (США)	Nd скло	30	0.35
NIF (будується в США)	Nd скло	1800	0.35
ІСКРА 5 (Росія)	Iodine	30	1.35
ДЕЛЬФІН (Росія)	Nd скло	10	1.05
РНЕБУС (Франція)	Nd скло	20 / 10	0.53 / 0.35
ГЕККО ХР (Японія)	Nd скло	20 / 15 / 12	1.05 / 0.53 / 0.35

Дослідження взаємодії лазерного випромінювання з речовиною показало, що лазерне випромінювання добре поглинається речовиною, що випаровується, оболонки мішені аж до необхідних щільностей потужності

$2 \div 4 \cdot 10^{14} \text{Вт/см}^2$. Коефіцієнт поглинання може досягати 40-80% і зростає зі зменшенням довжини хвилі випромінювання [25].

Як зазначалося вище, великого термоядерного виходу можна досягти, якщо при стисканні переважна більшість палива залишається холодною. І тому необхідно, щоб стиск було адіабатичним, тобто. потрібно уникати попереднього розігріву мішені, яке може відбуватися за рахунок генерації лазерним випромінюванням енергійних електронів, ударних хвиль чи жорсткого рентгенівського випромінювання. Численні дослідження показали, що ці небажані ефекти можна знизити за рахунок профілювання імпульсу випромінювання, оптимізації таблеток та зменшення довжини хвилі випромінювання. На Рис.9.16, показані межі області на площині щільність потужності - довжина хвилі лазерів, придатних для обтиснення мішеней.

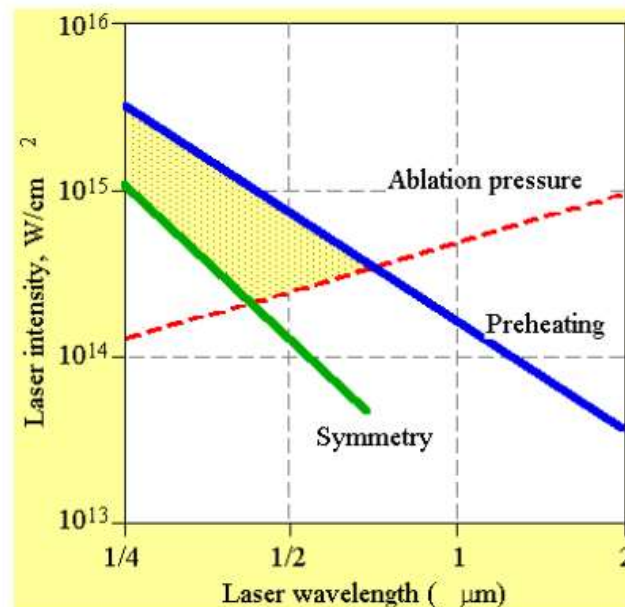


Рисунок 9.16 - Область на площині параметрів, в якій лазери здатні здійснювати обтискання термоядерних мішеней (заштрихована)

Перша лазерна установка (NIF) з параметрами лазера, достатніми для одержання запалювання мішеней, була побудована в США в 2002 р. Установка дозволила вивчити фізику обтиснення мішеней, які будуть мати термоядерний вихід на рівні 1-20 МДж і відповідно дозволить отримати високі значення $Q > 1$.

Хоча лазери дозволяють проводити лабораторні дослідження з обтискання та запалювання мішеней, їх недоліком є низький к.п.д., який поки в кращому випадку досягає 1-2%. При таких низьких к.п.д.

термоядерний вихід мішені повинен перевищувати 10^3 , що дуже складним завданням. Крім того, лазери на склі мають низьку повторюваність імпульсу. Для того, щоб лазери могли служити драйвером термоядерного реактора електростанції їхня вартість має бути знижена приблизно на два порядки величини. Тому, паралельно з розвитком лазерної технології, дослідники звернулися до розробки більш ефективних драйверів – іонних пучків.

9.3.7 Іонні пучки

В даний час розглядається два типи іонних пучків: пучки легких іонів, типу Li, з енергією в кілька десятків MeV та пучки важких іонів, типу Pb, з енергією до 10 GeV. Якщо говорити про реакторні програми, то в обох випадках потрібно підвести до мішені радіусом кілька міліметрів енергію в кілька МДж за час близько 10 нс. Необхідно не тільки сфокусувати пучок, але й зуміти провести його в камері реактора відстань близько кількох метрів від виходу прискорювача до мішені, що для пучків частинок є зовсім не простим завданням.

Пучки легких іонів з енергією кілька десятків MeV можна створювати із відносно великим к.к.д. з допомогою імпульсної напруги, що додається до діода. Сучасна імпульсна техніка дозволяє отримувати потужності, необхідні для обтиснення мішеней, і тому, пучки легких іонів є найбільш дешевим кандидатом для драйвера. Експерименти з легкими іонами проводилися протягом багатьох років на установці PBFA-11 у Сандієвській національній лабораторії у США. Установка дозволяє створювати короткі (15 нс) імпульси 30 MeV-них іонів Li з піковим струмом 3.5 MA та повною енергією близько 1 МДж. Кожух з матеріалу з великим Z з мішенню всередині містився в центрі сферично-симетричного діода, що дозволяє отримувати велику кількість радіально спрямованих іонних пучків. Енергія іонів поглиналася в кожусі холрауму та пористом наповнювача між мішенню і кожухом і перетворювалося на м'яке рентгенівське випромінювання, що стискає мішень.

Передбачалося отримати щільність потужності понад $5 \cdot 10^{13}$ Вт/см², необхідну для обтиснення та підпалу мішеней. Однак, досягнуті щільності потужності були приблизно на порядок величини менше, ніж очікувалося. У реакторі, що використовує легкі іони, як драйвер, потрібні колосальні потоки швидких частинок із високою щільністю частинок поблизу мішені.

Фокусування таких пучків на міліметровій мішені є завдання величезної складності. Крім того, легкі іони помітно гальмуватимуться в залишковий газ у камері згоряння.

Перехід до важких іонів і великих енергій частинок дозволяє суттєво пом'якшити ці проблеми і, зокрема, зменшити щільність струму частинок і, таким чином, полегшити проблему фокусування частинок. Проте, для отримання необхідних 10 ГеВ-них частинок потрібні величезні прискорювачі з накопичувачами частинок та ін. складною прискорювальною технікою. Припустимо, що повна енергія пучка 3 МДж, час імпульсу 10 нс і область, на яку повинен бути сфокусований пучок, являє собою коло з радіусом 3 мм. Порівняльні параметри гіпотетичних драйверів для обтиснення мішені наведені у таблиці 9.6.

Таблиця 9.6 - Порівняльні характеристики драйверів на легких та важких іонах

Тип драйверу	Іони	Енергія іонів	Швидкість частинок	Струм іонів	Щільність частинок
Легкі іони	Li	30 МеВ	$3 \cdot 10^7$ м/с	10МА	$6 \cdot 10^{20}$ м ⁻³
Тяжкі іони	Pb	10 ГеВ	10^8 м/с	30кА	10^{17} м ⁻³

Пучки важких іонів, як і легкі іони, вимагають використання холрауму, у якому енергія іонів перетворюється на рентгенівське випромінювання, поступово опромінює саму мету. Конструкція холрауму для пучка важких іонів лише трохи відрізняється від холрауму для лазерного випромінювання. Відмінність полягає в тому, що пучки вимагають отворів, через яке лазерні промені проникають всередину холрауму. Тому, у разі пучків, використовуються спеціальні поглиначі частинок, які перетворюють їхню енергію в рентгенівське випромінювання. Один з можливих варіантів показано на Рис.9.14b. Виявляється, що ефективність перетворення зменшується з зростанням енергії іонів і зростанням розміру області, де відбувається фокусування пучка. Тому, збільшення енергії частинок понад 10 ГеВ недоцільно.

В даний час, як у Європі, так і в США прийнято рішення зосередити основні зусилля на розвитку драйверів, що базуються на пучках важких іонів. Передбачається, що ці драйвери у разі успіху, замінять лазери в установках наступного за NIF покоління. Поки що прискорювачів, необхідних для інерційного синтезу не існує. Основна складність їх створення пов'язана з необхідністю збільшувати густину потоків частинок

до такого рівня, при якому просторова густина заряду іонів вже суттєво впливає на динаміку та фокусування частинок. Для того, щоб зменшити ефект просторового заряду передбачається створювати велику кількість паралельних пучків, які будуть з'єднуватися в камері реактора і прямувати на мішень. Характерний розмір лінійного прискорювача – кілька кілометрів.

Яким чином передбачається провести іонні пучки на відстань кілька метрів у камері реактора і сфокусувати їх у області розміром кілька міліметрів? Одна з можливих схем полягає в самофокусуванні пучків, яке може відбуватися в газі низького тиску. Пучок буде викликати іонізацію газу та компенсуючий зустрічний електричний струм, що протікає по плазмі. Азімутальне магнітне поле, яке створюється результуючим струмом (різницею струму пучка та зворотного струму плазми), буде призводити до радіального стиснення пучка та його фокусування. Чисельне моделювання показує, що, в принципі, така схема можлива, якщо тиск газу підтримуватиметься в потрібному діапазоні 1-100 Торр.

І хоча пучки важких іонів відкривають перспективу створення ефективного драйвера для термоядерного реактора, вони мають перед собою колосальні технічні труднощі, які ще доведеться подолати, перш ніж мета буде досягнута. Для термоядерних додатків потрібен прискорювач, який створюватиме пучок 10 ГеВ-них іонів з піковим струмом у кілька десятків КА та із середньою потужністю близько 15 МВт. Об'єм магнітної системи такого прискорювача порівнюємо з обсягом магнітної системи ТОКАМАКа-реактора і, тому, можна очікувати, що їх вартості будуть одного порядку.

9.3.8 Камера імпульсного реактора

На відміну від магнітного термоядерного реактора, де потрібен високий вакуум та чистота плазми, до камери імпульсного реактора такі вимоги не пред'являються. Основні технологічні проблеми створення імпульсних реакторів лежать у галузі драйверної техніки, створенні прецизійних мішеней та систем, що дозволяють подавати та контролювати положення мішені в камері. Сама камера імпульсного реактора має відносно просту конструкцію. Більшість проектів передбачає використання рідкої стінки створювану відкритим теплоносієм. Наприклад, проект реактора NYLIFE-11 використовує розплавлену сіль Li_2BeF_4 , рідка завеса з

якої оточує область, куди надходять мішені. Рідка стінка поглинатиме нейтронне випромінювання та змивати залишки мішеней. Вона ж демпфує тиск мікровибухів і поступово передає її на основну стінку камери. Характерний зовнішній діаметр камери близько 8 м, її висота – близько 20 м. Повна витрата рідкого теплоносія за оцінками складатиме близько 50 м³/с, що цілком можливо.

Передбачається, що крім основного, стаціонарного потоку, в камері буде зроблено імпульсну рідку заслінку, яка буде відкриватися синхронізовано з подачею мішені із частотою близько 5 Гц для пропускання пучка важких іонів.

Потрібна точність подачі мішені становить частки міліметрів. Очевидно, що пасивна подача мішені на відстань у кілька метрів з такою точністю в камері, в якій відбуватимуться турбулентні потоки газу, викликані вибухами попередніх мішеней, є практично нездійсненним завданням. Тому, в реакторі буде потрібна система управління, що дозволяє відстежувати положення мішені та виробляти динамічне фокусування пучка. В принципі, таке завдання здійсненне, але може суттєво ускладнити керування реактором.

9.4 Вимоги до матеріалів та радіаційна безпека термоядерних реакторів

9.4.1 Матеріали для термоядерних реакторів

Створення економічного та безпечного термоядерного реактора вимагає розробки спеціальних конструкційних матеріалів для першої стінки та бланкету, для компонентів, що працюють в умовах високих теплових потоків, надпровідних магнітів, систем нагрівання плазми, драйверів для інерційного синтезу та інш.

Хоча DT-реакції найлегше здійсненні, з плазмофізичного боку вони пред'являють найскладніші і специфічні вимоги до матеріалів першої стінки та бланкету:

- 1) Матеріали першої стінки та бланкету повинні працювати протягом кількох десятків років в умовах високої температури та нейтронного опромінення з повним флюенсом 14.1 MeV-них нейтронів до 15 МВт років/м².

2) Сплави та композитні матеріали не повинні містити елементів, які під дією нейтронів перетворюються на довгоживучі радіоактивні ізотопи. Після припинення роботи реактора їхня радіоактивність має знижуватися до рівня "hands on level" протягом кількох десятків років.

3) Матеріали повинні бути хімічно сумісні з теплоносієм та матеріалами, що відтворюють тритій, такими, як літій.

Дослідження показали, що 14.1 MeV-ні нейтрони не призводять до додаткових специфічних механізмів пошкодження матеріалів порівняно з добре вивченим спектром нейтронів із середньою енергією 4 MeV, характерним для ядерного реактора поділу. Нейтронне випромінювання викликає зміщення атомів в кристалічні грати та ядерні реакції трансмутації, які змінюють склад матеріалів. В останньому типі пошкоджень основну роль відіграють реакції (n, α) , які призводять до появи мікропухирців гелію і, як наслідок, викликають радіаційне розпухання матеріалу, його охрупчування та втрату міцності. В умовах, в яких знаходиться перша стінка термоядерного реактора, гелій утворюється у великих кількостях у всіх матеріалах. Основне завдання досліджень у цьому напрямку підбір та випробування матеріалів та їх сполук, мають максимальний опір до нейтронних ушкоджень та сумісних з теплоносіями та вимогами щодо радіаційної безпеки.

В даний час розроблено кілька перспективних кандидатів для матеріалів першої стінки та бланкету.

Серед них особливу увагу привертають ванадієві сплави, такі як ванадій-титанові сплави та композитні матеріали з карбїду кремнію (SiC), які мають не тільки нейтронну стійкість, але й не виробляють під дією нейтронів довгоживучих радіоактивних елементів. Як ванадієві сплави так і карбїд кремнію наразі активно досліджуються.

На відміну від магнітного термоядерного реактора, де потрібен високий вакуум та чистота плазми, до камери імпульсного реактора такі вимоги не пред'являються. Основні технологічні проблеми створення імпульсних реакторів лежать у галузі драйверної техніки, створенні прецизійних мішеней та систем, що дозволяють подавати та контролювати положення мішені в камері. Сама камера імпульсного реактора має відносно просту конструкцію. Більшість проектів передбачає використання рідкої стінки створювану відкритим теплоносієм. Наприклад, проект реактора NULIFE-11 використовує розплавлену сіль Li_2BeF_4 , рідка завеса з якої оточує область, куди надходять мішені. Рідка стінка поглинатиме

нейтронне випромінювання та змивати залишки мішеней. Вона ж демпфує тиск мікровибухів і поступово передає її на основну стінку камери. Характерний зовнішній діаметр камери близько 8 м, її висота – близько 20 м. Повна витрата рідкого теплоносія за оцінками складатиме близько 50 м³/с, що цілком можливо.

Передбачається, що крім основного, стаціонарного потоку, в камері буде зроблено імпульсну рідку заслінку, яка буде відкриватися синхронізовано з подачею мішені із частотою близько 5 Гц для пропускання пучка важких іонів.

Потрібна точність подачі мішені становить частки міліметрів. Очевидно, що пасивна подача мішені на відстань у кілька метрів з такою точністю в камері, в якій відбуватимуться турбулентні потоки газу, викликані вибухами попередніх мішеней, є практично нездійсненним завданням. Тому, в реакторі буде потрібна система управління, що дозволяє відстежувати положення мішені та виробляти динамічне фокусування пучка. В принципі, таке завдання здійсненне, але може суттєво ускладнити керування реактором.

9.4.2 Радіаційна безпека термоядерних реакторів

За минулі роки термоядерних досліджень було виконано досить детальні дослідження безпеки термоядерних реакторів та їхнього потенційного впливу на навколишнє середовище. Серйозна та комплексна опрацювання безпеки реактора на основі ТОКАМАКу було зроблено на інженерному етапі проектування першого експериментального реактора ІТЕР. Очевидно, що аналіз радіаційної безпеки та забруднення навколишнього середовища істотно залежить від конкретних інженерних рішень та конструкційних матеріалів. Тому тут ми торкнемося лише тих аспектів радіаційної безпеки реакторів, які є спільними для будь-якого типу DT-реактора.

На відміну від реактора поділу, утримання позитивного балансу енергії в термоядерному реакторі вимагає постійного та делікатного управління плазмою та точно синхронізованої роботи всіх основних систем реактора. Наприклад, в реакторі ТОКАМАК відмова майже будь-якої з його систем призводить або до втрати стійкості плазми, або забруднення її домішками з подальшим її охолодженням, або до втрати

рівноваги плазми та її зриву. Як наслідок буде порушено баланс енергії у плазмі та термоядерне горіння припиниться. Труднощі здійсненості керованої термоядерної реакції відіграє позитивну роль з погляду безпеки реактора. У будь-якому з відомих пристроїв для керованого термоядерного синтезу термоядерні реакції не можуть увійти в режим неконтрольованого наростання потужності без подальшого зриву плазми та припинення реакцій. Таким чином, термоядерним реакторам властива внутрішня безпека. Тим не менш, у процесі роботи реактора в ньому накопичуються радіоактивні елементи, які можуть представляти відому радіаційну небезпеку для персоналу, населення та навколишнього середовища.

Які радіоактивні речовини утворюються при роботі термоядерного реактора?

Термоядерне паливо (D, Li), як і кінцевий продукт реакцій (He), не є радіоактивними. Радіоактивними є проміжні продукти реакції. У реакторі, що використовує DT-реакції, існують два принципові джерела радіоактивності. По-перше, це тритій, який бере участь у паливному циклі реактора. Тритій перетворюється на He₃ з випромінюванням β-випромінювання з періодом напіврозпаду 12.3 років. Тритій, хоч і не створює проблем з точки зору довготривалого поховання радіоактивних відходів, становить радіаційну небезпеку для персоналу та населення у разі аварії та витоку тритію. Енергія електронів, що випускаються тритієм, досить мала, і поверхня шкіри добре захищає організм від β-випромінювання, проте тритій може потрапити в організм людини, проникнувши через шкіру, в результаті вдихання або з водою (зазначимо, що обмін речовин винесе його через десять-двадцять днів і тому тіло отримуватиме дозу протягом обмеженого часу).

Неприємною особливістю тритію є його мобільність. Він швидко розповсюджується в атмосфері з потоками повітря або, потрапивши у воду, із потоками води. З цієї причини для утримання тритію приймаються спеціальні заходи. Щоб запобігти викиду тритію в атмосферу будівлі реактора та інших цехів, що містять тритій, проектується таким чином, що вони не допускають витоку тритію навіть у разі його втрат з реактора та паливних циклів. Енергія, що міститься в самому термоядерному реакторі, мала і не може призвести до руйнування будівлі у разі аварії реактора.

Друге джерело радіоактивності - це активація нейтронами конструкційних матеріалів першої стінки та бланкета. В результаті

опромінення першої стінки нейтронами, в ній можуть утворюватись і накопичуватись радіоактивні продукти реакції. Зменшення активації стінки може бути досягнуто за рахунок вибору відповідних матеріалів та усунення з них домішок, які можуть давати довгоживучі радіоактивні ізотопи. Рис.9.17 показує, як активуються деякі матеріали у процесі роботи реактора і як спадає їх активність після припинення його роботи.

Радіоактивність, Ci/W(th)

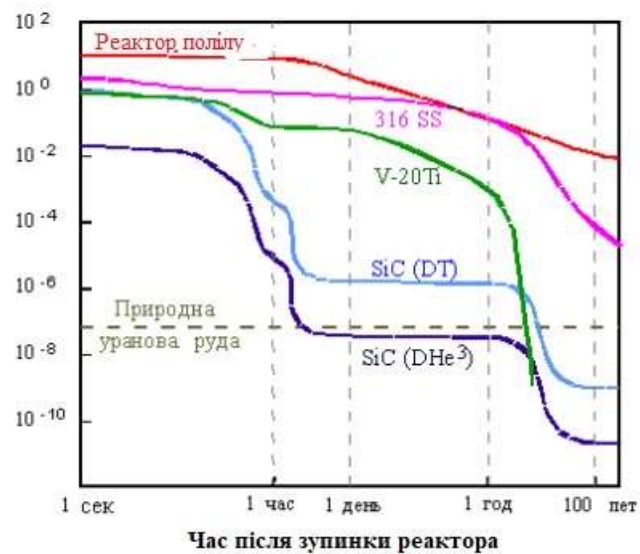


Рисунок 9.17 - Рівень радіоактивності в залежності від часу після зупинки реактора

Різні криві відповідають різним матеріалам, які використовуються в гарячій зоні термоядерного реактора. Верхня крива відповідає реактору поділу на швидких нейтронах з рідкометалевим теплоносієм.

Видно, що перша стінка, виконана з ванадій-титанового сплаву або карбїду кремнію, "остигає" приблизно за тридцять років після зупинки реактора рівня на порядок нижче активності руди природного урану. Поки що матеріали відносяться до розряду перспективних кандидатів і ще остаточно не ясно, чи можна їх використовувати в термоядерному реакторі.

Хоча активована перша стінка не належить до мобільних радіоактивних джерел, частина активованих матеріалів існують у камері реакторі у вигляді пилу або в теплоносії у вигляді продуктів корозії і тому можуть бути викинуті при аварії реактора.

Детальний аналіз можливих викидів тритію та радіоактивних матеріалів першої стінки в процесі роботи термоядерного реактора було виконано для проекту експериментального реактора ІТЕР. Очікується, що робота установки при незначних поломках обладнання супроводжуватиметься сумарним виотоком тритію на рівні 1 Г тритію та 0.5 Г продуктів активації першої стінки на рік. Максимально можливий викид залежить від масштабу аварії. Наприклад, для аварії, яка (умовно) має ймовірність $10^{-2} \div 10^{-4}$ на рік (тобто навряд чи станеться за весь час роботи установки) викиди тритію оцінюються, як 50 Г за одну таку подію. Така ж аварія призведе до викиду 25 Г активованих матеріалів стінки. Навіть у цьому випадку наведена радіоактивність буде значно нижче 50 mSv - рівня, потребує евакуації населення.

Таким чином, термоядерний реактор повинен мати надійний бар'єр для утримання хоч і відносно невеликої, але властивої йому радіоактивності. Порівняння безпеки термоядерного реактора з безпекою реактора поділу тієї ж потужності показує, що у випадку термоядерного реактора цей бар'єр повинен гарантувати зниження рівня радіоактивності за бар'єром лише один порядок величини. У разі реактора поділу тієї ж потужності бар'єри повинні гарантувати зниження на шість-сім порядків. Або іншими словами, термоядерна електростанція з тепловою потужністю 1 ГВт з погляду радіаційної небезпеки еквівалентна реактору поділу потужністю 1 кВт (потужність типового університетського дослідного реактора).

Розглянемо тепер проблему переробки та зберігання радіоактивних відходів. З рис.9.17 видно, що у разі, коли як конструкційний матеріал бланкета і першої стінки використовується сталь, наведена активність термоядерного реактора набагато нижче, ніж реактора поділу. Однак принципова відмінність буде у випадку, якщо як матеріал першої стінки будуть використані низькоактивовані матеріали такі, як карбід кремнію, або ванадієві сплави. Як видно з рис.9.17, за тридцять років їхня активність спадає до цілком безпечного рівня.

Реактор, який виробив свій ресурс, може бути законсервований на 30 років, а потім реактор може бути демонтовано та матеріали першої стінки можуть знову використовуватися. Принципова трудність на цьому шляху - це необхідність високої чистоти матеріалів по відношенню до деяких високоактивованих домішок.

Потрібні спеціальні технології, які дозволять уникнути забруднення матеріалів цими домішками і водночас будуть економічно прийнятними. Тритій та нейтрони - це специфіка DT-реакції. Реактор, заснований на реакції DHe₃, матиме лише домішки тритію в паливі, а нейтронні потоки будуть на порядок нижче, ніж у разі DT-реакції. Реакція протону з бором дуже чиста і виробляє ні нейтронів, ні тритію. Тому ці реакції дуже привабливі з погляду безпеки термоядерного реактора та його впливу на довкілля. На жаль, як уже зазначалося вище, умови позитивного виходу цих реакцій призводить до набагато жорсткіших умов, як стосовно температури суміші, так і величини n_E . Реактори, що використовують вищезгадані перспективні палива, хоч і реалізовані на дослідницькому рівні, але їх промислове використання є справою майбутнього.

9.5 Перспективи термоядерної енергетики

Таким чином, термоядерна енергетика – це потенційний кандидат для базової енергетики майбутнього. Термояд має практично необмежені запаси палива та інших матеріалів, що використовуються під час виробництва енергії.

Існує принципова можливість створення низькоактивних конструкційних матеріалів, які будуть "остигати" за кілька десятків років і потім зможуть бути перероблені і використані знову.

Безпека термоядерного реактора на багато порядків перевершує безпеку ядерних електростанцій, які працюють на реакції поділу ядер.

Основним недоліком термоядерних реакторів є технологічна складність здійснення самопідтримуючої термоядерної реакції. Системи з магнітним утриманням вимагають величезних надпровідних магнітних котушок, глибокого вакууму та чистоти стінок реактора, вміння утилізувати високі теплові та нейтронні потоки, дистанційного обслуговування реактора. Імпульсні системи потребують розвитку ефективних драйверів, здатних сконцентрувати потужності понад 10^{14} Вт/см² та рівномірно опромінювати міліметрові мішені, виготовлені з прецизійною точністю.

Наведений аналіз принципів термоядерного синтезу показує, що майже у всіх напрямках відбувається безперервний та впевнений прогрес. За допомогою ТОКАМАК досягли термоядерного виходу $Q_{\text{fus}} \sim 1$ і показали можливість стати прототипом магнітного термоядерного реактора. Не викликає сумнівів, що в наступному поколінні будуть

досягнуті умови запалення і вироблення термоядерної потужності на рівні 1 ГВт. Проект міжнародного реактора-ТОКАМАКа, ІТЕР показав, що така машина може бути побудована при сучасному рівні розвитку технології та буде здатна провести фізичні та ядерно-технологічні випробування, необхідні для створення першої дослідної термоядерної електростанції. Очікується, що ІТЕР розпочне роботу до 2030-2031 р. До цього часу може бути побудовано і першу дослідну термоядерну електростанцію на основі ТОКАМАКа.

Величезний прогрес було досягнуто й у галузі імпульсної термоядерної техніки. Були розроблені мішені, здатні забезпечувати високий термоядерний вихід, визначено мінімальні масштаби драйверів та сформульовано необхідні технічні вимоги. В даний час у США активно будується перша лазерна установка NIF, яка буде здатна отримати позитивний термоядерний вихід у лабораторних умовах. Очікується, що отримані експериментальні результати дозволять розробити ефективні мішені з великим термоядерним виходом. Паралельно буде проводитися робота зі створення ефективних драйверів для обтискання мішеней. Безперечно, що розробка інерційного термоядерного реактора вимагатиме не одну проміжну установку. Передбачається, що наступна після NIF машина буде здатна здійснювати багаторазові обтискання мішеней із необхідною частотою повторюваності. На цьому етапі будуть перевірені прототипи камер для реактора, здатні знімати теплові та механічні навантаження. Основне завдання цього напрямку керованого термоядерного синтезу; розробка ефективних драйверів. Якщо ТОКАМАК вже готовий до того, щоб зробити наступний крок до встановлення, в якому будуть проінтегровані всі необхідні вузли термоядерного реактора, інерційний синтез, поки що, знаходиться на стадії фізичних досліджень і, найімовірніше, буде готовий до будівництва першої дослідної електростанції років на 20 пізніше, ніж реактор, заснований на магнітному утриманні, тобто, до 2050. Саме до цього часу виникне необхідність заміни нинішнього енергетичного носія – органічних палив. До середини століття очікується поява серйозних ядерних споживачів і в тому числі термоядерної енергетики. Поки що термоядерна програма розвивається за рахунок державного фінансування, що становить у сумі за всіма країнами близько 1.2-1.3 млрд. доларів на рік. Існує хибна точка зору, повторюється іноді у засобах масової інформації, що термоядерні дослідження це надзвичайно дорога програма.

Те, що це не так, можна бачити, проноормувавши повну суму на душу платника податків країн, які беруть активну участь у термоядерних дослідженнях - США, Японії, Європи та Росії. Виявляється, що середній платник податків цих країн платить 2-3 долари на рік на розвиток термоядерної енергетики, що становить лише 0.1% його витрат на електроенергію та інші енергоносії. І хоча попередні оцінки показують, що ціна електроенергії, що виробляється термоядерним реактором, буде в 1.5-2 рази вище, ніж нинішня ціна електроенергії, що виробляється сучасними електростанціями, що спалюють органічне паливо. Таке порівняння є неправомірним для систем, які конкуруватимуть лише через кілька десятків років. Безперервний прогрес у галузі термоядерного синтезу, який відбувався протягом останніх 30 років, приводив до поступового, але впевненого поступу в параметри плазми в термоядерних пристроях. У той же час очікується, що в довгостроковій перспективі традиційні методи виробництва енергії будуть відчувати економічні, що все більш підсилені наслідки забруднення довкілля .

Дуже важливо зберігати стійкість та широту досліджень у галузі освоєння ядерних реакцій синтезу та створювати умови, що дозволяють безперервний технологічний прогрес у цьому напрямі. Це є абсолютно необхідною умовою готовності термоядерної енергетики до середини поточного століття.

Контрольні питання до розділу 9.

1. Що таке воднева енергетика?
2. Яка температура потрібна для термоядерного синтезу?
3. Які умови потрібні для термоядерного синтезу?
4. Скільки енергії дає термоядерний синтез?
5. Звідки береться енергія при термоядерному синтезі?
6. Що таке ТОКАМАК?
7. Що таке СТЕЛЛАРАТОР?
8. В чому полягає критерій Лоусона?
9. Чому дорівнює температура термоядерної плазми?
10. Наведіть приклади реакцій термоядерного синтезу.
11. На яких фізичних принципах базується робота магнітної пастки?
12. Що таке бланкет?
13. Що таке флюєнс?

14. Масштаб типового прискорювача?
15. Чому дорівнює потужність термоядерної реакції?
16. Що таке драйвер?
17. Що таке інерційний термоядерний синтез.
18. Оцініть перспективи термоядерної енергетики.
19. Який параметри визначає умови протікання термоядерного синтезу?
20. Що таке тороїдальний дивертор?
21. Що таке термоядерна плазма?
22. Яку радіаційну загрозу створює термоядерний реактор?

ВИКОРИСТАНІ ДЖЕРЕЛА

1. Герасимов О.І. Технології захисту навколишнього середовища : підручник. Одеса: ТЕС, 2019. 268 с.
2. Герасимов О.І. Теоретичні основи технологій захисту навколишнього середовища : навчальний посібник. Одеса: ТЕС, 2018. 228 с.
3. Ветошкин А.Г., Таранцева К.Р. Технология защиты окружающей среды: учебное пособие. Изд-во Пенз. техн. ин-та, 2004. 249 с.
4. Gerasymov O.I. Introduction to nonlinear analysis for radioecologists. Lecture Notes. OSENU. Odesa: TES, 2014. 60 p.
5. Технології захисту навколишнього середовища : навчальний посібник / Герасимов О.І., Андріанова І.С., Курятников В.В., Співак А.Я. Одеса: ОДЕКУ, 2021. 213с.
6. Методи організації радіаційної безпеки : навчальний посібник / Герасимов О.І. та ін. Одеса: Одеський державний екологічний університет, 2022. 183 с.
7. Аппараты очистки газов от пыли: метод. указания. Омск: Издво ОмГТУ, 2003. 40 с.
8. Газоочистное оборудование: каталог. Москва: ЦИНТИХИМНЕФТЕМАШ, 1988. 120 с.
9. Коузов П.А. Очистка от пыли газов и воздуха в химической промышленности. Ленинград: Химия, 1982. 256 с.
10. Методы и системы очистки газов: учеб. Пособие / М.Ш. Баркан и др. СПб.: Санкт Петербургский государственный горный институт, 2007. 94 с.
11. Аистов И.П. Определение эффективности очистки пылеочистных аппаратов: метод. указ. Омск: Изд-во ОмГТУ, 2009. 58 с.
12. Пирумов А.И. Обеспыливание воздуха. Москва: Стройиздат, 1981. 296 с.
13. Аистов И.П. Расчет пылеочистных установок: метод. указ. Омск: Изд-во ОмГТУ, 2007. 16 с.
14. Юшин В.В. Техника и технология защиты воздушной среды: учеб. пос. Москва: Высш. школа, 2005. 391 с.
15. Мазус М.Г. Фильтры для улавливания промышленных пылей. Москва: Машиностроение, 1985. 240 с.
16. Штокман Е.А. Очистка воздуха от пыли : учебн. пос. Ростов н/Д.: РИСТИ, 1977. 108 с.

17. Чегодаев Д.Е., Пономарев Ю.К. Шумодемпфирование. Самара:СГАУ, 1997. 334 с.
18. Колосов Ю.В., Барановский В.В. Вибрации и шум на производстве. Санкт-П. технический ун-т, 2011 .44 с.
- 19.Artsimovich L.A. Controlled Thermonuclear Reactions. NY: Gordon and Breach, 1964. 467 p.
20. Niu K . Nuclear Fusion. Cambridge: Cambridge University Press, 1989. 340 p.
- 21.Fowler T.K. The Fusion .NY:The J.Hopkins Univ. Press, 1997. 200 p.
22. Хеглер М., Кристиансен М. Введение в управляемый термояд. Москва: Мир, 1980. 230 с.
23. Дмитренко Н.В. Лазерный термоядерный синтез. Москва: ЛКИ, 2013. 200 с.
- 24.Ведмеденко И.. Китайский термоядерный реактор установил новый рекорд непрерывной работы плазмы при высокой температуре. Архивная копия от 8 января 2022 на Wayback Machine / 04.01.2022 «Naked Science».

ПРЕДМЕТНИЙ ПОКАЖЧИК

- абсорбція, 2
- агротехнічні методи, 14
- аерозолі, 7
- альфа-випромінювання, 3
- бета-випромінювання, 3
- випромінювання нуклідів, 3
- вібрації, 4
- вібрації, 77
- вітроенергетика, 4
- гамма-випромінювання, 72
- гідромеханіка, 2
- гідросфера, 2
- гідросфера, 7
- гравітаційне осадження, 3
- грунти, 2, 13
- дисперсна фаза, 20
- драйвери, 5
- електрокоагуляція, 7
- електрофільтр, 36
- електрофлотація, 7
- закон Генрі, 49
- іонний обмін, 7
- іонні пучки, 5
- каталітичні методи, 2
- Кенінгема-Міллікена метод, 3
- керований термоядерний синтез, 4
- коагуляція, 7
- літосфера, 7
- модель Стокса, 3, 24
- парогазові викиди, 19
- рекультивація, 14
- санітарно-захисні зони, 18
- сонячна енергетика, 4
- СТЕЛЛАРАТОР, 4
- термохімічний метод, 2
- ТОКАМАК, 4
- фазові перетворення, 7
- фільтрація, 7
- флокуляція, 7
- ядерна енергетика, 4

Навчальне електронне видання

Герасимов Олег Іванович

Фізичні основи технологій захисту навколишнього середовища

Підручник

Видавець і виготовлювач
Одеський державний екологічний університет
вул. Львівська, 15, м. Одеса, 65016
тел./факс: (0482) 32-67-35
E-mail: info@odeku.edu.ua
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
ДК № 5242 від 08.11.2016