

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ЦИВІЛЬНОГО ЗАХИСТУ УКРАЇНИ

(повне найменування вищого навчального закладу)

ФАКУЛЬТЕТ ОПЕРАТИВНО-РЯТУВАЛЬНИХ СИЛ

(повне найменування інституту, назва факультету (відділення))

КАФЕДРА СПЕЦІАЛЬНОЇ ХІМІЇ ТА ХІМІЧНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ

(повна назва кафедри (предметної, циклової комісії))

Пояснювальна записка

до кваліфікаційної роботи
за першим (бакалаврським) рівнем вищої освіти

(освітньо-кваліфікаційний рівень)

На тему: «Аналіз стану застосування радіаційних технологій у народному господарстві»

Виконав: здобувач вищої освіти 4 курсу за
першим (бакалаврським) рівнем вищої освіти
групи ХТкс-16-243
галузі знань(освітньо-професійної програми)
16 «Хімічна та біоінженерія»
(«Радіаційний та хімічний захист»)
(шифр і назва напрямку підготовки, спеціальності)

Антон ФІЛІЧЕНКО

(ім'я та ПРІЗВИЩЕ)

Керівник: Дмитро ТРЕГУБОВ

(ім'я та ПРІЗВИЩЕ)

Рецензент: Павло БОРОДИЧ

(ім'я та ПРІЗВИЩЕ)

Харків - 2020 року

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ЦИВІЛЬНОГО ЗАХИСТУ УКРАЇНИ

Факультет (підрозділ) оперативно-рятувальних сил
Кафедра спеціальної хімії та хімічної технології
Галузь знань 16 «Хімічна та біоінженерія»
Спеціальність 161 «Хімічні технології та інженерія»
(назва)
Освітньо-професійна програма «Радіаційний та хімічний захист»
(назва)
Рівень вищої освіти перший (бакалаврський)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Начальник кафедри СХХТ

Олена ТАРАХНО

“ ” 2020 року

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧА ВИЩОЇ ОСВІТИ

Філіченко Антон Сергійович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи «Аналіз стану застосування радіаційних технологій у народному господарстві»

Керівник роботи Трегубов Дмитро Георгійович, доцент кафедри, к.т.н

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

Затверджено наказом НУЦЗУ від 10.04.2020 №52

2. Строк подання курсантом роботи: _____

3. Вихідні дані до роботи: розрахунок можливої аварії з розгерметизації сховища

РАВ : категорія стійкості атмосфери-А, сильно нестійка (конвекція), швидкість

вітру - 2 м/с, вихід активності - 3% (за методикою для реакторів).

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити:

Розділ 1 Напрямки використання радіаційних технологій у народному

господарстві

Розділ 2 Джерела радіаційного випромінювання

Розділ 3 Системи радіаційного контролю та захисту

Розділ 4 Проблеми та перспективи використання у якості джерел опромінення

радіоактивних відходів

Розділ 5 Охорона праці

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)

Презентаційний матеріал на 23 слайдах

6. Консультанти розділів роботи

| Розділ | Прізвище, ініціали та посада Консультанта | Підпис, дата | |
|------------------------|--|-------------------|---------------------|
| | | завдання видав | Завдання прийняв |
| Розділ 2 | Кіреєв О.О. | | |
| 5. Охорона праці | Дейнека В.В. | | |
| | | | |

7. Дата видачі завдання _____

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

| № з/п | Назва етапів дипломної роботи | Строк виконання етапів роботи | Примітка |
|-------|---|-------------------------------|----------|
| 1. | Підбір джерел інформації, обґрунтування вибору дослідницьких методик | 18.03.2020 | Виконано |
| 2. | Складання плану кваліфікаційної роботи | 25.03.2020 | Виконано |
| 3. | Аналітичний огляд джерел інформації | 30.03.2020 | Виконано |
| 4. | Підготовка розділу: Напрямки використання радіаційних технологій у народному господарстві | 05.04.2020 | Виконано |
| 5. | Джерела радіаційного випромінювання | 13.04.2020 | Виконано |
| 6. | Системи радіаційного контролю та захисту | 20.04.2020 | Виконано |
| 7. | Проблеми та перспективи використання у якості джерел опромінення радіоактивних відходів | 28.04.2020 | Виконано |
| 8. | Охорона праці | 08.05.2020 | Виконано |
| 9. | Оформлення звіту про виконання кваліфікаційної роботи, підготовка презентації до захисту | 17.04.2020 | Виконано |
| 10. | Відправлення кваліфікаційної роботи на рецензування | 25.04.2020 | Виконано |
| 11. | Представлення завершеної кваліфікаційної роботи на допуск до захисту | 28.04.2020 | Виконано |
| 12. | Оформлення пояснювальної записки та документації | 05.06.2020 | |

Здобувач вищої освіти _____
(підпис)

АНТОН ФІЛІЧЕНКО
(Власне ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Керівник роботи _____
(підпис)

Дмитро ТРЕГУБОВ
(Власне ім'я ПРІЗВИЩЕ)

РЕФЕРАТ

Звіт про КР: 86 с., 21 рис., 14 табл., 68 джерел.

Ключові слова: радіаційні технології, іонізуюче випромінювання, детектування, радіоактивні відходи, контроль, обробка.

Об'єкт досліджень: обробка речовин за допомогою наведеного випромінювання від конструкцій діючих АЕС та використання радіоактивних відходів.

Мета роботи: проаналізувати стан та визначити перспективи застосування радіаційних технологій у сферах народного господарства.

Стислий зміст роботи та висновки: радіаційні технології знайшли широке використання у сільськогосподарській та харчовій галузі, вони є основними споживачами джерел іонізуючого випромінювання для радіаційної обробки.

За умови застосування радіаційної обробки у народному господарстві необхідно застосовувати системи та засоби контролю режимів обробки, доз опромінення персоналу та радіаційного фону у зоні спостереження біля апарату.

На даний час на Україні зберігається близько 4 млн. м³ РАВ. При їх транспортуванні або використанні необхідно враховувати ступінь їх радіаційної небезпеки на підставі законів України про охорону праці та радіаційну безпеку

Основним джерелом РАВ в Україні є результат роботи АЕС, де утворюються рідкі та тверді відходи, які потребують переробки та зберігання з різним ступенем заходів безпеки. Ці речовини можна розташовувати у блоках випромінювання замість стандартних ДІВ. Існує варіант використання для обробки речовин наведеного випромінювання від конструкцій діючих АЕС. Для більшості напрямків практичного застосування іонізуючого випромінювання достатньо дози до 10 кГр.

Область використання: використання РАВ та наведеного випромінювання конструкцій АЕС для обробки речовин замість стандартних ДІВ.

Зміст

| | |
|--|----|
| Перелік умовних позначень | 7 |
| Вступ | 8 |
| Розділ 1 НАПРЯМКИ ВИКОРИСТАННЯ РАДІАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ У НАРОДНОМУ ГОСПОДАРСТВІ | |
| 1.1 Аналіз застосування радіаційних технологій у сільському господарстві | 10 |
| 1.2 Аналіз застосування радіаційних технологій у медичній галузі..... | 13 |
| 1.3. Аналіз застосування радіаційних технологій при визначенні дефектів | 15 |
| 1.4. Аналіз застосування радіаційних технологій у харчовій промисловості | 22 |
| 1.5. Аналіз використання радіаційних технологій у хімічній промисловості | 29 |
| 1.6. Конвергенція радіаційних технологій | 32 |
| Розділ 2 ДЖЕРЕЛА РАДІАЦІЙНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ | |
| 2.1. Природні та антропогенні джерела випромінювання..... | 34 |
| 2.2. Види іонізуючого випромінювання..... | 37 |
| 2.3. Параметри, що характеризують іонізуюче випромінювання..... | 39 |
| 2.4. Використання іонізуючого випромінювання | 41 |
| 2.5. Дія іонізуючого випромінювання на речовину..... | 43 |
| 2.6. Використання різних типів іонізуючого випромінювання при дослідженнях просвічуванням..... | 44 |
| Розділ 3 СИСТЕМИ РАДІАЦІЙНОГО КОНТРОЛЮ ТА ЗАХИСТУ | |
| 3.1. Параметри, способи та типи реєстрації іонізуючого випромінювання | 46 |
| 3.2. Сцинтиляційні детектори | 50 |
| 3.3. Радіографія..... | 52 |
| 3.4. Радіоскопія | 54 |
| 3.5. Контроль за обігом джерел іонізуючого випромінювання | 57 |

| | | | | | | | | | | | | | | |
|-----------|------------------|----------|--------|------|--|--|--|--|--|------------------------|------|--------|--|--|
| | | | | | НУЦЗУ.2.16-47. СХ та ХТ РПЗ-02 | | | | | | | | | |
| Зм | Лист | № докум. | Підпис | Дата | Аналіз стану застосування радіаційних технологій у народному господарстві | | | | | | | | | |
| Розробив | Філіченко А.С. | | | | | | | | | Літ. | Лист | Листів | | |
| Перевірив | Трегубов Д.Г. | | | | | | | | | | 5 | 86 | | |
| Н. контр | Скородумова О.Б. | | | | | | | | | ХТкс – 16 – 243 | | | | |
| Затв. | Тарахно О.В. | | | | | | | | | | | | | |

Розділ 4 ПРОБЛЕМИ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ВИКОРИСТАННЯ У ЯКОСТІ ДЖЕРЕЛ
ОПРОМІНЕННЯ РАДІОАКТИВНИХ ВІДХОДІВ

| | |
|--|----|
| 4.1. Класифікація радіоактивних відходів за небезпекою..... | 64 |
| 4.2. Поводження з радіоактивними відходами | 68 |
| 4.3. Зберігання радіоактивних відходів..... | 72 |
| 4.4. Сучасний стан поведження з РАВ на Україні | 76 |
| 4.5. Можливість використання радіаційних відходів для технологій опромінення | 77 |

Розділ 5. ОХОРОНА ПРАЦІ

| | |
|---|----|
| 5.1. Загальні засади охорони праці при поведженні з РАВ | 80 |
| 5.2. Аналіз ймовірної аварійної ситуації з розгерметизацією контейнера з РАВ..... | 82 |
| 5.3. Радіаційна безпека застосування радіаційних технологій | 84 |

| | |
|---------------|----|
| ВИСНОВКИ..... | 87 |
|---------------|----|

| | |
|---------------------------------|----|
| Перелік джерел інформації | 89 |
|---------------------------------|----|

Перелік умовних позначень

РП – радіаційних препаратів
ПЕТ – Позитронно-емісійна томографія
ФЕ – флуороскопічні екрани
СК – сцинтиляційні кристали
РЕОП – радіаційні електронно-оптичні перетворювачі
ЕОП – електронно-оптичний підсилювач
РВ – рентгеновідікон
ОФЕКТ – одно фотонна емісійна комп’ютерна томографія
МРТ – магнітно-резонансна томографія
ФЕП – фотоелектронний помножувач
АЯЕ – агенція з ядерної енергії
ОЕСР – організація економічного співробітництва та розвитку
ВООЗ – Всесвітня організація охорони здоров’я
МАГАТЕ – міжнародна агенція з атомної енергії
ДІВ – джерела іонізуючого випромінювання
ДМСК – державний міжобласний спеціальний комбінат
СРК – система радіаційного контролю
АСКРО – автоматична система керування радіаційною обстановкою
САОЗ – система аварійного охолодження активної зони реактора
СВО – система водяного охолодження
ЯПЦ – ядерно-паливний цикл
РАВ – радіоактивні відходи
РРВ – рідкі радіоактивні відходи
ТРВ – тверді радіоактивні відходи
ТВЕЛ – тепловиділяючий елемент
МКРЗ – міжнародна комісія з радіологічного захисту
ТУЕ – трансуранові елементи
ВЯП – відпрацьоване ядерне паливо

| | | | | | | |
|----|------|--------|---------|------|--|------|
| | | | | | НУЦЗУ. 2.16-47.СХ та ХТ. РПЗ-02 | Лист |
| | | | | | | 7 |
| Зм | Лист | Підпис | № докум | Дата | | |

Вступ

Застосування радіаційно-небезпечних технологій в сучасному народному господарстві різноманітно і приносить користь суспільству в багатьох сферах життєдіяльності. Однак одночасно виникає небезпека для працівників, які експлуатують цю технологію, населення і навколишнього середовища.

Небезпека радіаційних технологій пов'язана з виникненням α -, β -, γ - частинок, а також жорсткого випромінювання, які, потрапляючи в живі клітини, викликають їх руйнування [32, 36]. Іонізація може привести до розпаду вихідної органічної молекули на кілька частин. Тому необхідний ретельний контроль доз випромінювання.

Найбільш відомою технологією пов'язаної з виникненням радіації є атомна енергетика [38]. У той же час, це і найбільш небезпечний напрям використання даної групи технологій. Тому перспективним напрямком є розвиток термоядерної енергетики, яка виключає вибуховий розвиток ядерної реакції і має меншу кількість радіоактивних ізотопів.

Крім енергетики, радіаційно-небезпечні технології широко використовуються в сільському господарстві, медицині, при біологічних дослідженнях, харчовій промисловості, машинобудуванні, огляді пасажирів, при вивченні та контролі теплообмінних процесів [45].

Так, в сільському господарстві за допомогою даних технологій стимулюють схожість і ріст насіння, виробляють їх дезінфекцію та дезінсекцію, підвищують врожайність і збереженість отриманої продукції і насінневого матеріалу. Крім цього, радіація активно використовується в штучному мутагенезу у тих чи інших рослин, тварин в рамках радіаційної селекції, при дослідженні біологічних процесів в організмі. У харчовій промисловості також стикаються з необхідністю зберігання і перевезення сільськогосподарської продукції, що створює необхідність застосування відповідних оберігають заходів, наприклад, радіаційної обробки.

У медицині радіація широко застосовується для різноманітної рентгеноскопії, стерилізації хірургічних інструментів, знищення мікробів і пригнічення росту злоякісних пухлин, γ -ніж - дозволяє робити операції без розрізів.

| | | | | | | |
|----|------|--------|---------|------|--|------|
| | | | | | НУЦЗУ. 2.16-47.СХ та ХТ. РПЗ-02 | Лист |
| | | | | | | 8 |
| Зм | Лист | Підпис | № докум | Дата | | |

У промисловості радіаційні технології використовують: для характеристики зносу поршневих кілець опромінених нейтронами щодо підвищення радіоактивності масла; для дослідження масообмінних процесів в доменних печах, при дифузії та ін .; для діагностики дефектів металевих виливків, сюди ж можна віднести детекцію в процесі митного огляду й ін. У хімічній промисловості існує окрема галузь - радіаційна хімія, яка займається підвищенням ефективності виробництва і здійсненням реакцій, які в звичайних умовах не протікають.

Таким чином, радіаційні технології мають можливості широкого застосування в народному господарстві. Це підтверджується даними світової статистики. Так, радіаційна обробка харчових продуктів здійснюється більш ніж в 60 країнах світу. За відомостями Міжнародної радіаційної асоціації, тільки Європа щорічно випускає на ринок більш 200 тисяч тонн радіаційнооброблених продуктів. Річний обсяг опромінених продуктів харчування в світі - це 700-800 тис. тонн. А ринок цих послуг досягає \$2 млрд. та має тенденцію до зростання, а до 2030 року він збільшиться до \$10,9 млрд. Близько 40 країн проводять опромінення харчової продукції на постійній основі. Однак, на Україні ці технології впроваджуються вкрай пасивно, що в значній мірі визначається великими капітальними витратами на організацію таких технологій, в тому числі на організацію заходів безпеки їх застосування. Так, в Одесі в 2000 році в порту встановили обладнання, розроблене в Україні, для обробки харчової продукції, що прибуває і відправляється, проте її використання в економічних реаліях сьогодення виявилось не вигідним. Тому актуальним залишається питання зниження собівартості такої обробки в промислових масштабах.

| | | | | | | |
|----|------|--------|---------|------|--|------|
| | | | | | НУЦЗУ. 2.16-47.СХ та ХТ. РПЗ-02 | Лист |
| | | | | | | 9 |
| Зм | Лист | Підпис | № докум | Дата | | |

Розділ 1. НАПРЯМКИ ВИКОРИСТАННЯ РАДІАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ У НАРОДНОМУ ГОСПОДАРСТВІ

1.1. Аналіз застосування радіаційних технологій у сільському господарстві

Життєдіяльність мікроорганізмів у сільськогосподарських продуктах може призводити до їх зіпсування, а в деяких випадках – до мікробіологічного самозаймання. Самозаймання – це різке збільшення швидкості екзотермічних об'ємних реакцій, яке призводить до різкого підвищення температури й до виникнення горіння речовин при відсутності джерела запалювання. Життєдіяльність мікроорганізмів призводить до виникнення теплових процесів самонагрівання у купі рослинної речовини, що може призвести до її загоряння. Виділена у частині дисперсного насипу теплота локалізується теплоізоляційним шаром рослинної сировини. Це явище спостерігається під час зберігання зерна, сіна, торфу. За температур 65–75 °С більшість мікроорганізмів гине, але потім генерація тепла проходить вже за рахунок хімічних екзотермічних процесів. Але існують і більш термостійкі мікроорганізми, так картопляна паличка витримує 120 °С протягом години. Певних успіхів у боротьбі з розвитком сільськогосподарських продуктів надає підтримання жорстких умов зберігання – низьких температури та вологості.

Рекомендують проводити радіаційну дезінсекцію зерна та борошна для його дезінсекції від комах, які знищують до 15% їх світових запасів під час зберігання [45]. Для боротьби з ними застосовують хімічні методи, які не завжди безпечні для людини. Тому був розроблений радіаційний спосіб дезінсекції зерна, обробка його іонізуючим випромінюванням (γ - (^{60}Co) або електронне) перед завантаженням в елеватори чи інші сховища. Доза радіаційної дезінсекції 0,1–0,2 кГр викликає негайну статеву стерилізацію і поступову загибель комах і кліщів на всіх стадіях розвитку протягом 10–15 діб, а при дозах 1,0 кГр викликає негайну загибель. Для дезінсекції зерна пшениці, кукурудзи і ячменю продовольчого і кормового призначення, а також кормового сорго використовують дози 0,2–0,3 кГр, що не змінює харчові і кормові якості зерна, але знижує його схожість, тому насіннєве зерно піддавати радіаційної обробці за означених доз не можна, що не стосується борошна. Радіаційну дезінсекцію запроваджено з 1963 року [31].

| | | | | | | |
|----|------|--------|---------|------|--|------|
| | | | | | НУЦЗУ. 2.16-47.СХ та ХТ. РПЗ-02 | Лист |
| | | | | | | 10 |
| Зм | Лист | Підпис | № докум | Дата | | |

Так, для хімічної дезінфекції-дезинсекції час обробки та витримування, щот забезпечує безпечні умови подальшого використання – 30-45 днів за ефективністю для усього спектру комах – близько 50 %. Радіаційна ж обробка дозволяє підвищити ефективність таких заходів до 100 % при повному часі обробки та витримування – 1 доба.

Зерно зі шкідниками (рис.1.1., а) норією 15 подається в бункер 14 місткістю близько 10 м³, обладнаний ґратами для відбору із зернової маси великих домішок і датчиками 1 для контролю рівня. Далі зерно за допомогою регульованої засувки 13 надходить в блок 77, який забезпечує створення потоку товщиною 7 - 9 мм, розгорнутого на ширину 1,5 м. При необхідності надходження зерна може бути припинено за допомогою швидкодіючої засувки 12. У каналі 10 зерновий потік розганяється до швидкості близько 6 м/с і в камері 7 проходить зону опромінення, отримуючи дозу від 0,20 до 4,0 кГр. Щоб запобігти перегріву робочої поверхні - зона опромінення забезпечена радіатором водяного охолодження 9. Джерелом опромінення є прискорювач електронів 8 типу ЕЛВ-2. Енергія створюваного ним електронного пучка 1,5 МеВ, потужність 20 кВт. Після аспіраційної камери 6, де відбувається відсмоктування пилу, дрібних і легких домішок, а також озону, опромінене зерно потрапляє в демпфуючий бункер 5, рівень зерна в якому підтримується автоматичним пристроєм 3 за допомогою датчиків 7.

| | | | | | | |
|----|------|--------|---------|------|--|------|
| | | | | | НУЦЗУ. 2.16-47.СХ та ХТ. РПЗ-02 | Лист |
| | | | | | | 11 |
| Зм | Лист | Підпис | № докум | Дата | | |

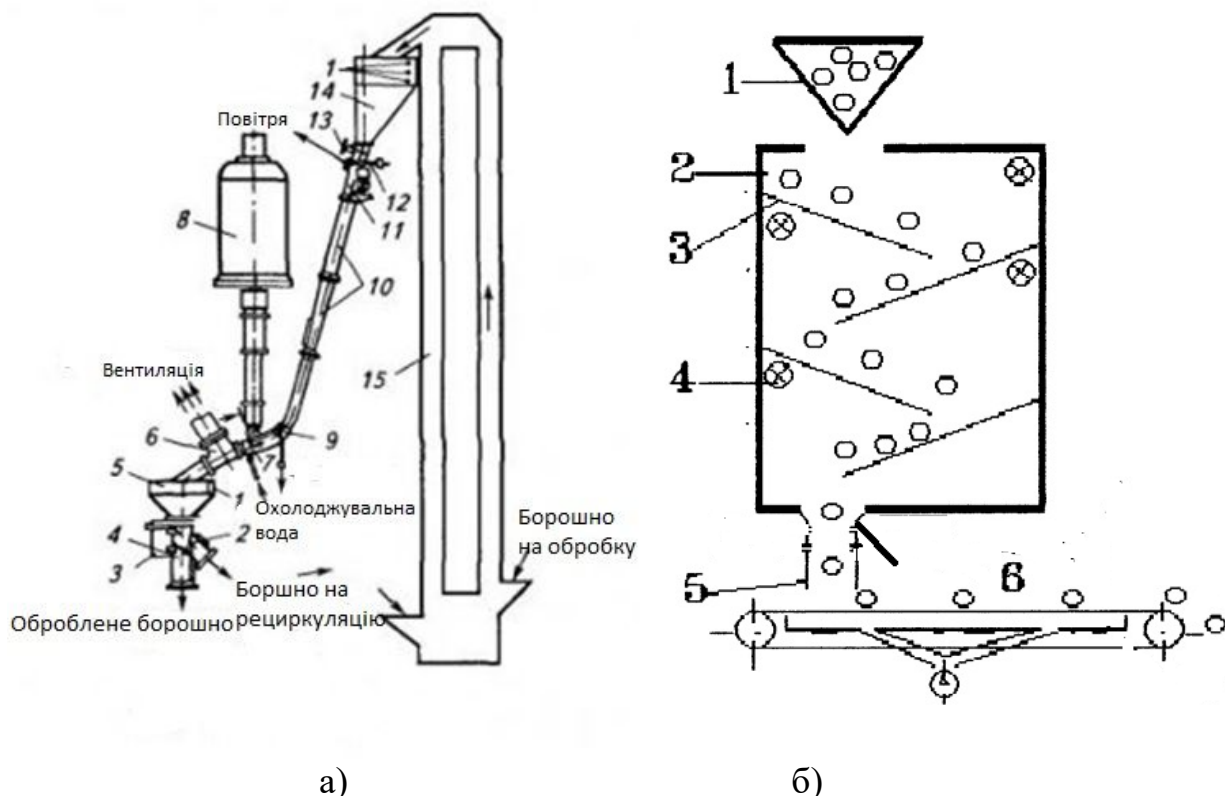


Рис.1.1. Схеми радіаційної обробки сільськогосподарської продукції

Після бункера встановлена камера 4, з якої зерно за допомогою перекидного клапана 2 автоматично направляється або на транспортують механізми, або на рециркуляцію в разі несподіваного відключення прискорювача. При раптовому відключенні прискорювача відбувається негайне автоматичне спрацювання засувки 12, що перекриває подачу зерна в канал розгону, і перекидного клапана 2, направляючого знаходиться в каналі розгону зерно на повторне опромінення. Радіаційний дезінсектор забезпечений пристроями, що забезпечують автоматичне підтримання сталого режиму роботи і захист персоналу та обладнання. Управління дезінсектор здійснюється дистанційно з пульта.

Установки можуть бути контейнерними або конвеєрні з переривчастою або безперервною системою обробки. Конструкція приладів опромінення продуктів повинна передбачати неможливість їх контамінації радіацією за рахунок відсутності прямого або непрямого контакту джерела

Обробка пучком електронів або γ -випромінюванням може застосовуватися для переробки некондиційних сільськогосподарських продуктів (уражені грибковими захворюваннями зерна, відходи борошномельних комбінатів, відходи шлифования рису і так далі) з метою отримання сировини для «зелених» хімікатів. Це водорозчинні клеї для

виробництва паперу та картону, екологічно чисті реагенти у виробництві ДСП і ДВП, компоненти бурових розчинів і нафтовитискуючих рідин, компоненти будівельних сумішей, антипірени (коксоутворюючі), компоненти миючих засобів, стимулятори росту рослин і так далі. Таким чином, оскільки можливе радіаційне гальмування життєдіяльності мікроорганізмів у насипних сільськогосподарських продуктах, то можливе й припинення мікробіологічного самозаймання за доз 3–4 кГр. Рекомендовано проводити радіаційну обробку борошна на стадіях перед відстоюванням і після, а також при кожному наступному складуванні.

Можна виділити чотири основних напрямки, які використовуються в світі та підходять Україні для поліпшення економічних показників аграрного сектора:

1. Обробка всієї або потенційно небезпечної продукції, яка ввозиться в країну, - для безпеки власних громадян, тваринництва, рослин від вірусів і бактерій.

2. Обробка продукції для забезпечення її збереження при зберіганні і перевезеннях (в Україні пропадає кожен четвертий вирощений в країні продукт рослинництва).

3. Обробка продукції, що йде на експорт.

4. Опромінення посівного і посадкового матеріалу могло б поліпшити показники схожості та врожайності на 10-30%.

Створення системи опромінення – це повинно бути державним проектом. В Україні є науково-технічна база і практичний досвід створення установок для опромінення аграрної продукції.

1.2. Аналіз застосування радіаційних технологій у медичній галузі

У біології та медицині використовуються найчастіше ізотопи, які розпадаються з утворенням β^- або β^+ й γ -випромінювання [29]. У медицині радіація широко застосовується для різноманітної рентгеноскопії, стерилізації хірургічних інструментів, знищення мікробів і пригнічення росту злоякісних пухлин [45]. У радіохірургії γ -ніж - дозволяє робити операції в порожнині черепа без розрізів. Однією з головних задач, при цьому, є підібрати такий режим радіаційної обробки, при якому, наприклад, пригнічується ріст ракових клітин, але не наноситься значної шкоди

| | | | | | | |
|----|------|--------|---------|------|--|------|
| | | | | | НУЦЗУ. 2.16-47.СХ та ХТ. РПЗ-02 | Лист |
| | | | | | | 13 |
| Зм | Лист | Підпис | № докум | Дата | | |

здоровим тканинам. Знання правил поведінки радіації на організм дозволяє розробляти радіопротектори.

Радіометрія біологічних середовищ проводиться для визначення радіоактивності органів, динаміки переміщення радіоактивних частинок в організмі, вимірювання абсолютної величини активності радіаційних препаратів (РП), що вводиться пацієнтові, загальної активності РП в тілі пацієнта, реєстрації розподілу РП в органі або тілі, ранньої діагностики онкологічних, серцево-судинних та інших захворювань людини [56].

Флюорографічний апарат - працює на основі рентгенівських променів та системи лінз, де випромінювання посилюється, проходить крізь тіло пацієнта і залишає світловий відбиток на флуоресцентному екрані з світлопоглинаючим покриттям. Пацієнт перебуває між випромінювачем та прийомним екраном. Світіння екрану впливає на світлочутливий шар рентгенівської плівки (за принципом плівкового фотоапарату).

Рентгенівський апарат не потребує системи лінз і підсилювачів. Приймальний пристрій в ньому – це плівка або електронний пристрій, що дозволяє зменшити потужність рентгенівського потоку, що проходить крізь пацієнта, та підвищити роздільну здатність.

γ -камера - основний інструмент сучасної радіонуклідної діагностики для візуалізації та дослідження кінетики радіофармпрепаратів у внутрішніх органах і фізіологічних системах організму пацієнта з метою ранньої діагностики онкологічних, серцево-судинних та інших захворювань людини. Крім діагностичних досліджень щитовидної залози, нирок, печінки і жовчного міхура, головного мозку, легенів, серця і ін., Сучасні γ -камери можуть забезпечувати сканування всього тіла пацієнта для отримання тривимірної інформації.

Сучасна γ -камера містить багатоканальний коліматор, кристал NaI (Тl) з великою площею поверхні, світловод для оптичного зв'язку кристала з гексагональною матрицею ФЕП і блоку аналогових електронних пристроїв, що забезпечують визначення координат і амплітуд сигналів. Всі зазначені апарати укладені в свинцевий екран достатньої товщини, щоб звести до мінімуму фон від джерел радіації, які перебувають поза полем зору камери.

Позитронно-емісійна томографія (ПЕТ). В процесі ПЕТ-дослідження позитрон-емітуючий радіоізопад вводиться пацієнтові внутрішньовенно або шляхом інгаляції. Після цього, ізопад циркулює в кров'яному струмі і досягає, наприклад тканини

| | | | | | | |
|----|------|--------|---------|------|--|------|
| | | | | | НУЦЗУ. 2.16-47.СХ та ХТ. РПЗ-02 | Лист |
| | | | | | | 14 |
| Зм | Лист | Підпис | № докум | Дата | | |

головного мозку або серцевого м'яза. Як тільки відбувається анігіляція, томограф реєструє локалізацію ізотопу і обчислює його концентрацію. Робота томографа полягає в тому, щоб реєструвати ці промені, які означають, що позитронна анігіляція сталася десь на даній лінії збігу. Області підвищеної-зниженої концентрації позитронного молекулярного зонда свідчать про ненормальний функціонуванні органу.

Комп'ютерна томографія (КТ) - це метод пошарового дослідження внутрішньої структури об'єкту за допомогою його багаторазового просвічування рентгенівськими променями в різних пересічних напрямках. За допомогою такого дослідження можна зробити серію знімків шарів тканин тіла людини, що лежать на певній глибині, наприклад, легких або хребта, з подальшою комп'ютерною обробкою даних залишкового випромінювання, що дозволяє побудувати як плоский знімок (як на звичайному рентгенівському апараті), так і об'ємну модель органу, і діагностувати хвороби на ранніх стадіях, наприклад, пухлина малого розміру.

Використовуються також протонна терапія із застосуванням компактних прискорювачів і іонна терапія, в т.ч. вуглецева. Іонна має переваги: особливості гальмування іонів в речовині дозволяють забезпечити велике значення відносини дози в зоні мішені до дози в здорових оточуючих тканинах (до трьох); розсіювання іонного пучка слабкіше, ніж протонного; ефект впливу спостерігається при меншій кількості процедур.

Перевагами нейтронної і нейтрон-загарбної терапії є можливість виборчого впливу на тканини в найскладніших випадках. Розробки ведуться в напрямку компактних нейтронних джерел, в т.ч. прискорювального типу.

Типові ДІВ для діагностики: сцинтиграфія кісток: ^{99m}Tc -МДФ(MDP), 400-600 МБк; сцинтиграфія органів: ^{51}Cr -ЭДТА, 300 кБк; мітка еритроцитів й інше: ^{99m}Tc , 3–10 МБк; ^{125}I ; діагностика пухлин: ^{32}P .

1.3. Аналіз застосування радіаційних технологій при визначенні дефектів

У промисловості радіаційні технології використовують: для характеристики зносу поршневих кілець опромінених нейтронами щодо підвищення радіоактивності масла; для дослідження масообмінних процесів в доменних печах, при дифузії та ін .;

| | | | | | | |
|----|------|--------|---------|------|--|------|
| | | | | | НУЦЗУ. 2.16-47.СХ та ХТ. РПЗ-02 | Лист |
| | | | | | | 15 |
| Зм | Лист | Підпис | № докум | Дата | | |

для діагностики дефектів металевих виливків [45].

В даний час до багатьох конструкцій і виробів відповідального призначення пред'являються підвищені вимоги, внаслідок чого виникає необхідність проведення 100% комплексного неруйнівного контролю. Руйнівні методи контролю мають велике значення для підвищення надійності виробів і матеріалів в різних галузях народного господарства і дозволяють знизити матеріальні витрати і час вимірювання.

У комплексних методах неруйнівного контролю радіаційна діагностика займає основне місце, головним чином – це дефектоскопія паяних і зварних з'єднань, лиття, поковок, штампованих об'єктів та інших виробів з металів, їх сплавів, пластмас, кераміки і т.д., а також товщометрія сталевих листів і металевих покриттів. За характером вимірюваної на величини розрізняють радіометричну дефектоскопію і радіометричну товщинометрію. Широке поширення радіаційної дефектоскопії забезпечується завдяки тому, що тіньова картина, що отримується при просвічуванні контрольованого об'єкта, містить найбільш повну інформацію про його внутрішню структуру.

В основі радіаційного контролю лежить отримання дефектоскопічної інформації про об'єкт за допомогою іонізуючого випромінювання, проходження якого через речовину супроводжується іонізацією атомів і молекул середовища. При цьому вимірюється один або кілька параметрів іонізуючого випромінювання після взаємодії з таким чином для радіаційного контролю необхідні реєстрація та аналіз проникаючого іонізуючого випромінювання після взаємодії його з речовиною, що контролюється. Реалізується такий метод контролю шляхом застосування коштів радіографії і радіоскопії. Як детектори випромінювання при радіометричному контролі використовують різного роду лічильники, іонізаційні камери, сцинтиляційні перетворювачі та ін.

Радіометрія характеризується високою чутливістю, можливістю безконтактного контролю рухомих об'єктів, високою швидкістю електронної апаратури і дозволяє отримати кількісну інформацію про виріб. Основний недолік радіометрії - її інтегрують властивості, тобто одночасно реєструються сигнали, як про дефекти, так і супутні сигнали про будь-яких локальних змінах товщини або щільності матеріалу об'єкта. Крім того, на величину корисного сигналу суттєво впливає розсіяне

| | | | | | | |
|----|------|--------|---------|------|--|------|
| | | | | | НУЦЗУ. 2.16-47.СХ та ХТ. РПЗ-02 | Лист |
| | | | | | | 16 |
| Зм | Лист | Підпис | № докум | Дата | | |

випромінювання. При радіометрії чутливість контролю сильно залежить від його продуктивності

Метод використовується для виявлення макроскопічних порушень суцільності або однорідності матеріалів, що виникають при виготовленні, а також для виявлення дефектів, що з'явилися в процесі експлуатації машин, механізмів тощо

Для здійснення радіографії (з отриманням плівкового зображення) необхідні наступні елементи пристрою: джерело випромінювання, перетворювач випромінювання, приналежності контролю (маркувальні знаки і т.п.), що підсилює екран, радіографічна плівка, засоби механізації та автоматизації контролю, засоби для захисту людей від впливу іонізуючих випромінювань.

Радіоскопія (з отриманням екранного зображення) заснована на: просвічуванні виробів іонізуючим випромінюванням, перетворенні прихованого радіаційного зображення об'єкта в світлове або електронне зображення, посилення і передачі цих зображень безпосередньо оператору або на відстань за допомогою оптичних або телевізійних систем для подальшого візуального аналізу на вихідних екранах. При радіоскопії зварних з'єднань і виробів використовують такі фізичні явища: люмінесценцію кристалічних речовин під дією іонізуючих випромінювань; фотоефект під дією іонізуючих випромінювань або викликані ними люмінесценції; вторинну електронну емісію при перетворенні електронних зображень в електричні сигнали.

Детектори іонізуючого випромінювання: флуороскопічні екрани (ФЕ), сцинтиляційні кристали (СК), радіаційні електронно-оптичні перетворювачі (РЕОП), електронно-оптичні підсилювачі яскравості (ЕОП) і рентгеновідікони (РВ).

Основними напрямками радіаційної дефектоскопії є рентгено- і γ дефектоскопія. Різниця між рентгенівською та γ -дефектоскопією (рис.1.2) полягає в використовуваних джерелах іонізуючих випромінювань, однак з огляду на спільності способів реєстрації випромінювання і цілей випробувань вони мають загальну методику і технологію проведення контролю в виробничих умовах.

Джерелом рентгенівських променів є рентгенівська трубка. Пучок променів направляється на зварне з'єднання перпендикулярно осі шва. З іншого боку шва встановлюють світлонепроникну касету з рентгенівською плівкою та два екрани, які підсилюють зображення. Дефектні місця шва - газові пори, шлакові включення,

| | | | | | | |
|----|------|--------|---------|------|--|------|
| | | | | | НУЦЗУ. 2.16-47.СХ та ХТ. РПЗ-02 | Лист |
| | | | | | | 17 |
| Зм | Лист | Підпис | № докум | Дата | | |

тріщини та інші - в меншій мірі знижують інтенсивність проникаючих променів, ніж суцільний метал. Ступінь засвічування плівки буде більше в місцях розташування дефектів

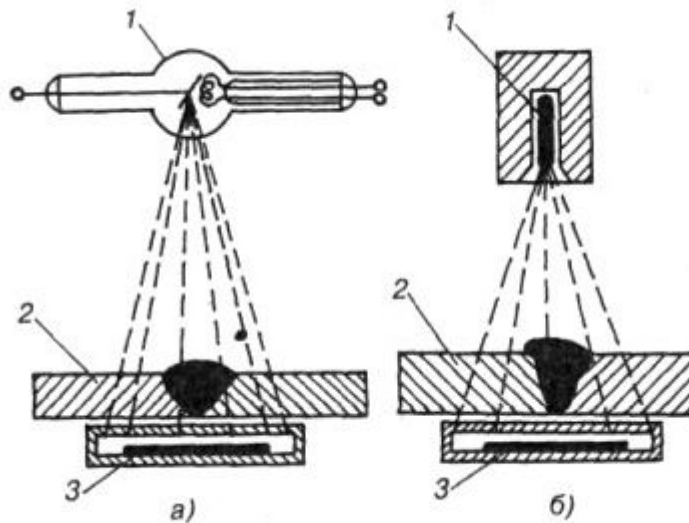


Рис 1.2 Схема радіаційного просвічування швів: а) – рентгенівське випромінювання; б) γ -випромінювання: 1- джерело випромінювання, 2- виріб, 3- чутлива плівка

Підвищує можливість виявлення дефектів тонких матеріалів дозволяє протонна радіографія. Вона враховує особливості поширення протонів у речовині та взаємодії з нею. Джерелами потоку можуть бути ті самі, що і для рентгено- та γ -детектування. Протонна радіографія використовує особливість α -частинок поглинатися тонкими шарами, що дозволяє проводити контроль тонких виробів або їх частин (листа, фольга і т.і.). Але при цьому такий спосіб радіографії дає меншу похибку вимірювання та високу чутливість ($\approx 0,1\%$) відносно рентгенографії.

Можливе детектування майбутніх тріщин на основі особливостей накопичення позитронів у речовині. На першій стадії виникнення втомних явищ у металі виникають дислокації, де накопичуються негативні заряди. Відповідно, позитрони у ході опромінення металу притягуються до цих місць і взаємодіють з електронами шляхом анігіляції. При цьому утворюються γ -кванти. За кількістю, густиною потоку γ -квантів, за середнім періодом існування позитрону у матеріалі визначають місце та профіль виникнення втомних змін в металі. Цей метод дозволяє: - детектувати втомні напруження в металах раніше появи тріщин, - визначати значення та ступінь пластичної

деформації.

Якщо матеріал, що досліджується, вже містить радіоактивні речовини, то можливо проведення авторадіографії для детектування цього матеріалу без використання джерел опромінення. Відповідно реєструють іонізуюче випромінювання даного виробу шляхом контакту з ним дрібнозернистої чутливої рентгенівської фотоплівки. Реєструється іонізуючого випромінювання ділянок, що контактують з плівкою, або близько розташованих.

Можливо застосування радіоскопії без проміжних етапів засвічування та проявлення фотоплівки - безпосередньо в момент опромінення матеріалу шляхом застосування спеціальних екранів. Це мінімізує необхідну затримку між вимірюванням та отриманням результату плівкової діагностики досліджуваного матеріалу. Тобто є способи вимірювання з малою інерційністю. Водночас об'єкт можна контролювати під різними кутами відносно напрямку опромінення, що покращує ефективність знаходження дефектів, дозволяє контролювати об'єкти в умовах експлуатації так та безперервного виробництва (рис. 1.3).

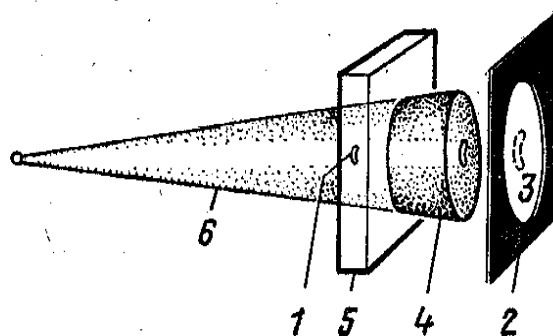


Рис. 1.3. Принцип рентгено-візуального контролю:

1-дефект, 2-перетворювач випромінювання, 3-зображення дефекту на перетворювачі,
4-радіаційне зображення, 5-об'єкт, 6-рентгеновських промінь

Кілька інші можливості відкриває нейтронна радіографія. Вона заснована на опроміненні об'єкта контролю колімірованим пучком нейтронів і реєстрації тіньового зображення об'єкта на рентгенівській плівці або іншому детекторі (рис. 1.4). Фізичною основою нейтронної радіографії є залежність випромінювання від хімічного складу речовини і, перш за все від його атомного номера і масового числа. На відміну від

| | | | | | | |
|----|------|--------|---------|------|--|------|
| | | | | | НУЦЗУ. 2.16-47.СХ та ХТ. РПЗ-02 | Лист |
| | | | | | | 19 |
| Зм | Лист | Підпис | № докум | Дата | | |

рентгенівського і γ -випромінювань ця залежність для нейтронів виражена більш сильно. Велике значення нейтронної радіографії полягає в можливості роздільного контролю хімічних компонентів матеріалу.

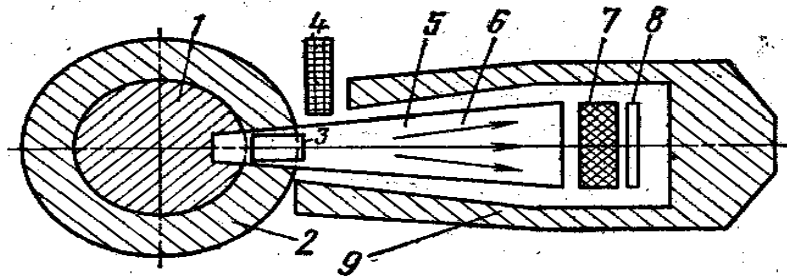


Рис. 1.4. - Схема просвічування при нейтронній радіографії:

1-джерело повільних нейтронів, 2-захист, 3-діафрагма, 4-затвор, 5-коліматор,
6-пучок нейтронів, 7-виріб, 8-детектор, 9-камера

Наприклад, звичайні методи діагностики не дозволяють виявити наявність органічних речовин на сталі за однакових товщин. Застосування ж нейтронної радіографії дозволяє контролювати вироби з органічних матеріалів товщиною до 1 мм крізь шар металу товщиною кілька сантиметрів, наприклад при аналізуванні композиційних матеріалів.

Потік нейтронів отримують від низькоенергетичних радіоізотопних джерел випромінювання або на пристроях побудованих за принципом ядерних реакторів. Нейтрони необхідних енергій відокремлюються шляхом фільтрування потоку опромінення крізь металеві фільтри. Оскільки нейтрони характеризуються сильною взаємодією з водневмісними матеріалами, а також іншими елементами з малою атомною вагою, у важко підбирають матеріали для виготовлення обладнання. Так, тримачі, касети, маркувальні знаки та інше застосовують з матеріалів, які характеризуються малим перетином активації нейтронами: алюміній для конструктивних елементів, кадмій для маркування. Поверхні вимірюваного об'єкту ретельно очищують від залишків вологи, мастил та забруднень з вмістом речовин, що характеризуються великим перетином взаємодії.

Областю застосування нейтронної радіографії є детектування й аналіз: радіоактивних виробів (тепловиділяючих елементів ядерних реакторів), водневмісних

часток у речовині, деталей з легких матеріалів (пластмас та ін.); шаруватих багатокомпонентних матеріалів, тонких біологічних зразків.

Нейтронний потік детектують рентгенівськими та фототехнічними плівками або детекторами з нітроцелюлози, слюди й скла. Посилення впливу нейтронів на детектори забезпечується екранами-перетворювачами, які являють собою тонкі однорідні пластини.

Похибка детектування дефектів шляхом нейтронної радіографії для сталевих деталей товщиною 10 - 80 мм становить до 2%.

Так апарат для контролю кільцевих зварних швів труб може сканувати шов в панорамному напрямку, тому що це прийнятно з точки зору продуктивності контролю. Об'єкт контролю встановлюється між рифленими центрами передньої і задньої бабки. Джерело опромінення закріплюють на каретці або пересувають по направляючій для панорамного просмотру.

Для організації контролю обирають вид та джерело опромінення, радіоплівку за параметрами: товщина, густина речовини, конфігурація об'єкту, чутливості й необхідна інтенсивність вимірювання. Відповідно до оптимальних режимів здійснюють опромінення.

Контроль на рентгенівській установці якості кільцевих зварних швів балону з товщиною стінки 4 мм рекомендується напруга на рентгенівській трубці 100 кВ та універсальна екранна плівка РТ-2, яка характеризується з малим часом реакції. Конструктивну схему опромінення зварного з'єднання з фокусною відстанню – 300 до 750 мм наведено на рис 1.5.

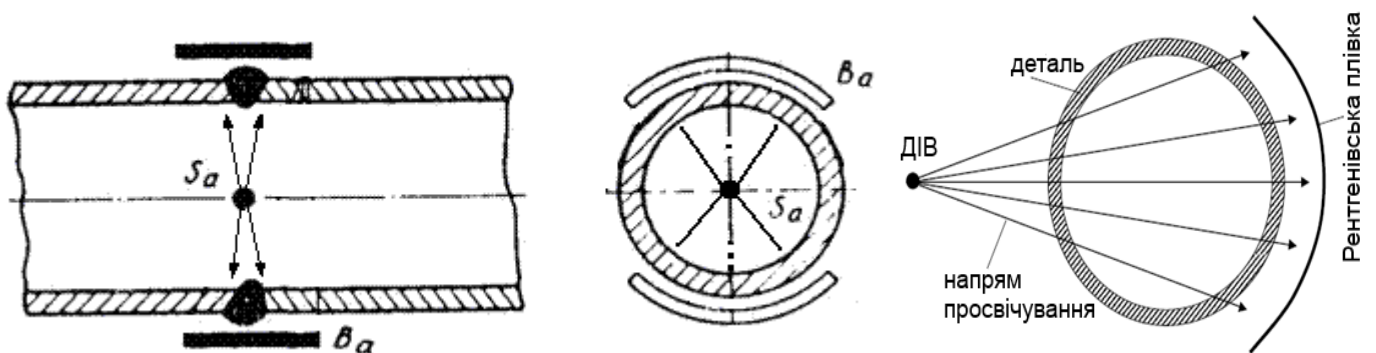


Рис 1.5. Схема панорамного просвічування кільцевого шву

Час експозиції визначають за номограмами за результатами пробних знімків.

| | | | | | | |
|----|------|--------|---------|------|---------------------------------|------|
| | | | | | НУЦЗУ. 2.16-47.СХ та ХТ. РПЗ-02 | Лист |
| Зм | Лист | Підпис | № докум | Дата | | 21 |

Визначивши по номограмі експозицію $E = 4,1 \text{ mA} \cdot \text{хв}$, тоді $t_0 = E/5 = 0,82 \text{ хв}$.

Перед просвічуванням очищають об'єкт від зовнішніх дефектів, шлаку, бруду та інших забруднень. При забезпеченні безпечних умов роботи приступають до просвічування виробу при надійному закріпленні джерела, щоб запобігти розмиття зображення при вібрації. Після закінчення часу експоновану плівку піддають фотообробки. Разом з проявом і сушінням плівку процес контролю займає до 4 годин. Розшифровка сухих знімків полягає у виявленні дефектів, встановлення їх видів і розмірів у світлі на негатоскопі з рівномірним розсіяним світловим потоком (в затемненому приміщенні).

1.4. Аналіз застосування радіаційних технологій у харчовій промисловості

Радіаційна обробка в харчовій галузі використовується для знищення ряду патогенних бактерій, таких як *Salmonella*, *Campylobacter* и *E.coli*; також застосовують з метою стерилізації продуктів, пастеризації та збільшення терміну зберігання [45, 51].

Так, розвиток у зерновій масі мікроорганізмів, зокрема, картопляної палички, провокує зараження хлібопекарських виробів на картопляну хворобу, оскільки спори картопляної палички витримують температуру близько 120°C протягом 1 год, а за 100°C знешкоджуються лише за 6 год. Тобто після випікання хліба спори залишаються життєздатними, оскільки м'якуш хліба під час випічки прогрівається до 97°C . За сприятливих умов цей мікроорганізм розповсюджується, хліб набуває липкості, утворюються продукти розкладу білків зі специфічним запахом (спочатку – слабкий фруктовий, далі – гнилісний). Це вимагає застосування засобів боротьби з розвитком мікроорганізмів у харчових продуктах. Певних успіхів надає підтримання певних умов зберігання – температури, вологості та інше.

Застосовують багато хімічних методів обробки харчових продуктів для подовження їх зберігання та в інших цілях. Деякі з застосованих хімічних речовин створюють певну небезпеку для людини. Так до борошна додають:

- бромат калію - харчова добавка E924a для відбілювання - високих температур випічки бромат калію повинен переходити (починаючи з 167°C) в бромід калію, який вважається нешкідливим; температури в пічі для цього достатньо, але середина

| | | | | | | |
|----|------|--------|---------|------|--|------|
| | | | | | НУЦЗУ. 2.16-47.CX та ХТ. РПЗ-02 | Лист |
| | | | | | | 22 |
| Зм | Лист | Підпис | № докум | Дата | | |

м'якіша прогрівається лише до 97 С;

- двоокис хлору - газоподібна речовина - E926 для відбілювання та знезаражування, при цьому борошно втрачає токофероли (вітамін Е) та жирні кислоти;
- бензоіл пероксид - E928, у чистому вигляді є сильним канцерогеном, використовують для відбілювання борошна і як поліпшувач хлібопекарських властивостей;
- персульфат амонію - E923, має третій клас небезпеки, при вдиханні може викликати астматичний напад, створює небезпеку для шкіри і очей; може використовуватись попри заборону як розпушувач та відбілювач;
- аллоксан - продукт окиснення сечової кислоти, пригнічує дію функцій організму людини.

Тим не менш, світові втрати харчових продуктів оцінюються в 1,3 млрд. тонн в рік або 30% всього виробленого обсягу продовольства. Згідно із заявою ООН - "Проблема контамінації харчових продуктів - це виклик для всього людства" (проблема зараженості). З видів радіаційного впливу для обробки сільськогосподарських та харчових продуктів можна використовувати β -випромінювання - потік прискорених електронів, які мають здатність розщеплювати ДНК шкідливих мікроорганізмів, що на 25-40% знижує втрати продуктів при зберіганні та перевезенні, викликані комахами, бактеріями і цвіллю; подовжує термін зберігання, спрощує технологічні процеси, збільшує вихід цільового продукту; зменшує залежність від використання хімічних пестицидів і консервантів; знижує можливість самозаймання насипних продуктів. Тобто досягається загибель комах та мікроорганізмів; подовження термінів зберігання, дезінсекція.

За висновком міжнародної комісії (FAO/WHO 1980) використання радіаційного опромінення для обробки продуктів в встановлених для кожного продукту оптимальних режимах є самим нешкідливим в порівнянні з іншими способами консервації. Обробка харчових продуктів проводиться відповідно до Міждержавного стандарту ISO 14470-2014, який поширюється на процеси опромінення з використанням радіонуклідів ^{60}Co , ^{137}Cs , генераторів електронних пучків, рентгенівських джерел.

У 1981 році Міжнародний експертний комітет опублікував висновки про безпеку харчових продуктів, які зазнали опромінення в 10 кГр (кДж/кг). У 1983 році Міжнародна комісія ФАО / ВООЗ затвердила звід харчових міжнародних стандартів і правил для опромінення продуктів харчування в межах до 10 кГр. Протягом 1983-1990 рр. були затверджені національні стандарти (США, Канада, Франція і ін.). Укладені

| | | | | | | |
|----|------|--------|---------|------|--|------|
| | | | | | НУЦЗУ. 2.16-47.СХ та ХТ. РПЗ-02 | Лист |
| | | | | | | 23 |
| Зм | Лист | Підпис | № докум | Дата | | |

угоди про радіаційну обробку спецій, фруктів, м'яса, а також застосування опромінення для стерилізації комах. У 1988 році ФАО, ВООЗ, МАГАТЕ і СОТ уклали Міжнародну торгову угоду про торгівлю продуктами харчування, які пройшли радіаційну обробку.

У 1993 році Американська медична асоціація (АМА) винесла висновок про безпеку і збереження поживних властивостей опромінених продуктів і напоїв.

Обробка прискореними електронами не може зробити їжу радіоактивною, оскільки електрони не володіють достатньою енергією, щоб взаємодіяти з ядром атома. А тому такі продукти безпечні для вживання. Органолептичні властивості і харчова цінність не змінюються при дотриманні технології обробки. Норми опромінення, які встановлено після 35-річного тестування, прийняті на світовому рівні в 1983 році і строго контролюються Всесвітньою організацією охорони здоров'я, продовольчої та сільськогосподарської організації ООН і МАГАТЕ. Після обробки ніяка хімічна, термічна обробка або інші методи, що змінюють склад і властивості продукту, вже не потрібні.

Радіаційна обробка харчових продуктів полягає в їх опроміненні іонізуючим випромінюванням з метою збільшення термінів зберігання і знищення хвороботворних мікроорганізмів. Для цього використовують рентгенівське випромінювання, потік прискорених електронів. Механізм дії іонізуючої радіації заснований на іонізації молекул і атомів мікроорганізмів, в результаті чого порушуються їхні нормальні біологічні функції і знижується їх життєздатність. Радіаційне затримання розвитку патогенних мікроорганізмів потребує доз 1,0-7,0 кГр, запроваджено з 1997 року. Дози γ -випромінювання близько 10 кГр зумовлюють загибель більшості видів мікроорганізмів і можуть бути застосовані для радіаційної консервації продукції та подовження термінів зберігання. Гальмування життєдіяльності мікроорганізмів з метою подовження термінів зберігання харчових продуктів - радурізація потребує доз опромінення до 4 кГр. Повне знищення мікроорганізмів з врахуванням більш стійких мікроорганізмів (радаптерізація) потребує ще більших доз опромінення до – 50 кГр. Більші дози за рахунок радіаційного руйнування викликають утворення продуктів окиснення, зміну кольору та смакових якостей продуктів, тому не рекомендуються до застосування.

| | | | | | | |
|----|------|--------|---------|------|--|------|
| | | | | | НУЦЗУ. 2.16-47.СХ та ХТ. РПЗ-02 | Лист |
| | | | | | | 24 |
| Зм | Лист | Підпис | № докум | Дата | | |

У світі обробляється до 80 видів продукції - спеції, риба, м'ясо, сухофрукти, овочі і фрукти, зернові та ін. Більше 60 країн світу використовують технології опромінення продуктів, але найбільше – Китай і США, які займають 40% і 39% ринку радіаційної обробки відповідно. Загальний світовий обсяг опромінених продуктів харчування в рік оцінюється в 700-800 тис. тонн. За відомостями Міжнародної радіаційної асоціації, тільки Європа щорічно випускає на ринок більш 200 тисяч тонн оброблених продуктів.

Радіаційна технологія обробки харчових продуктів має істотні переваги в порівнянні з іншими способами обробки:

- зниження втрат через біологічної, хімічної та бактеріальної псування,
- продовження терміну придатності продукції,
- зниження капітальних і експлуатаційних витрат,
- можливість обробки будь-яких харчових продуктів,
- збереження смакових і поживних властивостей харчових продуктів.

Незважаючи на явні переваги радіаційної технології обробки харчових продуктів, при її впровадженні в харчову промисловість виникає ряд проблем, серед яких найбільш важливими є: вибір джерел іонізуючого випромінювання і підбір відповідних умов процесу обробки; ідентифікація та характеристики продуктів радіаційно-хімічних перетворень білків, ліпідів, вуглеводів; радіологічна, мікробіологічна, токсикологічна безпека і харчова адекватність.

Україна не має розвитку даної галузі, хоча займає перше місце в світі з виробництва насіння соняшнику, друге – з виробництва зернових і горіхів. Єдина установка для опромінення в Україні працювала в Одеському порту, але вийшла з ладу в 2000 році. За її допомогою обробляли пшеницю, що підвищувало термін її зберігання на 30%. У той же час, в Україні в Інституті ядерних досліджень НАН України була спроектована і виготовлена опромінювальна установка на експорт.

В умовах радіаційної обробки харчових продуктів на перший план має виходити з'ясування особливостей радіаційно-хімічних перетворень компонентів продуктів харчування, що дозволить більш обґрунтовано підходити до визначення доз і режимів опромінення. Недостатнє врахування цих факторів викликає крім основного антисептичної дії зміни органолептичних показників, деяких споживчих якостей і,

| | | | | | | |
|----|------|--------|---------|------|--|------|
| | | | | | НУЦЗУ. 2.16-47.СХ та ХТ. РПЗ-02 | Лист |
| | | | | | | 25 |
| Зм | Лист | Підпис | № докум | Дата | | |

можливо, поява токсичних речовин в результаті радіаційно-хіміко-біологічних перетворень білків, вуглеводів, ліпідів, вітамінів і ін.

При радіоактивному опроміненні пучок γ -випромінювання спрямований на продукт харчування, в залежності від дози, має ефект аналогічний пастеризації, варінні у воді або інший термічній обробці. Енергія, що виділяється випромінюванням, поглинається продуктом в кількості поглиненої дози. Вимірюється поглинена доза в Греях (Гр) або кілогреях (кГр), $1 \text{ кГр} = 1000 \text{ Гр}$. Під дією радіації в будь-якій біологічній субстанції, в тому числі і в організмі людини, утворюються короткоживучі поляризовані молекули – вільні радикали, які здатні зв'язуватися між собою, з іншими звичайними біологічними молекулами, з ДНК [32, 36]. Вільні радикали, новоутворені молекули і з'єднання з ДНК здатні змінити властивості біологічних субстанцій, зокрема знищити хвороботворні бактерії. Надійний стерилізує ефект дають високі дози іонізуючого опромінення,

Ефект опромінення проявляється при застосуванні на продуктах харчування в цілісному, подрібненому або зміненому іншими способами обробки вигляді. Як і при будь-якому іншому вигляді приготування їжі при опроміненні можлива втрата деяких харчових корисних властивостей продукту - вітамінів, з'єднань, цінних білків.

Довгострокові дослідження Всесвітньої організації охорони здоров'я (ВООЗ), комітету ООН з продовольства і сільського господарства, Наукового комітету з продовольства ЄС, комітетів США і Великобританії по продуктах харчування і лікарських препаратів не виявили несприятливого впливу на організм людини продуктів опромінення для знищення бактерій і продовження терміну придатності. У деяких країнах виробник продуктів перш ніж використовувати радіацію у виробництві зобов'язаний довести її перевага і необхідність використання перед іншими видами обробки, враховуючи, що ризики від впливу радіації перевершують небезпеку захворювання споживача від, наприклад, харчової інфекції.

Для оцінки застосовності радіаційної обробки для харчових продуктів зі збереженням їх поживних властивостей досліджено кінетику гідролізу панкреатичної ліпази жирів молока, підданих радіаційній обробці. З їжею в організм щодня надходить до 150 г ліпідів. Жири, поряд з глюкозою, служать для організму головними джерелами енергії і забезпечують не більше 30% від загальної кількості калорій, що поступають з їжею. Рідкі жири містять в своєму складі полієнові жирні кислоти, які не

| | | | | | | |
|----|------|--------|---------|------|--|------|
| | | | | | НУЦЗУ. 2.16-47.СХ та ХТ. РПЗ-02 | Лист |
| | | | | | | 26 |
| Зм | Лист | Підпис | № докum | Дата | | |

синтезуються в організмі, тому рідкі жири повинні складати не менше третини жирів їжі. Коров'яче молоко, є поширеним прикладом продукту, що містить жири тваринного походження з наявністю жирних кислот з короткою і середньою довжиною аліфатичних ланцюгів (4-12 атомів вуглецю). Біодоступність гідролізу жирів грає важливу роль в процесі ліпідного обміну в організмі людини з утворенням гліцерину і вищих жирних кислот, які важливі для нормальної життєдіяльності. Дефіцит незамінних жирних кислот в їжі призводить до уповільнення розвитку організму, зниження репродуктивної функції та уражень шкіри. Панкреатична ліпаза (травний фермент) гідролізує жири в положеннях 1 і 3, тому продуктами гідролізу є вільні жирні кислоти і 2-моноацилгліцериди (β -моноацилгліцероли), рис.1.6 та 1.7.

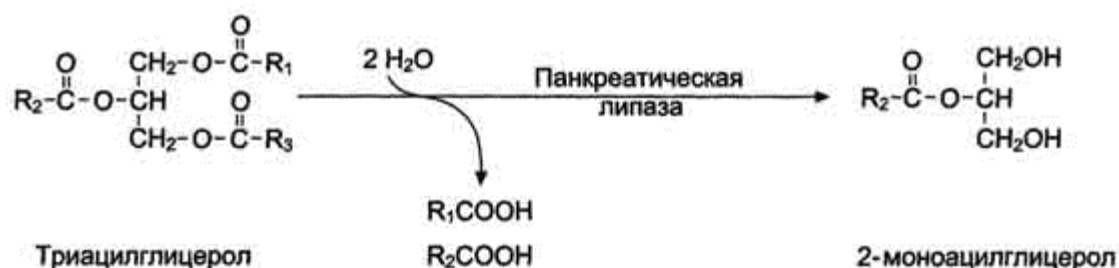


Рис. 1.6. Схема гідролізу триацилгліцеролу

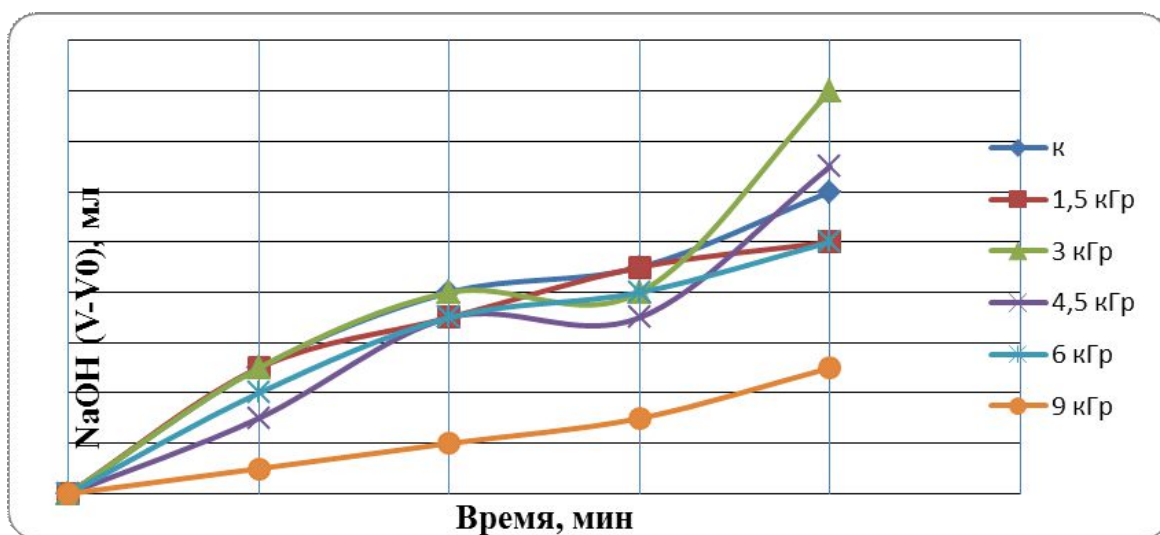


Рис. 1.7. Кінетика гідролізу радіаційнооброблених жирів молока панкреатичною ліпазою

В результаті радіаційно-хімічних перетворень жирів молока, останні можуть виявитися менш доступними гідролізу ліполітичними ферментами. А це знизить біодоступність обробленого молока для людини. На графіку (рис. 1.7.) показана

динаміка відщеплення вільних вищих жирних кислот в часі під дією панкреатичної ліпази після різної інтенсивності радіаційної обробки. Наведені дані показують, що опромінення молока в дозах до 7 кГр не знижує гідроліз жирів молока панкреатичної ліпази; навпаки, опромінення молока в дозі 9 кГр викликає зниження швидкості гідролізу.

Припускають, що продукти радіаційних перетворень інгібують дію ліпази. Однак також виявлено, що радіаційна обробка закислює середовище, а ліпаза погано гідролізує жири при зниженому значенні рН ($pH_{opt} \approx 8$).

Таблиця 1.1.

Дози іонізуючого випромінювання для обробки харчових та сільськогосподарських продуктів

| Напрямок обробки | Доза опромінення, кГр |
|---|-----------------------|
| Гальмування невчасного проростання при зберіганні | 0,05-0,15 |
| Дезінсекція | 0,15-0,5 |
| Гальмування перестигання | 0,5-1,0 |
| Подовження строків зберігання | 1,0-3,0 |
| Попередження самозаймання | 3,0-4,0 |
| Дезінфекція харчових продуктів | 2,0-5,0 |
| Стерилізація м'ясопродуктів | 1,0-50,0 |
| Знезаражування харчових добавок | 10,0-50,0 |

Прийнято міжнародне маркування продуктів, які зазнали впливу іонізуючого випромінювання, рис. 1.8.



Рис.1.8. Логотип «Radura-logo» для позначення радіаційно-оброблених продуктів

Або використовується помітка: «Treated with ionizing energy», «Treated by irradiation»
або «Treated with radiation».

| | | | | | | |
|----|------|--------|---------|------|--|------|
| | | | | | НУЦЗУ. 2.16-47.СХ та ХТ. РПЗ-02 | Лист |
| | | | | | | 29 |
| Зм | Лист | Підпис | № докум | Дата | | |

1.5. Аналіз використання радіаційних технологій у хімічній промисловості

У хімічній промисловості існує цілий розділ - радіаційна хімія, що описує процеси в речовині під дією іонізуючих випромінювань [45]. Іонізуючою здатністю володіють електромагнітні випромінювання (рентгенівські промені, γ -промені, короткохвильове випромінювання оптичних частот) і швидкі заряджені частинки (електрони, протони, α -частинки, осколки важких ядер і ін.), енергія яких перевищує іонізаційний потенціал атомів або молекул (зазвичай має величину 10-15 eV).

Виникнення хімічних реакцій під дією іонізуючих випромінювань обумовлено їх здатністю іонізувати і порушувати молекули речовини. Реакції збуджених молекул належить значна роль в радіаційно-хімічних процесах. Реакції активних частинок з молекулами відрізняються від реакцій у збудженому стані молекул одна з одною. Зазвичай молекули стійкі і для здійснення реакції між ними при зіткненнях необхідно повідомити їм деяку надлишкову енергію, яка перевищує енергію активації реакції. Зазвичай ця надлишкова енергія забезпечується за рахунок підвищення температури середовища. Для реакцій активних частинок між собою або з неактивними молекулами енергетичний бар'єр малий. Особливо активно протікають реакції з рекомбінацією електронів, позитивних іонів і радикалів один з одним. В результаті таких реакцій з неактивними молекулами відбувається їх розпад або утворення молекул нових речовин. Реакції радикалів з молекулами характеризуються енергією активації в 21-42 кДж/моль. Тому радіаційно-хімічні реакції протікають швидко навіть при дуже низьких температурах (нижче $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$) і на відміну від звичайних реакцій швидкість цих реакцій мало залежить від температури. Здатність іонізуючих випромінювань викликати хімічні реакції при низьких температурах дозволяє отримувати багато хімічні продукти, які неможливо отримати іншими способами.

Інтенсивність протікання радіаційно-хімічних реакцій залежить від агрегатного стану речовини. Зазвичай в газовій фазі ці реакції відбуваються з великим виходом, ніж в конденсованих фазах через розсіювання енергії. Якщо ці реакції оборотні, то з плином часу встановлюється стаціонарний стан, при якому не відбувається видимих хімічних змін в опромінюваному середовищі.

Проводять зв'язування атмосферного азоту шляхом опромінення повітря при

| | | | | | | |
|----|------|--------|---------|------|--|------|
| | | | | | НУЦЗУ. 2.16-47.СХ та ХТ. РПЗ-02 | Лист |
| | | | | | | 30 |
| Зм | Лист | Підпис | № докум | Дата | | |

кімнатній температурі, Отримувані допустимих концентрацій окислів азоту в тисячі разів перевищують ті, які встановлюються без опромінення. При цьому частина переданої таким шляхом енергії речовини переходить в тепло. При дії іонізуючих випромінювань на повітря можливо також утворення озону, розкладання вуглекислого газу з утворенням окису вуглецю.

Під дією іонізуючого випромінювання вода розкладається на водень і кисень, аміак – на водень і азот, перекис водню – на кисень і воду і т.п. Проводять окислювання вуглеводнів киснем повітря з отриманням компонентів мастил, мийних засобів та ін.

Важливим напрямком радіаційної хімії є полімеризація органічних мономерів з отриманням різноманітних полімерів. Так формують властивості, які не досягаються при інших методах синтезу (наприклад, досягнення великої молекулярної ваги). При дії радіації на полімери в них можуть відбуватися процеси, що призводять до поліпшення їх фізико-хімічних властивостей, в тому числі термічної стійкості.

У якості прикладу застосування радіаційних технологій у хімічній промисловості можна навести технологію отримання світлих вуглеводнів шляхом впливу на нафту іонізуючим випромінюванням, рис.1.9.

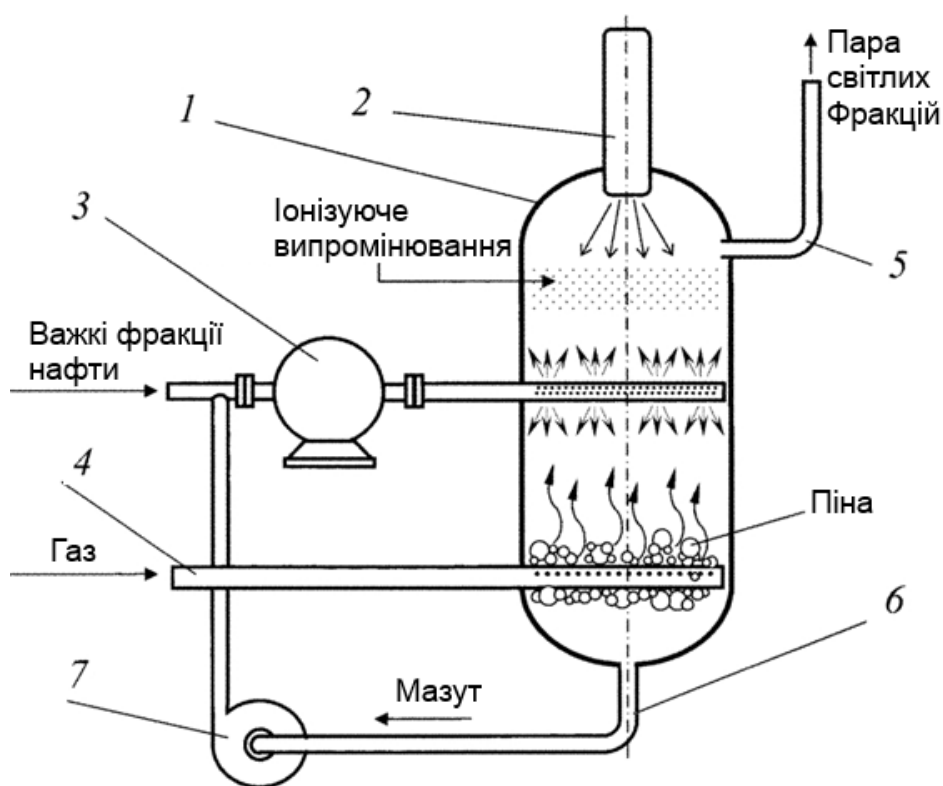


Рис.1.9. Отримання світлих вуглеводнів шляхом впливу на нафту іонізуючим випромінюванням: 1) іонізаційний реактор; 2) ДІВ; 3) механо-хімічний реактор;

4,5,6) труби циркуляції нафтопродуктів; 7) гарячий насос

Ефективність хімічного впливу випромінювань зазвичай характеризують величиною радіаційно-хімічного виходу (G) - як число отриманих молекул речовини на 100 еВ поглиненої енергії. Для звичайних реакцій величина G становить від 1 до 20 молекул, для ланцюгових реакцій - досягає десятків тисяч. Радіаційно-хімічні реакції мають найрізноманітніший характер.

Для здійснення радіаційно-хімічних процесів застосовуються різні джерела іонізуючих випромінювань. Одним з найбільш поширених є радіоактивний кобальт, що випромінює γ -промені з енергією понад 1 МеВ. Широке застосування отримують прискорювачі електронів, які мають значні зручності для практичного застосування завдяки високій інтенсивності випромінювання і можливості управління ними. Розроблено також способи безпосереднього використання випромінювань ядерних реакторів для здійснення радіаційно-хімічних процесів.

1.6. Конвергенція радіаційних технологій

Головною характеристикою нового етапу розвитку радіаційних технологій (РТ) є посилення конвергенції (взаємопроникнення) технологій [45].

Конвергенція з біотехнологіями. Нові засоби доставки ізотопів до пухлини, розроблені з використанням сучасних нано- і біотехнологій, дозволяють підвищити ефективність радіонуклідної терапії і діагностики. Зокрема, ведуться клінічні випробування нових методів доставки джерела випромінювання (ренію-186) липосомами з поперечним розміром 100 нм в пухлину головного мозку. Через малу енергію випромінюваних електронів реній не капсулюють, але низька енергія частинок дозволяє виробляти практично точкове опромінення, так як глибина проникнення випромінювання в тканини мізерно мала. Завдяки такому підходу пухлина можна піддавати незрівнянно більш високих доз радіації - в двадцять-тридцять разів перевищує сьгоднішні показники, - не завдаючи шкоди здоровим тканинам мозку.

Конвергенція з технологіями обробки матеріалів. Серед найбільш значущих прикладів подібної конвергенції – використання РТ в 3D-друку: електронно-променеве плавлення при виробництві суцільнометалевих деталей з металевих порошків.

| | | | | | | |
|----|------|--------|---------|------|--|------|
| | | | | | НУЦЗУ. 2.16-47.СХ та ХТ. РПЗ-02 | Лист |
| | | | | | | 32 |
| Зм | Лист | Підпис | № докум | Дата | | |

Ведуться роботи по підвищенню точності доставки дози в мішень, що опромінюється, і поліпшення просторового дозволу при діагностиці.

Технологічне комплексування (з'єднання різних методів в рамках одного технологічного комплексу): однією з ключових характеристик нового покоління технологічних рішень є комбінування різних ядерно-фізичних методів з традиційними технологіями в одній системі. Даний підхід має відношення до проектування заводів, клінік, лабораторій - проектуються не окремі установки, а технологічні цикли, що використовують в якості фактора той чи інший вид випромінювання.

В окремих напрямках точності діагностики і впливу теоретичної межі вже досягнуті, і подальше зростання точності може бути забезпечений лише за суміщення в одній системі кількох методів РТ-дослідження: (ПЕТ / КТ, ПЕТ / МРТ, ОФЕКТ / КТ).

Розвивається тераностіка - поєднання процесів діагностики та терапії, в тому числі на рівні одного радіаційного фармпрепарату, одночасно є діагностичним і терапевтичним. КТ, МРТ або ПЕТ в цьому випадку проводять в процесі променевої терапії.

Комбінування РТ-процесів в області візуалізації дозволить перейти до оперування 4D-зображеннями, що відображають як структурні, так і функціональні характеристики досліджуваного об'єкта, в медичній діагностиці (ПЕТ / МРТ / КТ) та системах безпеки (рентген, нейтронні технології, магнітні поля регульованої інтенсивності).

Ведуться роботи по підвищенню точності доставки пучка частинок до місця впливу з керуванням інтенсивністю пучка, розміром і формою дозового поля в залежності від локалізації місця обробки (IMRT). Так досягається рівномірне опромінення мішені довільної форми зі зменшенням дозових навантажень на здорові тканини поруч.

Також розробляються системи реєстрації випромінювання з більшою чутливістю і роздільною здатністю для образів аж до молекулярного рівня. Це дозволяє знижувати дози опромінення пацієнтів. Так, комплексні системи ПЕТ / КТ, ПЕТ / МРТ, ОФЕКТ / КТ дозволяють одночасно візуалізувати і аналізувати функціональні і морфологічні характеристики тканин і органів.

| | | | | | | |
|----|------|--------|---------|------|--|------|
| | | | | | НУЦЗУ. 2.16-47.СХ та ХТ. РПЗ-02 | Лист |
| | | | | | | 33 |
| Зм | Лист | Підпис | № докум | Дата | | |

Розділ 2. ДЖЕРЕЛА РАДІАЦІЙНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ

2.1. Природні та антропогенні джерела випромінювання

Іонізуючі випромінювання можуть мати штучне та природне походження [25]. У космічному просторі діє галактичне випромінювання - потоки протонів (близько 90%), α -частинок та інших важких ядер з енергіями 10^2 - 10^{14} MeV і випромінювання Сонця як наслідок термоядерної реакції (кожну секунду на Сонці $\sim 6 \cdot 10^{11}$ кг водню перетворюється в гелій) [39]. Внаслідок захоплення магнітним полем Землі заряджених частинок космічного випромінювання утворюються радіаційні пояси Землі. Випромінювання внутрішніх природних радіаційних поясів Землі складається з потоків протонів з енергіями до 700 MeV і електронів з енергіями менше 1 MeV, зовнішніх поясів Землі – з потоків протонів з енергіями до 60 MeV і електронів з енергіями 0,2-5 MeV. Радіаційні пояси Землі мають асиметричну будову, яка пов'язана зі структурою магнітного поля Землі. Це призводить до отримання бортовою апаратурою літального апарату при його знаходженні в радіаційному поясі Землі протягом 5 років дози іонізуючого випромінювання, $5 \cdot 10^4$ - $2 \cdot 10^5$ рад. Іонізуючі випромінювання космічного простору можуть надавати також помітний вплив на апаратуру, яка розташована в гірській місцевості.

Ядерний вибух є джерелом потужного імпульсу γ -випромінювання і запізнілого (відносно γ -квантів) імпульсу швидких нейтронів. В ядерних енергетичних установках процес поділу ядер супроводжується γ - та нейтронним випромінюванням.

Джерелами іонізуючих випромінювань також є атомні енергетичні установки, прискорювачі, γ -установки, рентгенівські та інші установки, що створюють потоки електронів, γ -квантів, нейтронів, важких заряджених частинок. У промислових ядерних установках прилади в основному піддаються дії нейтронного та γ -випромінювання. При цьому потік нейтронів може становити 10^{11} см⁻², а доза γ -квантів – 10^4 рад.

Наведене випромінювання – це штучна радіоактивність, яка утворена за рахунок дії нейтронів на ґрунт, матеріали будівель й інших об'єктів в зоні ядерної реакції, а також осколками поділу ядер, що мають великий період напіврозпаду. До наведеного – відносять все γ -випромінювання, що існує понад 15 секунд після ядерної реакції. З цієї точки зору необхідно створення радіаційно-стійкої камери і спеціальних установок

| | | | | | | |
|----|------|--------|---------|------|--|------|
| | | | | | НУЦЗУ. 2.16-47.СХ та ХТ. РПЗ-02 | Лист |
| | | | | | | 34 |
| Зм | Лист | Підпис | № докум | Дата | | |

відеоспостереження для обстеження подібних об'єктів. Такі відеокамери мають в якості чутливого елемента ПЗС-матрицю, вони стійкі до впливу γ -випромінювання 10^5 рад.

При бомбардуванні металевго анода пучком заряджених часток відбувається їх гальмування всередині анода і утворення випромінювання, яке називають гальмівним. За цим механізмом металеві екрани можуть стати джерелом вторинного випромінювання. При опроміненні багатьох матеріалів нейтронами і протонами можуть відбуватися ядерні реакції, в результаті опроміненій виріб стає джерелом γ -квантів або електронів.

Середньоосібна ефективна доза за рік по всьому світу, див. табл. 2.1.

Таблиця 2.1

Середня доза опромінення від природних джерел

| Джерело | Глобальна усереднена річна ефективна доза (мЗв) | Типовий діапазон (мЗв) |
|---|---|------------------------|
| Зовнішнє опромінення: | | |
| космічні промені; | 0,4 | 0,3-1,01 * |
| γ -випромінювання земного походження | 0,5 | 0,3-0,62 * |
| Внутрішнє опромінення: | | |
| вдихання (в основному радону); | 1,2 | 0,2-103 * |
| заковтування | 0,3 | 0,2-0,84 * |
| РАЗОМ | 2,4 | 1-10 |

1 * - діапазон від рівня моря до найбільш високої точки вимірювання;

2 * - діапазон по радіонуклідного складу ґрунту і будівельних матеріалів;

3 * - діапазон по накопиченню газоподібного радону в приміщеннях;

4 * - діапазон по радіонуклідного складу харчових продуктів і води.

Діяльність людини з використання джерел радіоактивних випромінювань доповнює природний рівень радіації: видобуток і використання руд, спалювання вугілля з вмістом природних радіоактивних речовин. При цьому розповсюджуються радіоактивні ізотопи [30]. Випробування й застосування ядерної зброї з 1945 по 1980 рік призводило до неконтрольованого викиду в навколишнє середовище значних кількостей радіоактивних матеріалів. Усереднена одноосібна річна ефективна доза досягла максимуму в 1963 році і становила 150 мЗв [31]; з того часу цей показник зменшився до 5 мЗв у 2000 році та 2,4 мЗв у 2019 році за рахунок залишків в навколишньому середовищі радіонуклідів (^{14}C , ^{90}Sr та ^{137}Cs). Але у містах з цього 80 % впливу на людину – дія накопичення радону у приміщеннях [42]. В Україні здійснено 2 мирних атомних вибухи,

найбільший на Харківщині під Красноградом потужністю 3,8 кт для гасіння газового фонтану, але безуспішно [57, 58]. В зоні спостереження піддослідні тварини загинули. Після гасіння та відновлення селищ – повернули людей. Атомні електростанції та інші ядерні установки викидають радіоактивні матеріали у довкілля. При їх роботі і демонтажі утворюються радіоактивні відходи. Розширюється застосування радіоактивних матеріалів у промисловості, сільському господарстві та наукових дослідженнях; медичне використання вносить найбільший і зростаючий внесок в опромінення населення - це променева діагностика та терапія, ядерна медицина, інтервенціональна радіологія.

Таблиця 2.2

Характеристика поширених ізотопів

| Елемент | Ізотоп | Період напіврозкладу | Вид випромінювання | Елемент | Ізотоп | Період напіврозкладу | Вид випромінювання |
|----------|--------|----------------------|---------------------|----------|---------|----------------------|--------------------|
| Гідроген | 1H2 | 12 р | бета | Залізо | 26Fe55 | 2,94 р | К-захоплення |
| Гідроген | 1H3 | стійкий | | Залізо | 26Fe59 | 45 д | бета, γ |
| Карбон | 6C14 | 5568 р | бета | Кобальт | 27Co60 | 5,3 р | бета, γ |
| Карбон | 6C13 | стійкий | | Арсен | 33As74 | 17,5 д | бета, γ |
| Нітроген | 7N15 | стійкий | | Бром | 35Br82 | 35,87 год | бета, γ |
| Натрій | 11Na24 | 15 год | бета, γ | Стронцій | 38Sr89 | 53 д | бета |
| Натрій | 11Na22 | 2,6 р | бета, γ | Стронцій | 38Sr90 | 25 р | бета |
| Фосфор | 15P32 | 14,3 д | бета | Йод | 53I131 | 8 д | бета, γ |
| Сірка | 16S35 | 87 д | бета | Золото | 79Au193 | 2,7 д | бета, γ |
| Калій | 19K42 | 12,4 год | бета, γ | Радій | 88Ra226 | 1590 р | альфа, γ |
| Кальцій | 20Ca15 | 152 д | бета | Радон | 86Rn222 | 3,8 д | альфа |
| Хром | 24Cr51 | 27,8 дня | К-захопл., γ | Цезій | 55Cs137 | 33 р | бета, γ |

Діаграма на рис 2.1 показує ступінь впливу різних джерел радіації на людину.



2.2. Види іонізуючого випромінювання

Розкладання ядер, як правило, супроводжується випусканням α -частинок, електронів (β^-), позитронів (β^+), γ -квантів та ін. (але не завжди кількість ядер, які розпадаються, збігається з числом заряджених частинок або γ -квантів, які випромінюються) [16, 28]. Відповідно розрізняють іонізуючі види випромінювання: α -, β -, фотонне (γ -) та нейтронне випромінювання, які розділяють на дві групи: фотонне та корпускулярне [44].

Фотонне випромінювання має електромагнітну природу й складається з фотонів. До нього відносять: γ -, характеристичне, гальмівне, рентгенівське випромінювання.

γ -випромінювання має ядерне походження і випускається при радіоактивному розпаді або ядерних реакціях, при переході ядра між різними енергетичними станами: ${}_{49}\text{In}^{115} + n \rightarrow {}_{49}\text{In}^{116} + \gamma$. При цьому після випромінювання α - або β -частинки, ядро залишається в збудженому стані, випромінювання ж фотонів (квантів) γ -випромінювання - повертає атом в нормальний енергетичний стан. Енергія γ -квантів, що випускаються в процесі радіоактивного розпаду, лежить в межах від десятків кеВ до 3-4 МеВ.

Характеристичне випромінювання має атомне походження та дискретний спектр, виникає при зміні енергетичного рівня електрону на електронній орбіті.

Гальмівне випромінювання виникає при зміні кінетичної енергії заряджених частинок. Воно утворюється при бомбардуванні металевого екрану або проходженні заряджених частинок в електромагнітному полі прискорювача та інше.

Рентгенівське випромінювання – сукупність гальмівного і характеристичного випромінювань в діапазоні енергій фотонів від 1 кеВ до 1 МеВ.

Корпускулярне випромінювання утворюється потоком частинок: α -, β -, нейтронів, протонів, космічних частинок та інших.

α -випромінювання - це потік ядер гелію (два протони і два нейтрони). Енергія α -часток для поширених ізотопів становить 3-9 МеВ: ${}_{92}^{238}\text{U} \rightarrow {}_{90}^{234}\text{Th} + \alpha$.

β -випромінювання - це потік електронів або позитронів. Маса β -частинок в 1840 разів менша за масу протона (або нейтрона); заряд дорівнює одній одиниці

елементарного електричного заряду: ${}_{55}^{137}\text{Cs} \rightarrow {}_{56}^{137}\text{Ba} + e^{-}$, ${}_{11}^{22}\text{Na} \rightarrow {}_{10}^{22}\text{Ne} + e^{+}$.

Поняття «К-захоплення» характеризує радіоактивні перетворення, які відбуваються без вильоту частинок з ядра, а шляхом захоплення радіоактивним ядром електрону з електронної К-оболонки атома. Відповідно, один з протонів ядра перетворюється у нейтрон, а новостворене ядро, як і при позитронному β^{+} -розпаді, отримує атомний номер, на одиницю менший, і теж саме масове число.

Нейтронне випромінювання є потоком електрично нейтральних частинок, маса яких дорівнює одній атомній одиниці маси: $\text{I}^{136} \rightarrow \text{I}^{135} + n$. Нейтрони утворюються в результаті поділу важких ядер, коли відбувається випускання нейтронів після взаємодії ядра з елементарними частинками або квантами фотонного випромінювання. Джерелами нейтронів є ядерні реактори, прискорювачі елементарних частинок, радіоактивні нейтронні випромінювачі. Оскільки нейтрони не мають заряду - вони не мають іонізуючої здатності. Однак бомбардування ними речовини викликає вторинне випромінювання, яке і стає причиною іонізації молекул.

Залежно від енергії розрізняють наступні види нейтронів: теплові – з енергією до 0,025 еВ; повільні – з енергією від 0,025 еВ до 1 еВ; проміжні – з енергією від 1 еВ до 100 кеВ; швидкі – з енергією більше 100 кеВ. Через відсутність електричного заряду, нейтрони мають високу проникну здатність. Лінійна передача енергії лежить в широких межах і, в залежності від енергії нейтрона, становить від 7 до 80 кеВ на 1 мікрон води.

З наведених у табл. 2.3 даних, за темою дослідження нас цікавлять відходи. Як видно, вони надають γ -, α - та β - випромінювання, як й для наведеного випромінювання.

Таблиця 2.3

Походження різних видів іонізуючого випромінювання

| Походження випромінювання | Вид випромінювання |
|--|---|
| Космічне | Протонне 90%, Альфа- 9%, Гамма- |
| Ізотопи | Гамма-, Альфа-, Бета- |
| Прискорювачі заряджених часток (електронів, протонів, іонів) | Гамма-, Альфа-, Бета-, протони, дейтрони, рентгенівське |
| Радіоактивні відходи | Гамма-, Альфа-, Бета- |
| Бомбардування аноду частками | Рентгенівське випромінювання |
| Ядерна зброя | Гамма-, Нейтронне, Залишки та утворені ізотопи |
| Анігіляція | Гамма- |
| Наведена радіоактивність | Перетворення стабільних ізотопів у нестабільні |

2.3. Параметри, що характеризують іонізуюче випромінювання

Радіаційний вплив забезпечують за допомогою різних джерел іонізуючих випромінювань. Іонізуючим є будь-яке випромінювання, взаємодія якого з речовиною викликає утворення електричних зарядів різних знаків. Більш важливим параметром радіоактивних речовин є не їх вагова кількість, а число частинок, що випромінюються, або пов'язана величина - число ядер, які розпалися [13, 17, 33]. Тому для кількісної характеристики радіоактивних речовин використовують поняття «**активність** радіоактивного ізотопу» - це число атомів, що розпадаються за одиницю часу. Кількість фотонів, що утворюються протягом одного розпаду, та їх енергія визначає **потужність дози**, яку надає γ -випромінювання на одиницю активності. Наприклад, активність ізотопу $^{33}\text{As}74$: він у 32% випадків випускає (β^-)-частинки, в 29,8% - (β^+)-частинки, а в 38,2% - розпад відбувається через К-захоплення. Тобто, на 1 кюрі $^{33}\text{As}74$ припадає $1,18 \cdot 10^{10}$ (β^-)-частинок й $1,10 \cdot 10^{10}$ (β^+)-частинок, які були випромінювані за 1 с. З часом розпаду кількість радіоактивних атомів та активність зменшується за законом:

$$C_t = C_0 \times e^{-\lambda t} = C_0 \times e^{-\frac{0,693t}{T_{1/2}}} \quad (2.1)$$

де C_t - активність з часом t ; C_0 - активність речовини в деякий початковий момент; λ і T - постійна розпаду і період розпаду.

Встановлюють також **рівень вилучення** при переробці радіоактивних матеріалів яка характеризує питому активність матеріалу, що створюють небезпеку для людей. Томуцей параметр пов'язаний з проникною здатністю.

Показником ізотопу є також **період напіврозпаду** – відрізок часу, за який розпадається половина початкового числа радіоактивних атомів.

Одиницею радіоактивності в системі одиниць СІ є "Беккерель" (Бк), який дорівнює одному розпаду за секунду. В системі спеціальних одиниць одиницею радіоактивності є кюрі (Ки) [27]. Одне Ки одно $3,7 \cdot 10^{10}$ розпадів за секунду. Слід зазначити, що в 1 г радію, очищеного від продуктів розпаду, розпадається близько

$3,7 \cdot 10^{10}$ атомів в секунду. Таким чином, активність 1 г чистого радію близька до 1 Ки. Від інтенсивності радіоактивності застосовують наступні розмірності вимірювання: МКи, кКи, Ки, мКи, мкКи, ПБк, ТБк, ГБк, МБк; кБк; Бк.

Поглинена доза визначає кількість енергії (Дж), яку поглинула одиниця маси опроміненого матеріалу (кг), це показник вимірюють у греях ($\Gamma_r = \text{Дж/кг}$).

Здатність іонізуючого випромінювання до надання шкоди біологічним об'єктам визначаються **еквівалентною дозою**, яка враховує відмінність різних видів випромінювання до таких наслідків за рахунок спеціального коефіцієнту: для β - и γ -випромінювань - «1», для α - - «20», для нейтронного випромінювання 5-20, залежно від енергії нейтронів. Еквівалентну дозу вимірюють в зівертах ($\text{Зв} = \text{Дж/кг}$).

Доза, отримана за одиницю часу - це **потужність дози** ($\Gamma_r/\text{с}$ або Зв/с).

Ефективна еквівалентна доза показує сумарний ефект опромінення організму.

Джерело називається точковим, якщо доза або інтенсивність випромінювання в даній точці змінюються обернено квадрату відстані від джерела. На практиці - якщо його лінійні розміри в п'ять-десять разів менше відстані, на якому вимірюється доза або інтенсивність. Для точкового джерела з активністю А, мКи, потужність дози випромінювання D, створювана на відстані R, см виражається формулою:

$$D = \frac{K_\gamma A}{R^2}, \text{ Р/год} \quad (2.2)$$

де K_γ - $\text{Р} \cdot \text{см}^2 / (\text{год} \cdot \text{мКи})$ γ -постійна ізоотопу (постійна потужності експозиційної дози) в Р/год, створювана γ -квантами всіх ліній точкового джерела активністю 1 мКи на відстані 1 см.

Для препарату радію постійна $K_\gamma = 8,4 \text{ Р/год}$, тобто точкове джерело Ra активністю 1 мКи створює в повітрі на відстані 1 см від джерела потужність дози, що дорівнює 8,4 Р/год; кобальту-60 13,5 Р/год, цезію-137 - 3,5 Р/год, іридію-192 – 5,46 Р/год, урану-238 - 0,09 Р/год й т.і. Порівняння γ -постійних радію-226 і Со60 показує, що 1мКи Со60 створює дозу випромінювання в 1,6 рази більшу, ніж 1 мКи радію. Тобто, за дозою випромінювання 1 мКи Со60 є еквівалентним 1,6 мКи радію (γ -кванти, які випромінює препарат Со60 з активністю 0,625 мКи, створюють аналогічну дозу опромінення до 1 мКи радію.

Для характеристики γ -випромінювання ізоотопів застосовують також γ -еквівалент (міліграм-еквівалент радію, 1 мг-екв Ra): кількість γ -випромінювання, яке створює таку ж

| | | | | | | |
|----|------|--------|---------|------|--|------|
| | | | | | НУЦЗУ. 2.16-47.СХ та ХТ. РПЗ-02 | Лист |
| | | | | | | 40 |
| Зм | Лист | Підпис | № докум | Дата | | |

іонізацію, як і дія 1 мг Ra.

Для лінійного джерела потужність дози в точці А (рис 1.2) в повітрі дорівнює:

$$P = \frac{K_{\gamma} A}{LR} \operatorname{arctg} \frac{L}{R}, \text{ Р/год,} \quad (2.3)$$

де А - активність лінійного джерела, мКи; L - його довжина, см; R - відстань (см) від торця лінійного джерела до точки, де визначається доза.

2.4. Використання іонізуючого випромінювання

Радіонуклідний склад продуктів поділу складний і залежить від часу опромінення, динамічної рівноваги їх утворення, вигоряння та α -розпаду. При розгляді γ -випромінювачів необхідно згадати, що, в основному, до них відносять штучні радіоактивні елементи, що поміщаються в порошкоподібному або твердому вигляді в герметичні сталеві ампули. Для радіаційних досліджень в різних областях [26, 37] (хімії, біології, фізиці твердого тіла, сільського господарства, харчової та легкої промисловості й інших) випускаються такі γ -установки як: ГУБЭ-4000, заряд ізотопу 0,15 ПБк (4000 Ки); «ГУПОС», заряд $3 \cdot 10^{-2}$ ПБк (800 Ки); МРХ- γ -100, заряд 11 ПБк (300 000 Ки); «Панорама», заряд 6,7 ПБк (180 000 Ки); К-300 000, заряд 110 ПБк (300 000 Ки). Перевага ізотопів – у простоті застосування, перевага прискорювача електронів у більшій інтенсивності випромінювання, можливості керування, безпеці після вимикання.

Джерела іонізуючого випромінювання, як правило, знаходяться в металевих контейнерах з товстими стінками, що ускладнює можливість ідентифікувати відповідним обладнанням наявність всередині радіоактивного джерела. Так, γ -терапевтичний апарат «ЛУЧ-1» (рис. 2.2) містить збіднений уран, кобальт-60, (активність 4800Ки).

Для джерел іонізуючого випромінювання існує проблема «покинутих джерел». Це важкі металеві предмети, які часто стають об'єктами інтересу представників населення з різними цілями. Проблема «покинутих джерел» полягає в їх потенційній небезпеці для здоров'я населення та складності їх виявлення [41]. Так, у 1987 році в місті Гоянія, Бразилія, елемент установки для радіотерапії з радіоактивним ізотопом цезій-137 після крадіжки опинився на звалищі, де його знайшов місцевий

| | | | | | | |
|----|------|--------|---------|------|--|------|
| | | | | | НУЦЗУ. 2.16-47.СХ та ХТ. РПЗ-02 | Лист |
| | | | | | | 41 |
| Зм | Лист | Підпис | № докум | Дата | | |

громадянином, дії якого призвели до розповсюдження радіоактивного забруднення. Як наслідок – чотири людини померли від радіоактивного зараження, а територія, де знаходилось дане джерело, не придатна до життя наступні 300 років.



Рис. 2.2. γ -терапевтичний апарат ЛУЧ-1



Рис. 2.3 Датчик обledenіння типу РІО-3 (аеродроми, дахи будинків, ремонтні майстерні)

| | | | | | | |
|----|------|--------|---------|------|--|------|
| | | | | | НУЦЗУ. 2.16-47.СХ та ХТ. РПЗ-02 | Лист |
| | | | | | | 42 |
| Зм | Лист | Підпис | № докум | Дата | | |



Рис. 2.4 Блок γ -джерела

2.5. Дія іонізуючого випромінювання на речовину

Здатність іонізуючих випромінювань викликати хімічні реакції виявлено незабаром після відкриття радіоактивності. На початку ХХ ст. були проведені перші експерименти з цього приводу та продемонстрували наявність хімічних змін після впливу випромінювань, що створюють радіоактивні елементи [35]. Як галузь науки радіаційна хімія (РХ) сформувалася у середині ХХ ст., що було пов'язано з необхідністю створенням паливних елементів для ядерних реакторів [4]. Відповідно почалося вивчення супутніх хімічних ефектів: радіоліз води, зміни радіоактивних речовин в розчинах та матеріалах, що використовуються в атомній техніці, реакції газообразних компонентів повітря (N_2 , O_2 , CO_2) та інше.

Так, електрично заряджені іони, іон-радикали, нейтральні частки утворюють трек при проходженні газу. Вибиті з молекул електрони («вторинні») володіють меншою енергією, але розлітаючись в сторони, створюють аналогічну дію: проходячи через речовину, γ -квант або швидкі частинки (α -частинки, електрони, протони та ін.) вибивають електрони з молекул. Це створює їх іонізацію або, у разі якщо кількість наданої енергії менше енергії іонізації, - збудження. Далі – трек первинної швидкої частинки розгалужується через утворення більш коротких областей іонізації і збудження. При великій щільності опромінення треки перекриваються, що ліквідує первісна неоднорідність у просторі для активованих і осколкових частинок. Цей процес посилює дифузія частинок з треків у найближче

| | | | | | | |
|----|------|--------|---------|------|--|------|
| | | | | | НУЦЗУ. 2.16-47.СХ та ХТ. РПЗ-02 | Лист |
| | | | | | | 43 |
| Зм | Лист | Підпис | № докум | Дата | | |

навколишнє середовище.

В опроміненому середовищі починаються процеси, які мають три головні стадії. На початковій, фізичній стадії швидка заряджена частинка зіткається з молекулами середовища, тому її кінетична енергія передається молекулам, що призводить до підвищення їх енергетичного стану. При цьому енергія у середовищі розподіляється по різним рівням (молекулярним, атомним). Утворюється велике число «активованих» молекул в різних станах збудження. Час протікання початкової стадії дуже малий і становить 10^{-15} - 10^{-12} сек. Збуджений стан молекул характеризується нестабільністю, тому починається середина стадія - розкладання або початок взаємодії активних молекул з сусідніми. У наслідок таких процесів виникає «набір» з іонів, атомів й радикалів, як проміжних продуктів ланцюгової радіаційно-хімічної реакції. Ця стадія продовжується 10^{-13} - 10^{-11} сек. На кінцевій, хімічній стадії відбуваються реакції активних частинок з сусідніми молекулами та між собою. При цьому формуються кінцеві продукти радіаційно-хімічної реакції. Тривалість цієї стадії залежить від активності проміжних частинок і властивостей середовища.

«Вторинні» електрони, витрачаючи свою кінетичну енергію на іонізацію (збудження) молекул, поступово сповільнюються до швидкості, відповідної тепловій енергії. У рідкому середовищі таке їх уповільнення відбувається за час 10^{-13} - 10^{-12} с, після чого вони можуть бути захоплені молекулою з виникненням іону або групою молекул з виникненням ефекту «сольватації». «Сольватовані» електрони існують у середовищі 10^{-8} - 10^{-5} с (залежно від умов та властивостей середовища), після цього періоду вони рекомбінують з частинками зарядженими позитивно.

2.6. Використання різних типів іонізуючого випромінювання при дослідженнях просвічуванням

Рентгенівське й γ -випромінювання мають властивості, які можна використовувати у технології: здатність проходити через непрозорі предмети (метали); засвічування фото- та рентгенівської плівки; можливість викликати флюоресценцію певних хімічних елементів, що дозволяє створювати підсилюючі екрани [45]. Джерелом, яке утворює рентгенівські промені є рентгенівська трубка.

| | | | | | | |
|----|------|--------|---------|------|--|------|
| | | | | | НУЦЗУ. 2.16-47.СХ та ХТ. РПЗ-02 | Лист |
| | | | | | | 44 |
| Зм | Лист | Підпис | № докум | Дата | | |

Позитронно-емісійна томографія (ПЕТ) реєструє зміну очікуваного випромінювання, народженого у внутрішніх органах після введення в організм ізотопу. Позитронна емісія стабілізує ядро за рахунок усунення позитивного заряду шляхом перетворення протона в нейтрон. Тому один елемент перетворюється в інший з атомним числом на одиницю менше, ніж у вихідного. Для ізотопів, що використовуються при позитронно-емісійній томографії, елемент, що утворюється після позитронного розпаду є стабільним (не радіоактивним). Всі радіоізотопи, що використовуються в ПЕТ розпадаються шляхом позитронної емісії. Позитрон (β^+), випущений ядром, що розпадається, проходить коротку відстань перш ніж зіткнутися з електроном сусіднього атома, з'єднується з електроном сусіднього атома утворюючи атом позитронію (в залежності від взаємного розташування спінів електрона і позитрона виникають атоми орто- або паразитронію). При розпаді атома позитронію електрон і позитрон анігілюють, перетворюючи свою масу два γ -кванта з енергією 511 кеВ спрямованих майже протилежно один від одного. Дане γ -випромінювання виходить за межі тіла і реєструється зовнішніми сцинтиляційними детекторами. Цю лінію протилежно спрямованих променів називають лінією збігу, яку і використовують в схемі формування томографічних зображень на позитронному томографі.

Для більшості використовуваних сьогодні ПЕТ-систем задовільною роздільною здатністю є 6 мм по всіх просторових напрямках, що дозволяє отримати зображення з роздільною здатністю в 8-10 мм з можливою тривимірну візуалізацію. Це важливо для кардіодосліджень. ПЕТ розширила наше розуміння біохімічних основ нормальної і патологічної роботи систем всередині організму і дозволила проводити біохімічні дослідження пацієнтам одночасно з їх лікуванням.

| | | | | | | |
|----|------|--------|---------|------|--|------|
| | | | | | НУЦЗУ. 2.16-47.CX та ХТ. РПЗ-02 | Лист |
| | | | | | | 45 |
| Зм | Лист | Підпис | № докум | Дата | | |

Розділ 3. СИСТЕМИ РАДІАЦІЙНОГО КОНТРОЛЮ ТА ЗАХИСТУ

3.1. Параметри, способи та типи реєстрації іонізуючого випромінювання

Одним з основних класифікаційних ознак радіаційних методів контролю є тип використовуваного детектора [22]. При реєстрації випромінювання за допомогою радіографічної плівки або заряджених напівпровідникових пластин метод називають радіографічним. Якщо радіаційне зображення перетвориться в світлове за допомогою радіаційно-оптичних перетворювачів, заснованих на використанні різних типів люмінесценції матеріалів під дією іонізуючого випромінювання, метод контролю називають радіоскопічним.

Радіаційні вимірювання в медицині.

Залежно від способу і типу реєстрації випромінювань все медичні прилади ділять на шість груп:

- медичні радіометри - реєстрація відносної радіоактивності в органі або в пробах біологічних рідин (радіометри щитовидної залози, гормонів в крові та ін.);
- медичні радіографи - реєстрація переміщення радіаційних препаратів (РП) в організмі з поданням інформації у вигляді кривих (ренографія, гепатографія, кардіографія і ін.);
- дозкалібратори - вимірювання абсолютної величини активності РП, що отримав пацієнт;
- лічильники всього тіла - вимірювання загальної активності РП в тілі пацієнта (визначення ефективного періоду напіврозпаду нукліда, оцінка тканинного етапу йодного обміну та ін.)
- скеннери, профільні скеннери - реєстрація розподілу РП в органі або тілі хворого з поданням даних у вигляді малюнка (скеннограм) або кривих (визначення місця підвищеного накопичення РП);
- сцинтиляційні γ -камери з ЕОМ - реєстрація переміщення і розподілу РП з отриманням на дисплеї ЕОМ зображення органу і кривих, замінює радіограф і сканер.

Принципова схема пристрою всіх типів ядерно-медичних приладів однакова і дозволяє виділити три частини:

- детектор - чутлива частина приладу, спрямована до джерела випромінювання (пацієнт, що отримав РП). Сцинтиляційний детектор має наступні ключові

| | | | | | | |
|----|------|--------|---------|------|--|------|
| | | | | | НУЦЗУ. 2.16-47.СХ та ХТ. РПЗ-02 | Лист |
| | | | | | | 46 |
| Зм | Лист | Підпис | № докум | Дата | | |

компоненти: коліматор, кристал йодиду натрію (сцинтилятор), фотоелектронний помножувач (ФЕП). Тоді γ -кванти РП, потрапляючи на детектор, викликають в кристалі утворення світлових спалахів (сцинтиляцій) низької інтенсивності. ФЕП забезпечує перетворення та посилення слабкого світлового сигналу в електричний. Далі працює електронна схема посилення сигналів від детектора, а реєструючий пристрій дозволяє отримати інформацію на фотоплівці, цифрове або графічне відображення на папері або екрані.

Радіаційні вимірювання при дефектоскопії.

Апаратуру радіометричного контролю відносять до приладів, які використовують іонізуючі випромінювання для вимірювання фізичних характеристик шляхом просвічування об'єктів. Цю апаратуру також класифікують за умовами вимірювання (поглинання випромінювання або його зворотне розсіювання), видом використовуваного іонізуючого випромінювання (рентгенівські трубки, ізотопні джерела, прискорювачі) і конструктивно-експлуатаційними особливостями.

При радіометричному методі контролю у якості детекторів випромінювання використовують лічильники, іонізаційні камери, сцинтиляційні перетворювачі.

У радіометричних приладах використовують аналоговий або дискретний (рахунковий) спосіб подачі інформації. Вибір методу обумовлений швидкістю дії, точністю, числом каналів, вихідним пристроєм для аналізу та прийняття рішення.

При роботі за допомогою аналогового методу можливі режими: стаціонарний і нестаціонарний; перший використовують для вимірювання товщин - по сталому вихідному сигналу. Нестационарний режим використовують для дефектоскопії. Він відрізняється тим, що вимірювання проводиться по миттєвому вихідному сигналу, який ще не вийшов на стаціонарний рівень.

Вибір цих режимів порводять наступним чином: якщо вимірювання неможливо здійснити дискретним методом (для джерела гальмівного випромінювання), то необхідно вибирати спосіб вимірювання за середнім током в нестаціонарному режимі, який забезпечує більшу точність. При використанні середньотокового методу вимірювань в нестаціонарному режимі необхідно точно фіксувати момент закінчення вимірювання, що ускладнює схему і вносить додаткову похибку приладу.

Джерело випромінювання - ізотоп. Розроблено різні схеми блоків реєстрації

| | | | | | | |
|----|------|--------|---------|------|--|------|
| | | | | | НУЦЗУ. 2.16-47.СХ та ХТ. РПЗ-02 | Лист |
| | | | | | | 47 |
| Зм | Лист | Підпис | № докум | Дата | | |

радіометричних дефектоскопів зі сцинтиляційних лічильниками, що працюють в середньотоковому (рисунок 1.3, а) й імпульсному режимах (рисунок 1.3, б).

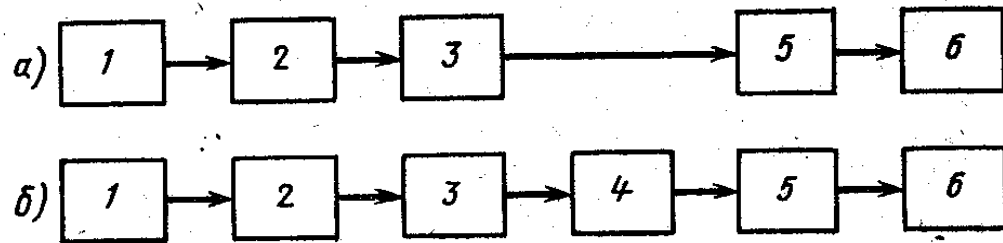


Рис. 3.1 - Структурна схема радіометричної дефектоскопії: 1 - ДІВ, 2 - об'єкт, 3 - блок детекції, 4 - формувач, 5 - блок обробки даних, 6 - блок реєстрації даних

В апаратурі, що працює за принципом рахування, вимірюванню підлягає середня частота проходження імпульсів, які потрапляють у ФЕП, якщо їх амплітуда перебільшує налаштований поріг дискримінації. Імпульси стабілізуються за амплітудою й тривалістю, що знижує флуктуації після інтегратора відносно середньотокового режиму.

Інтегральний дискримінатор відокремлює частку спектру імпульсів, яка виникла внаслідок розсіяного випромінювання та шумів ФЕП, що збільшує чутливість апаратури. Такий ефект потрібний й при детектуванні об'єктів складної форми з застосуванням наповнювачів, оскільки спектри випромінювання речовини об'єкту та заповнювача близькі лише в місці фотопіку. Однак така дискримінація відокремлює й частку імпульсів з корисною інформацією, яку несуть кванти, розсіяні в матеріалі кристалу.

Джерело випромінювання - прискорювач. При радіометричному детектуванні існує критичний взаємозв'язок між мінімальним розміром дефекту, скачками напруги живлення ФЕП та інтенсивністю випромінювання. При диференційному механізмі вимірювання за досліджуваним об'єктом розташовують блок з двома детекторами. Схема вимірювання порівнює профілі отриманих сигналів та формує уявлення про характер дефектів об'єкту. За такого двоканального вимірювання – схема порівняння віднімає похибки й вони взаємно знищуються.

При контролі «товстих» об'єктів значно збільшується дія похибок, які виникли внаслідок квантової природи випромінювання, а також наявності його розсіювання. Тоді є більший сенс здійснювати детектування за допомогою способу компенсації, за яким перший сцинтиляційний детектор розташовано за об'єктом, а другий – перед, у пучку іонізуючого випромінювання. Це є видом диференційного вимірювання з впровадженням схеми віднімання, коли відхилення реєстрованого сигналу лінійно пов'язано з відхиленням вхідного пучка випромінювання та коефіцієнту перетворення.

При реалізації схем вимірювання з застосуванням ефекту віднімання використовують різні способи обробки інформації, що надходить з сцинтиляційних детекторів. Частіше використовують середньотоковий варіант, який є оптимальним для ізотопної дефектоскопії, але у разі використання бетатрону цей спосіб є неефективним, оскільки характеризується низькою завадостійкістю.

Бетатрон- та рентгенівська дефектоскопія широко використовує схеми вимірювання з фіксуванням різниці усереднених діодами та інтегруючих схем імпульсів, що надають перший й другий детектори. Однак така схема добре працює лише у разі повної однаковості параметрів інтегруючих схем. Інакше за умови нестабільної роботи прискорювача точність детектування виявляється низькою. Цей недолік нівелюється шляхом наступного етапу порівняння – за амплітудами імпульсів, що надходять з детекторів, та їх пропорційності дозі в імпульсі випромінювання до їх попереднього перетворення (за допомогою зарядного пристрою та ключа). Відношення напруги паралельних каналів при двоканальному аналізі вимірюють системами автоматичної компенсації сигналу, що надходить, та схеми порівняння амплітуд двох імпульсів.

Точність вимірювання радіометричними пристроями з використанням сцинтиляційних детекторів, в тому числі і дефектоскопів, визначається, головним чином, стабільністю властивостей детекторів. До переваг двоканального дефектоскопу, що працює за принципом вимірювання співвідношення напруг або логарифма напруг, можна віднести те, що усувається необхідність зберігати параметри фотопомножувачів строго стабільними, достатньо підтримувати їх однаковими. У дефектоскопі зі схемою стабілізації живлення контрольні імпульси

| | | | | | | |
|----|------|--------|---------|------|--|------|
| | | | | | НУЦЗУ. 2.16-47.СХ та ХТ. РПЗ-02 | Лист |
| | | | | | | 49 |
| Зм | Лист | Підпис | № докум | Дата | | |

розташовують між імпульсами випромінювання Бетатрону. Після фільтрування вимірюваних та контрольних імпульсів – порівняння амплітуд останніх управляє напругою живлення одного з ФЕП так, щоб параметри обох каналів вимірювання залишалися однаковими. При цьому електричні сигнали з детектора є випадковими величинами; для ізотопного джерела випадковою величиною є число імпульсів за певний проміжок часу, а у випадку реєстрації гальмівного випромінювання прискорювачів - амплітуда імпульсів з детектора. В обох випадках зі зміною вимірюваного параметра (густини або товщини) змінюється розподіл сигналу на виході детектора.

Таким чином можна узагальнити, що якість зварних з'єднань частіше перевіряють радіографічним методом. Приклад реалізації детектування об'єкту: виберемо рентгенівський моноблочний апарат РУП-150-10. Даний тип рентгенівського апарату призначений для просвічування металів в цехових і польових умовах, на будівельних майданчиках, при контролі трубопроводів при температурі повітря від -10 до +350 °С і відносній вологості 80%. Він може працювати без водяного охолодження протягом 12 год так, щоб на 15-20 хв роботи в номінальному режимі припадав 1 ч перерви. Цей апарат дає направлене випромінювання в межах конуса з кутом розчину близько 400.

Технічні характеристики: напруга на рентгенівській трубці 50-150 кВ; тип рентгенівської трубки 0,4БПМ2-150; номінальний струм рентгенівської трубки 5 мА; споживана потужність 2 кВт; напруга мережі живлення 220, 380 В.

3.2. Сцинтиляційні детектори

У більшості γ -камер застосовуються тонкі (6-12 мм) одиночні сцинтиляційні кристали йодистого натрію, активованого талієм: NaI(Tl) зі значним діаметром (до 50 см) випромінюють світло в синьо-зеленої області спектра (з довжиною хвилі 415 нм), що узгоджується зі спектральною характеристикою стандартних бі-лужних ФЕП. Вони характеризуються великим атомним номером і високою густиною, причому їх лінійний коефіцієнт поглинання випромінювання при енергії 150 кеВ становить 2,22 см⁻¹. Таким чином в кристалі товщиною 10 мм поглинається 90% γ -квантів з

| | | | | | | |
|----|------|--------|---------|------|--|------|
| | | | | | НУЦЗУ. 2.16-47.СХ та ХТ. РПЗ-02 | Лист |
| | | | | | | 50 |
| Зм | Лист | Підпис | № докум | Дата | | |

енергією 150 кеВ. Час виникнення для кристала - 230 нс, що дозволяє досягти швидкості рахування до декількох десятків тисяч відліків за секунду без зміни властивостей сцинтилятора. Кристал NaI(Tl) має найбільший світловий вихід (до 100) з усіх відомих неорганічних сцинтиляторів і добре пропускає власне випромінювання. Незважаючи на гігроскопічність, а тому й необхідність герметизації, цей кристал практично незамінний за типових енергій γ -випромінювання - 100 кеВ. Роздільна здатність за енергією для тонких кристалів NaI(Tl) становить 10 - 12% для 150 кеВ.

Через високий коефіцієнт заломлення кристалу NaI (Tl), що становить 1,85, для оптичного сполучення сцинтилятора і ФЕП застосовують світловід. Це зменшує втрати світла при його проходженні до ФЕП, оскільки світлопроводи виготовляють з прозорої пластмаси з аналогічним коефіцієнтом заломлення. Останнім часом замість світловода стали застосовувати мікропроцесорну систему корекції зображення. Фотопомножувач є упаковкою з фотопомножуючих трубок на поверхні круглого сцинтиляційного кристалу у вигляді гексагональної матриці, що складається з 7, 19, 37, 61 і т.д. елементів.

Для блокування розсіяного випромінювання крім області цільового пучка, сцинтиляційний кристал і електронні пристрої γ -камери поміщають в свинцевий захисний екран [66]. Для зменшення маси приладу багато γ -камери забезпечені екранами лише для мінімального захисту від низькоенергетичних γ -квантів. (З енергією менше 250 кеВ), що дозволяє застосовувати лише низькоенергетичні радіонукліди (^{99}Tc , ^{111}In , ^{123}I , ^{201}Tl). В даний час всі провідні виробники і постачальники γ -камер: Siemens, General Electric, Toshiba, Sopher Medical освоїли виробництво і поставляють моделі γ -камер з двома детекторами прямокутної форми з розмірами поля зору не менше 350 - 510 мм. Ціна цих γ -камер - від 600 тис. доларів і вище.

| | | | | | | |
|----|------|--------|---------|------|--|------|
| | | | | | НУЦЗУ. 2.16-47.СХ та ХТ. РПЗ-02 | Лист |
| | | | | | | 51 |
| Зм | Лист | Підпис | № докум | Дата | | |

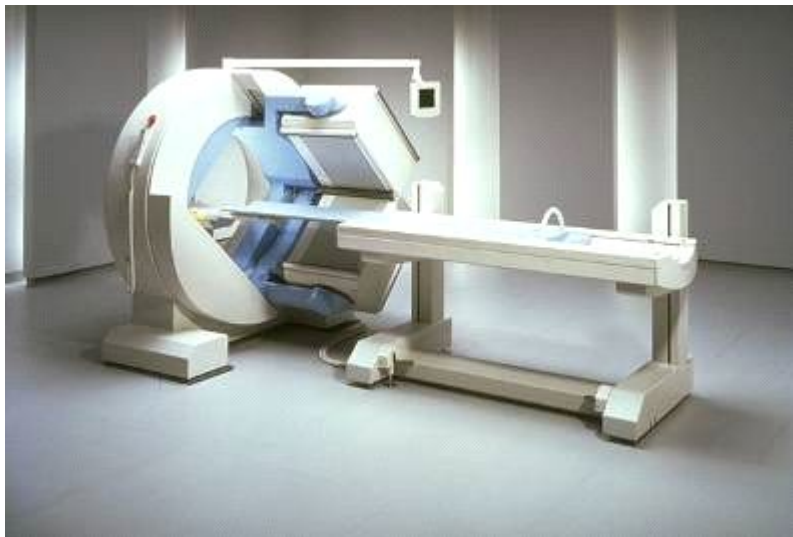


Рис.3.2. Гамма-камера

3.3. Радіографія

За умови радіографії сигнал, який пройшов крізь об'єкт опромінення, фіксують радіографічні плівки [45]. При цьому слід пам'ятати, що для цього типу плівок з підвищенням коефіцієнта контрастності й роздільної здатності, а, відповідно, з підвищенням чутливості до виявлення дефектів, - знижується показник фотонного виходу плівки, що збільшує необхідний час її витримання.

Радіографічні плівки класифікують наступним чином:

- безекранні - застосовують без екранів, а шляхом контакту з об'єктом;
- екранні – реєстрація сигналу, який пройшов крізь об'єкт дослідження, відбувається через наявність проміжного підсилюючого екрану: флуоресцентного (має високу чутливість до видимої й ультрафіолетової частин спектру) та металевого у вигляді фольги.

Радіографічні дослідження використовують принцип фотоплівки: її почорніння під дією іонізуючого випромінювання пропорційна експозиційній дозі. Це пояснюється тим, що щільність почорніння пропорційна числу виявлених зерен, а експозиційна доза пропорційна числу фотонів, що потрапляють на плівку.

Радіографічні плівки характеризують показником роздільної здатності, яка визначається кількістю виявлених штрихових ліній однакової товщини на ділянці 1 мм. Дрібнозернисті плівки типу РТ-5, РТ-4М мають більш високу роздільну здатність на відміну від крупнозернистих плівок типу РТ-3, РТ-1 і РТ-2.

Для інтенсифікації сигналу іонізуючого випромінювання, яке порйшло крізь об'єкт, застосовують металеві й флуоресцентні підсилюючі екрани для скорочення часу просвічування. Інтенсифікація сигналу екранами визначається їх коефіцієнтом посилення, який визначають за часом отримання зображення на плівці з екраном та без нього.

Механізм підсилюючої дії металевих екранів при дефектоскопії визначається утворенням вторинних електронів в екрані при проходженні крізь нього іонізуючого випромінювання. Для матеріалу екрану обирають важкі метали (свинець, вольфрам, олово і ін.), які формують у вигляді фольги, що надає високі коефіцієнти посилення. Для металевих екранів передбачено застосування безекранних радіографічних плівок РТ-1, РТ-3, РТ-4М, РТ-5. Це зберігає роздільну здатність для зображення на плівках та забезпечує високу чутливість вимірювання.

Створено підсилюючі флуоресцентні екрани різного спектру світіння люмінофору після дії іонізуючого випромінювання: видимої, синьо-фіолетової, ультрафіолетової й інфрачервоної частин спектру. Флуоресцентні екрани являють собою пластмасову основу з шаром люмінофору. Передбачають їх використання разом з екранними радіографічними плівками, оскільки спектральна чутливість плівки та спектр світіння екрану співпадають. Однак використання флуоресцентних екранів значно погіршує роздільну здатність зображення на плівках внаслідок крупнозернистості екранів, що можна частково скоригувати меншою експозицією. Збільшення коефіцієнту посилення відносно металевих екранів та підвищення чутливості відносно флуоресцентних екранів забезпечує радіографія з використанням флуорометалевих екранів у вигляді свинцевої підкладки з шаром люмінофору

Усунути застосування плівок при радіографії дозволяє електрорадіографія, де роль детектора іонізуючого випромінювання виконує спеціальна пластина. Ця пластина являє собою алюмінієву основу з шаром аморфного селену, який характеризується фотопроводимістю під дією іонізуючих випромінювань. Детектування проводять під дією рентген-апаратів по стадіях: 1) зарядка пластини коронним розрядом з напругою 10кВ, внаслідок чого селеновий шар набуває рівномірний позитивний заряд; 2) експонування пластини при детектуванні, що формує приховане електростатичне зображення дефектів деталі (залишковий заряд на

| | | | | | | |
|----|------|--------|---------|------|--|------|
| | | | | | НУЦЗУ. 2.16-47.СХ та ХТ. РПЗ-02 | Лист |
| | | | | | | 53 |
| Зм | Лист | Підпис | № докум | Дата | | |

різних ділянках селенового покриття прямопропорційно інтенсивності пучку опромінення, що пройшов крізь об'єкт; 3) прояв зображення - шляхом нанесення на селенове покриття дрібнодисперсного графітового тонеру з негативним зарядом; 4) перевод зображення на папір шляхом контакту з селеновим тонованим графітом покриттям після підзарядки паперу позитивними зарядом у коронному розряді; 5) закріплення зображення парами ацетону й толуолу з наступним оплавленням частинок тонеру на папері; 6) відновлення пластини від залишків тонеру хутряним валиком для наступного застосування.

Електрорадіографія значно збільшує швидкість детектування: процес аналізу без експонування займає 45-75 с. Чутливість такої радіографії при детектуванні об'єктів на основі алюмінію або титану зіставна з застосуванням звичайної радіографії, але дає гірші результати при детектуванні об'єктів зі сталі. Основним недоліком електрорадіографії можна назвати відсутність гнучких чутливих пластин, що виключає можливість контролю виробів складної форми. Крім того, на реєструючих пластинах виникають пошкодження чутливого покриття з селену, що призводить до появи похибок вимірювання.

3.4. Радіоскопія

Для безпосередньої радіоскопії використовують перетворювачі рентгенівського випромінювання. Це найбільш поширений засіб реєстрації рентгенівського і γ -випромінювань. При цьому застосовують полікристалічні (порошкові) й монокристалічні екрани [45].

Флуороскопічні (порошкові) рентгенівські екрани скорочують час експозиції в рентгенографії, а також їх застосовують як вхідні елементи рентгенівських електронно-оптичних перетворювачів (РЕОП) та для радіоскопії при флюорографії.

Яскравість світіння екрану пропорційна поглиненій дозі рентгенівського випромінювання і збільшується з підвищенням напруги і струму рентгенівської трубки. Для розширення застосовності рентгено-візуальних методів дефектоскопії впроваджено більш ефективні перетворювачі – сцинтиляційні монокристалічні екрани, РЕОП та інше. Основна тенденція у вдосконаленні порошкових екранів - поліпшення

частотно-контрастної характеристики екрану за рахунок зменшення розмірів зерна люмінофору.

Сцинтиляційні монокристалічні екрани застосовують для реєстрації рентгенівського та γ -випромінювання. Монокристалічні екрани NaI(Tl) виявляються менш яскравими, ніж флуороскопічні, через мале значення коефіцієнта спектральної відповідності кривої видності. Однак за енергетичним виходом монокристалічні екрани CsI(Tl) поступаються екранам NaI(Tl). На відміну від флуороскопічних екранів монокристалічні екрани мають більш високу роздільну здатність.

Фоторезистивні напівпровідникові перетворювачі рентгенівського випромінювання використовують явище зміни опору напівпровідника під дією випромінювань електромагнітного спектра. Область спостереження фотопровідності велика і охоплює матеріали з питомим опором від 1 до 1018 Ом·см, включаючи метали і надпровідники. Перевагою такого способу вимірювання є те, що фотопровідники дають без шумовий сигнал, оскільки відношення сигнал/шум в фотострумі майже дорівнює відношенню сигнал/шум в поглинених фотонів пучку вхідного випромінювання. Отже, гранична чутливість системи з фоторезистивним входом визначається в основному відмінностями числа поглинених в фоторезисторі квантів первинного випромінювання. Оптимальною для цього випадку є величина, близька до 1. Зазвичай роздільна здатність фоторезистивних приймачів випромінювання становить 2-5 лін/мм. Серед перетворювачів з фоторезистивним входом найбільше застосування отримали рентгеновідікони і електролюмінісцентні перетворювачі.

Електронно-оптичні перетворювачі і підсилювачі рентгенівського зображення збільшують яскравість зображення за допомогою електронно-оптичних перетворювачів і підсилювачів. Ці два способи відрізняються один від одного тільки тим, що їх фотокатоли чутливі до різних областей спектру електромагнітних хвиль. Наприклад, в підсилювачі фірми «Філіпс» на алюмінієвій підкладці з одного боку нанесені екран і фотокатод. Можливі інші варіанти підкладок (наприклад, тонка слюдяна пластинка).

Застосовують електронно-оптичні помножувачі (ЕОП), що дозволяє проводити детектування за меншої напруги на рентгенівській трубі, ніж при використанні флуороскопічного екрану. При цьому виникає можливість отримання більш

| | | | | | | |
|----|------|--------|---------|------|--|------|
| | | | | | НУЦЗУ. 2.16-47.СХ та ХТ. РПЗ-02 | Лист |
| | | | | | | 55 |
| Зм | Лист | Підпис | № докум | Дата | | |

контрастного рентгенівського зображення, і разом з високою яскравістю зображення на вихідному екрані ЕОП поліпшує ефективність детектування дефектів.

Розроблено рентгенівські електронно-оптичні перетворювачі (РЕОП) двох типів: РУ-135 і РУ-230. Гранична роздільна здатність РУ-135 в центрі становить 1,5-1,8 пар лін./мм, на краю робочого поля 1,5 лін./мм, Для РУ-230 роздільна здатність в центрі - 2 пари лін./мм, на краю - 1 пара лін./мм. За ДСТУ 7512-69 дефектоскопічна чутливість РУ-135 і РУ-230 при радіоскопії сталі товщиною до 20 мм становить 3 - 5%.

Коефіцієнт посилення яскравості кращих зразків РУ-135 досягає $(3-5)10^3$, РУ-230 - $(1,5-4,0)10^3$. При використанні РЕОП РУ-135 і РУ-230 гранична товщина контрольованої деталі зі сталі становить 20–25, а з алюмінію 50 - 80 мм.

В даний час розвивається метод рентгено-телевізійного контролю з використанням оптичних ЕОП. Світлове зображення з флуороскопічного екрану попередньо посилюється оптичним підсилювачем світла, а потім, за допомогою оптики, передається на фотокатод передавальної телевізійної трубки.

Промислові установки рентгено-візуального контролю. На практиці для рентгенівського неруйнівного контролю застосовують різноманітні радіоскопічний системи: від простих пристроїв флуороскопічного контролю до установок, що використовують електронно-оптичні перетворювачі, складну оптичну частину перенесення зображення, телевізійний канал, пристрій кіно- та магнітного запису та інше.

Для дефектоскопії тонкостінних зварних з'єднань з важких й легких матеріалів застосовують рентгеновідконні телевізійні установки типу ПТУ-38 і ПТУ-39 з рентгеновідконами, відповідно, ЛИ-417 й ЛИ-423.

Установки з рентгеновідконом ЛИ-417 мають високу роздільну здатність і хорошу контрастну чутливість 3%. У статичному режимі видно мідні дротики діаметром 35 мкм, з кроком 35 мкм, виявляються практично ті ж дефекти, що і при радіографії на плівку РТ-1 (газові пори діаметром більше 0,2 мм, поперечні тріщини з розкриттям -. 100 мкм). Швидкість контролю за рахунок значного зменшення чутливості можна, збільшити до 200 мм/хв. При контролі застосовують головним чином гострофокусну рентгенівську трубку 0,3БПВ6-150 рентгенівського апарату РУП-150-10.

| | | | | | | |
|----|------|--------|---------|------|--|------|
| | | | | | НУЦЗУ. 2.16-47.СХ та ХТ. РПЗ-02 | Лист |
| | | | | | | 56 |
| Зм | Лист | Підпис | № докум | Дата | | |

Зварні з'єднання зі сталі, алюмінію, титанових і магнієвих сплавів, лиття з важких і легких матеріалів контролюють на рентгено-телевізійних установках РІ-10Т, РІ-20Т, РІ-30Т, РІ-20ЕТ, РІ-10Е. В установках використовуються монокристалічні екрани CsI(Tl) різного діаметру й товщини.

На установці РІ-10Т перевіряють якість зварних з'єднань з товщиною об'єкту вимірювання зі сталі - 20 мм, з алюмінію - 50 мм. Чутливість радіоскопії за ДСТУ 7512-69 на апараті РУП-150-10 при детектуванні деталей зі сталі товщиною 3-18 мм - 1,5-3%, а з алюмінію 3-50 мм - більше 3 %.

При роботі з ДІВ - РУП-150/300-10 найбільша товщина об'єкту вимірювання зі сталі - 80 мм, з алюмінію - 200 мм.

Різновидом установки з ЕОП є електронно-оптичний інтроскоп РІ-10Е з автономним біологічним захистом. В установці використовується монокристалічний екран CsI(Tl) діаметром 200 мм, рентгенівський апарат РУП-200-5, передбачено координатний стіл для переміщення виробів розміром не більше 200×150×200 мм, вузол фотореєстрації. Гранічна роздільна здатність 5 пар лін./мм.

3.5. Контроль за обігом джерел іонізуючого випромінювання

Використання джерел іонізуючого випромінювання викликає збільшення питомої кількості опромінення, що приходить на одну людину [40]. Опромінення усередненого представника людства в результаті контрольованих викидів нормується межами, які отримали міжнародне визнання (МКРЗ - Міжнародна комісія радіологічного захисту). Ці норми встановлено на більш низькому рівні, ніж усереднений для природного опромінення.

На даний в Україні працюють «Норми радіаційної безпеки» - НРБ-98 [2] та «Основні санітарні правила забезпечення радіаційної безпеки України» [52], «Загальні правила радіаційної безпеки використання джерел іонізуючого випромінювання у медицині» [54], «Про встановлення основних норм безпеки для захисту від загроз, зумовлених впливом іонізуючого випромінювання» [59].

Наукову основу нормативної бази з радіаційної безпеки складають:

- Рекомендації Міжнародної комісії з радіологічного захисту 1990 року і інші

| | | | | | | |
|----|------|--------|---------|------|--|------|
| | | | | | НУЦЗУ. 2.16-47.СХ та ХТ. РПЗ-02 | Лист |
| | | | | | | 57 |
| Зм | Лист | Підпис | № докум | Дата | | |

Публікації МКРЗ 80-90 років;

- Міжнародні основні норми радіаційної безпеки для захисту від іонізуючих випромінювань і безпечного поводження з джерелами випромінювання, розроблені Міжнародним агентством з атомної енергії спільно з АЯЕ / ОЕСР, ВООЗ, МОП, ПОЗ, ФАО і прийняті МАГАТЕ в 1996 році;
- Досвід забезпечення радіаційної безпеки в атомній енергетиці і промисловості і аналіз наслідків аварії на Чорнобильській АЕС.

Для забезпечення радіаційної безпеки за умови забезпечення нормативних вимог застосування джерела іонізуючого випромінювання (ДІВ) враховують наступні принципи організації праці [23, 24]:

1) контроль за не перевищенням допустимих значень індивідуальних доз та інших контрольованих параметрів радіаційної безпеки щодо радіаційного впливу ДІВ на людей (принцип нормування);

2) заборона будь-якої діяльності з використання ДІВ, якщо створена ймовірність шкоди (людині або навколишньому середовищу) перебільшує можливий позитивний ефект від застосування радіаційних технологій (принцип обґрунтування) [34].

Принципи безпеки обертання ДІВ, в тому числі для запобігання появи «покинутих джерел»:

- дозвільний принцип застосування ДІВ (використовувати джерело можуть особи або підприємства, які довели, що здатні забезпечити безпеку й захищеність ДІВ),
- облік та контроль радіоактивних джерел.

Таблиця 3.1

Показники дозових навантажень для різних стадій ЯПЦ

| Стадія | Очікувана колективна ефективна еквівалентна доза (люд.-Зв) на 1 ГВт електроенергії | |
|----------------------|--|---------------|
| | обслуговуючий персонал | населення |
| Видобуток палива | 0,9 | 0,5 |
| збагачення | 0,1 | 0,04 |
| виготовлення ТВЕЛів | 1 | 0,0002 |
| реактори | 10 | 4 |
| регенерація РАВ | 10 | 1 |
| захоронення відходів | дані відсутні | дані відсутні |

Відповідно до нормативної бази, використання ядерних установок та ДІВ в Україні засновано на дозвільному принципі. Державна інспекція ядерного регулювання України має право на видачу дозволу на кожний окремий вид діяльності, яий передбачає застосування радіоактивної речовини; в тому числі ця інспекція видає ліцензію на застосування ДІВ.

Відповідно до закону України «Про дозвільну діяльність у сфері використання ядерної енергії» державна реєстрація ДІВ є обов'язковою, що впроваджує облік та контроль за місцезнаходженням та переміщенням джерел [60].

Станом на 2012 рік в Державному реєстрі ДІВ України, де фіксуються всі джерела и операції з ними, обліку підлягає 12462 радіоактивних джерел та 15838 генеруючих пристроїв (відповідно до положення «Про Державний реєстр джерел іонізуючого випромінювання» [61]). Державний реєстр ДІВ - це глобальна державна система обліку і контролю ДІВ, поводження з якими не звільняється від регулюючого контролю (вироблені в Україні або ввезені через кордон), а також власників, за якими зареєстровано цей ДІВ на праві господарського відання або оперативного управління. Необхідно зауважити, що серед близько 500 тис. ДІВ, що зараз обертається або зберігається в Україні, більше 450 тис. шт. вже виведено з експлуатації та знаходяться на зберіганні в державних підприємствах з поводження з радіоактивними відходами (РАВ) та контролюються Державним Реєстром РАВ.

Держатомрегулювання України обмежує терміни їх зберігання та встановило вимоги до поводження з відпрацьованими ДІВ: не зберігати довше 6 місяців під загрозою покарання. Тому організація у разі початку використання ДІВ має або оплатити фонд поводження з РАВ, що забезпечить безкоштовний вивіз та утилізацію ДІВ спеціалізованою установою, або заключити договір з постачальником щодо його зобов'язань забрати джерело назад після завершення його використання.

Для вирішення проблеми «покинутих джерел» (що втратили відповідального власника) створено міжнародні програми з залучанням американських та німецьких сторін, метою яких є зібрати ДІВ з площадок знаходження та безпечно направити їх до спеціалізованих підприємств. Проводиться організований пошук «покинутих джерел». В Україні основну увагу приділяють фізичному пошуку, оскільки адміністративний

| | | | | | | |
|----|------|--------|---------|------|--|------|
| | | | | | НУЦЗУ. 2.16-47.СХ та ХТ. РПЗ-02 | Лист |
| | | | | | | 59 |
| Зм | Лист | Підпис | № докум | Дата | | |

контроль за обігом ДІВ у нашій країні був історично є жорстким. Фізичний пошук - це врахування відповідними інспекторами фізичних характеристик ДІВ: зовнішній вигляд та характер випромінювання. Оскільки ДІВ знаходяться в металевих контейнерах, вони часто потрапляють до металобрухту. При цьому існує небезпека їх подальшою переплавлення, що може викликати значне радіаційне забруднення. Проблема «покинутих джерел» є загальносвітовою, не вирішеною складовою якої є проведення теракту або військових дій на місці використання ДІВ.

На Україні застосовують пасивний пошук «покинутих джерел»: активне очікування - коли об'єкт ДІВ надійде до точки очікуваного контролю. Але документ «Консультації щодо підвищення безпеки ДІВ в Україні» фіксує активний пошук як найбільш ефективний метод, оскільки при відсутності переміщення, виявити джерело пасивним пошуком неможливо [62]. Для здійснення активного пошуку застосовують мобільну радіологічну лабораторію SONNI з γ -детектором. Постанова Кабінету Міністрів України від 2 червня 2003 р. N 813 покладає фінансову відповідальність на користувача незареєстрованого ДІВ, а у разі відсутності власника – на місцеві органи влади [63]. В міжнародній практиці для розв'язання проблеми «покинутих джерел» використовують «Іспанський протокол» про співробітництво в області радіаційного моніторингу металевих матеріалів (ECE/TRANS/AC.10/2006/2) [3], за яким підприємство з металообробки звільняють від сплати за поводження з виявленим «покинутим джерелом» за рахунок того, що виплачує незначний щорічний внесок до відповідного фонду. Система пасивного пошуку ДІВ на Україні є багатобар'єрною та складається зі складових радіаційного контролю: 1) на кордонах; 2) на підприємствах; 3) на пунктах збору металобрухту; 4) на металургійних підприємствах (за наказом КМУ № 183 від 18.11.2011 р. фахівці підприємства повинні проводити перевірку вибухобезпечності та радіаційного фону металобрухту [64]).

На Україні діють спеціалізовані комбінати (ДМСК), які беруть участь у ліквідації аварійних ситуацій у разі виявлення «покинутих» ДІВ, та направляють їх до сховища безпечного та контрольованого зберігання з ізоляцією від потрапляння у навколишнє природне середовище та місць доступних для населення.

Україна повідомляє МАГАТЕ щодо кожного знайденого джерела. Разом з цим, слід відмітити, що незаконне володіння джерелом не вигідне. Продаж його за великі

| | | | | | | |
|----|------|--------|---------|------|--|------|
| | | | | | НУЦЗУ. 2.16-47.СХ та ХТ. РПЗ-02 | Лист |
| | | | | | | 60 |
| Зм | Лист | Підпис | № докум | Дата | | |

гроші є міфом - ніхто й ніколи його не придбає. Вирок при затриманні може сягати до 8 років ув'язнення.

На всіх об'єктах атомної енергетики реалізується комплекс технічних і організаційних заходів для максимального зменшення несприятливого радіаційного впливу на людину та навколишнє середовище за напрямками [20]:

- глибокий багатобар'єрний захист від розповсюдження радіоактивних речовин;
- застосування спеціальних систем безпеки та подолання порушень нормальної експлуатації з резервуванням та можливістю захисту без участі персоналу;
- використання систем управління і контролю технологічних процесів й радіаційного стану на принципах резервування та високого ступеня надійності технічних засобів;
- забезпечення безпеки при екстремальних природних і техногенних впливах з імовірністю аварійного випадку 1 раз на 10000 років;
- застосування технічних рішень зі зменшенням утворення РАВ та системи очищення для організації оборотного циклу для певних речовин;
- очищення забруднених радіоактивними речовинами викидів, недопущення неконтрольованих викидів в навколишнє середовище.

Зараз подекуди ще працює застаріла радянська система радіаційного контролю (СРК) для АЕС, тому розроблюються нові технічні засоби та системи контролю [9]. Так, на частині АЕС України з реакторами типу ВВЕР ще працює комплект радіаційного контролю ЛКРБ-03, який вже сучасним вимогам не відповідає: низька стійкість до зовнішніх факторів; чутливість до стрибків електроживлення й електромагнітних полів; відсутність можливості автоматичного моніторингу; відсутність захисту від несанкціонованого втручання. Відповідно, необхідна заміна приладів та системи ЛКРБ-03, розширення функцій СРК: радіаційне спостереження теплоносія першого контуру, САОЗ, СВО, технічної води, в приміщеннях енергоблоків; проток ПГ по азоту-16, потужності дози нейтронів в ЦЗ; за нерозповсюдженням радіаційноактивних речовин, мережевої води; встановлення нових пристроїв детектування, розширення функцій АСКРС; автоматизація обліку доз опромінення та контролю перебування персоналу в контрольованій зоні; впровадження скануючого СІЧ.

Контроль за рівнями викидів радіаційноактивних речовин у повітря та водоюми проводиться автоматизованими системами радіаційного спостереження (АСКРС),

| | | | | | | |
|----|------|--------|---------|------|--|------|
| | | | | | НУЦЗУ. 2.16-47.СХ та ХТ. РПЗ-02 | Лист |
| | | | | | | 61 |
| Зм | Лист | Підпис | № докум | Дата | | |

встановленими на всіх джерелах викидів, та лабораторними дослідженнями проб. АСКРС розроблена в межах програми МАГАТЕ та призначена для безупинного автоматичного контролю радіаційного стану на промисловому майданчику АЕС, у санітарно-захисній зоні, зоні спостереження (30 км) при всіх режимах роботи станції. Система забезпечує контроль радіаційного стану території в 3000 км².

АСКРС – це сучасний комплекс автоматизованих постів моніторингу радіаційного стану на зоні спостереження, з яких 16 розміщені на території проммайданчика Рівненської АЕС і 13 – у санітарно-захисній зоні та зоні спостереження РАЕС.

Постами контролю здійснюється вимір газо-аерозольних викидів через усі вентиляційні труби енергоблоків АЕС, рідких скидів РАЕС, потужності дози, концентрації йоду й аерозолів на проммайданчику і в населених пунктах зони навкруги АЕС. До складу центрального поста контролю системи входять 2 метеорологічних комплекси. Інформація щодо метеорологічного стану навколишнього середовища і його радіаційні параметри передається у програмний комплекс для можливості оперативного прогнозування радіаційного стану в зоні спостереження АЕС. Даний програмний комплекс розроблено Інститутом радіаційного захисту АТН України.

У склад даної системи входять два пересувних пости контролю на автомобілях підвищеної прохідності. Вони мають комплект устаткування для контролю радіаційних, хімічних і метеорологічних параметрів, відбору проб, проведення вимірів у польових умовах і можливості автономної роботи, устаткування для визначення координат на місцевості та передачі даних за каналами супутникового зв'язку. Тому ці пости можуть здійснювати автономні пошукові роботи у будь-якій точці 30-км зони спостереження АЕС та здійснювати допомогу в реалізації радіаційної та іншої розвідки на інших АЕС України.

Розрахунковий комплекс також здійснює аналіз радіологічних наслідків ймовірної аварії та його дані враховуються для ухвалення рішення щодо захисних заходів у разі виникненні аварійної ситуації на АЕС для персоналу й мешканців населених пунктів зони спостереження. Усього з енергоблоків накопичується близько 85 000 технологічних параметрів.

| | | | | | | |
|----|------|--------|---------|------|--|------|
| | | | | | НУЦЗУ. 2.16-47.СХ та ХТ. РПЗ-02 | Лист |
| | | | | | | 62 |
| Зм | Лист | Підпис | № докум | Дата | | |

Інформація системи передається керівництву РАЕС, у НАЕК «Енергоатом» і ДІЯР України, Рівненську облдержадміністрацію, обласні управління МНС та екології.

Крім автоматизованих методів контролю, центральний пост системи може проводити лабораторний аналіз наслідків радіаційного впливу АЕС на навколишнє середовище у зоні спостереження.

Обслуговуючий персонал АСКРС - 30 осіб: інженери-фізики, радіохіміки, електроніки, програмісти, метеорологи. Даний комплекс є один із кращих комплексів радіаційного контролю у світовій практиці.

| | | | | | | |
|----|------|--------|---------|------|--|------|
| | | | | | НУЦЗУ. 2.16-47.СХ та ХТ. РПЗ-02 | Лист |
| | | | | | | 63 |
| Зм | Лист | Підпис | № докум | Дата | | |

Розділ 4. ПРОБЛЕМИ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ВИКОРИСТАННЯ У ЯКОСТІ ДЖЕРЕЛ ОПРОМІНЕННЯ РАДІОАКТИВНИХ ВІДХОДІВ

4.1. Класифікація радіоактивних відходів за небезпекою

У процесі виробничої діяльності ЯПЦ України утворюються різні види РАВ (рис. 4.1, 4.2), їх номенклатура [6] розміщена в табл. 4.1.

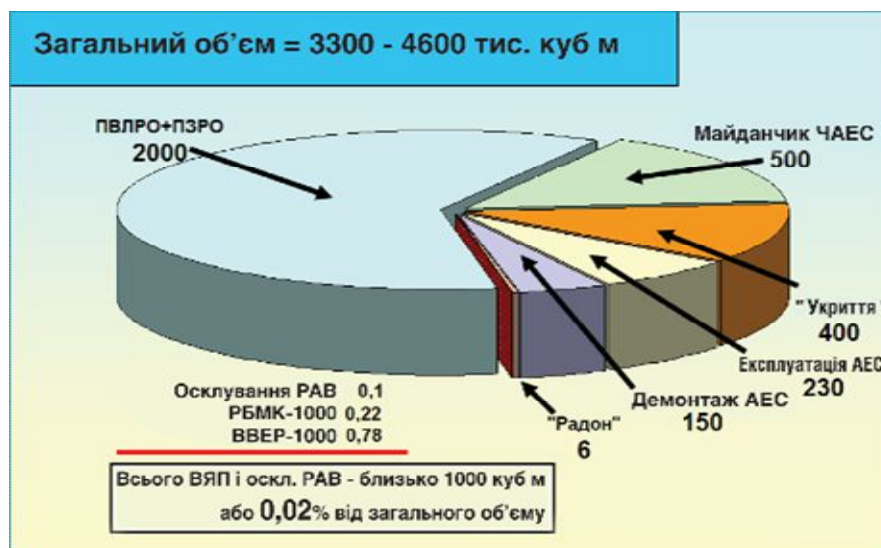


Рис.4.1. Дані накопичення РАВ на Україні з урахуванням джерел їх утворення

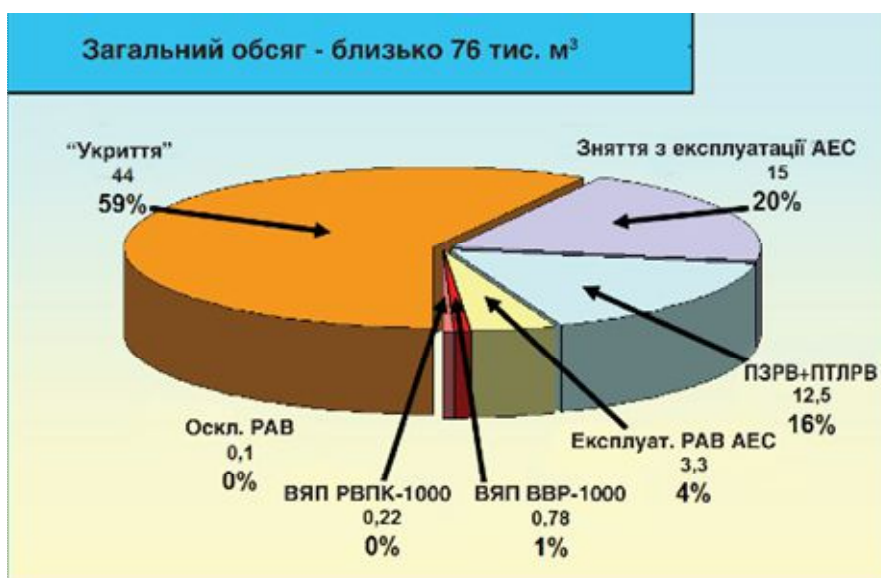


Рис.4.2. Дані про оцінку обсягів довгоіснуючих РАВ в Україні

Таблиця 4.1

| | | | | | | |
|----|------|--------|---------|------|--|------|
| | | | | | НУЦЗУ. 2.16-47.СХ та ХТ. РПЗ-02 | Лист |
| Зм | Лист | Підпис | № докум | Дата | | 64 |

Перелік РАВ України за технологією отримання

| Процеси | Види РАВ | |
|--|--|--|
| | Рідкі | Тверді |
| 1. Підприємства ЯПЦ 1.1. Видобуток та збагачення уранової руди | Шахтні води, маточні розчини | Відходи споживання, хвости вилюговування |
| 1.2. Збагачення урану, вироблення ТВЕЛів | Маточні розчини, промислові води | Відходи споживання, залишки переробки |
| 1.3. Технологічний цикл АЕС | Промислові та контурні води, розчини дезактивації, регенераторів, пульпа | Фільтри, обладнання, одяг, ізоляційні матеріали, обладнання першого контуру |
| 1.4. Радіохімічні технології підприємств ЯПЦ | Води – спецпралень, промислові, санпропускників, розчини дезактивації, регенераторів, розчини «хвостів», пульпа | Фільтри, обладнання, одяг, оболонки ТВЕЛів |
| 1.5. Вивід об'єкту ядерних технологій з використання, утилізація елементів | Води санпропускників і спецпралень, промислові води, контурні води, розчини дезактивації, регенератори, пульпа | Одяг, засоби інд. захисту, обладнання, ізоляція, кабельна продукція, будівельне сміття, облицювання, обладнання першого контуру, деталі реактора |
| 2. Відновлення територій, забруднених внаслідок експлуатації об'єктів або аварійних ситуацій | | |
| 2.1. Радіоактивно забруднені території. Об'єкт «Укриття» | Вода, мул охолоджувачів і накопичувачів; забруднені ґрунти і підземні води, води басейнів витримки, гідроокиснювальні пульпи басейнів-сховищ | Радіоактивно забруднений ґрунт, тверді РАВ, відходи дезактивації сховищ |

Утворення РАВ потребує спеціальних методів їх подальшого обертання та утилізації, для чого створюється науково обґрунтована нормативна база, в основу якої покладено рекомендації Міжнародної комісії з радіологічного захисту (МКРЗ) та Міжнародного агентства з атомної енергії (МАГАТЕ). У табл. 4.2–4.5 наведено класифікацію РАВ, що застосовується в Україні.

РАВ поділяють на типи за критерієм, що встановлює можливість їх короткочасного або тривалого зберігання [46] або в поверхневих та приповерхневих сховищах або у глибоких сховищах на територіях стабільних геологічних формацій, рис.4.3. Відповідно виділяють два типи РАВ: коротко- та довгоіснуючі (див. табл. 4.2) за можливістю припинення заходів контролю через строк 300 років.

Для поводження з РАВ при їх переробці встановили показник «рівень вилучення» (питома активність РАВ, за якої ще існує небезпека для людей) - окремо для певних груп радіонуклідів. Відповідно, РАВ поділяються на чотири групи (див. табл. 4.3).

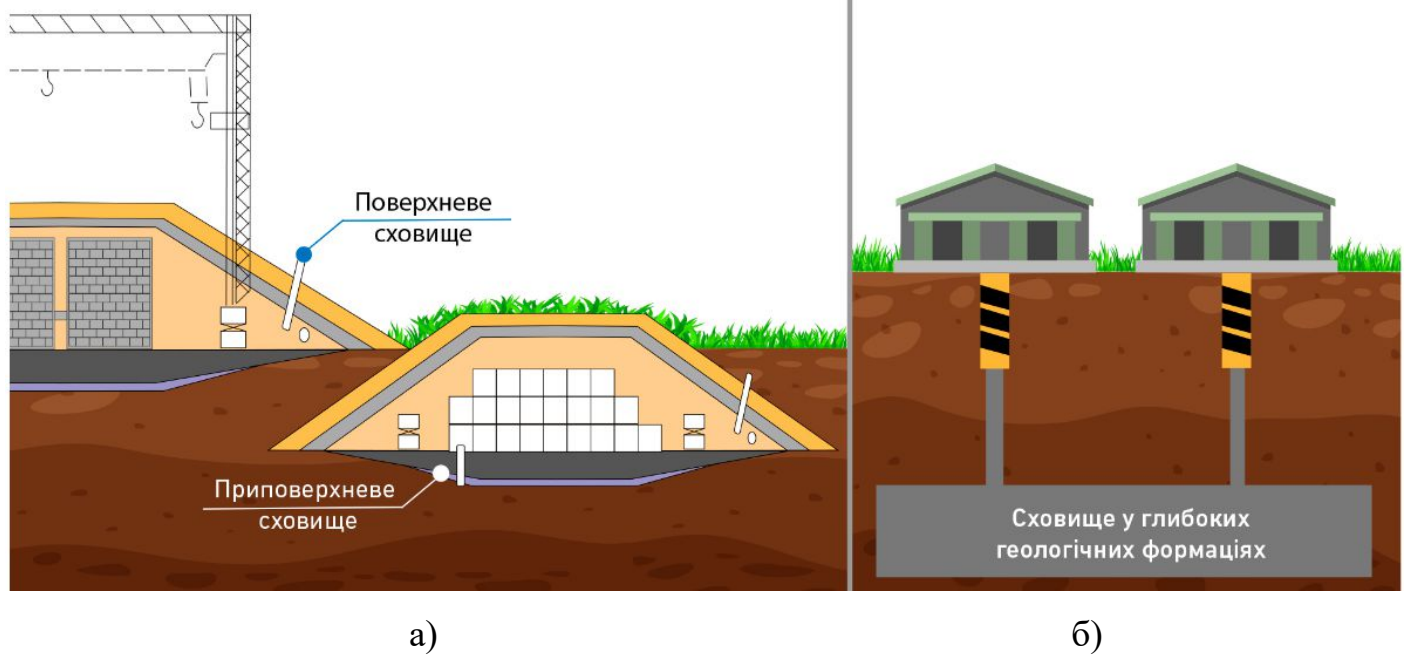


Рис.4.3. Види захоронення РАВ: а) короткоіснуючі; б) довгоіснуючі

Для γ -випромінюючих РАВ, питома активність яких не відома, впроваджено класифікацію активності за критерієм потужності поглиненої в повітрі дози на відстані 0,1 м від поверхні з РАВ: низько-, середньо- й високоактивні (див. табл. 4.4).

У всіх країнах, що використовують атомну енергетику та підприємства з переробки урану, збільшуються об'єми РАВ до значних показників. Суттєвим джерелом РАВ є процес переробки відпрацьованого ядерного палива (ВЯП) (так, в Росії існує 16 підприємств з переробки ВЯП), при цьому виникає низка наукових та технічних проблем, що потребують розв'язання. Ці проблеми визначаються в першу чергу радіаційною та екологічною небезпекою високоактивних відходів переробки ВЯП.

Високоактивні РАВ переробки палива та експлуатації АЕС містять радіонукліди, що утворилися в умовах ядерних реакцій: продукти поділу й трансуранові елементи (ТУЕ), джерелом яких є атоми ^{238}U . Це процес відбувається в активній зоні ядерного реактору внаслідок поглинання нейтронів з наступним β -розпадом [5]. Ці відходи створюють до 3% всіх світових РАВ, але водночас вони є носіями до 95% всієї активності світових РАВ. Велика активність РАВ призводить до значного тепловиділення, що потребує додаткових заходів при їх транспортуванні, зберіганні й похованні.

У промисловості у якості ДІВ частіше застосовують ізотопи 3-ї та 4-ї груп. Для

| | | | | | | |
|----|------|--------|---------|------|--|------|
| | | | | | НУЦЗУ. 2.16-47.СХ та ХТ. РПЗ-02 | Лист |
| | | | | | | 66 |
| Зм | Лист | Підпис | № докум | Дата | | |

цілей технологічної обробки цікаве проникне випромінювання - радіонукліди 3-ї та 4-ї груп.

Таблиця 4.2

Типи РАВ за типом їх захоронення та можливістю звільнення

| Тип РАВ | Дози потенційного опромінення через 300 років після захоронення | Можливе зняття контролю за час до 300 років після захоронення | Тип захоронення РАВ |
|----------------|---|---|---------------------------|
| Короткоіснуючі | Нижче рівня Б | Повне, обмежене | Поверхневе, приповерхневе |
| Довгоіснуючі | Вище рівня А | Не розглядається | У стабільних геоформаціях |

Примітка. Рівень А - річна доза 50 мЗв, рівень Б - 1 мЗв.

Таблиця 4.3

Групи твердих РАВ за показником «рівень вилучення»

| Група РАВ | Радіонукліди | Рівень вилучення, кБк·кг ⁻¹ |
|-----------------------------------|--|--|
| 1. Трансуранові | α-випромінюючі (Pu, Np, Am...) | 0,1 |
| 1. Доуранові | β-випромінюючі (Ra, Rn, Th...) | 1 |
| 2. Сильне проникне випромінювання | β-, γ-випромінюючі (¹³⁷ Cs, ⁶⁰ Co...) | 10 |
| 4. Слабке проникне випромінювання | ³ H, ¹⁴ C, ³⁶ Cl, ⁴⁵ Ca, ⁵³ Mn, ⁵⁹ Fe, ⁶³ Ni, ⁹³ mNb, ⁹⁹ Tc, ¹⁰⁹ Cd, ¹³⁵ Cs, ¹⁴⁷ Pm, ¹⁵¹ Sm, ¹⁷¹ Tm, ²⁰⁴ Tl | 100 |

Примітка: якщо у складі РАВ є радіонукліди однієї групи, їх питомі активності додають.

Таблиця 4.4

Категорії твердих і рідких РАВ за питомою активністю

| Категорії РАВ | Питома активність твердих РАВ, кБк·кг ⁻¹ | | | | Інтервал значень питомої активності рідких РАВ в одиницях кратності |
|-----------------|---|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|---|
| | α-радіонукліди | | β-, γ-радіонукліди | | |
| | Група 1 | Група 2 | Група 3 | Група 4 | |
| Низькоактивні | 10 ⁻¹ -10 ¹ | 10 ⁰ - 10 ² | 10 ¹ - 10 ³ | 10 ² - 10 ⁴ | 1 - 10 ² |
| Середньоактивні | 10 ¹ - 10 ⁵ | 10 ² - 10 ⁶ | 10 ³ - 10 ⁷ | 10 ⁴ - 10 ⁸ | 10 ² - 10 ⁶ |
| Високоактивні | ≥ 10 ⁵ | ≥ 10 ⁶ | ≥ 10 ⁷ | ≥ 10 ⁸ | ≥ 10 ⁶ |

Примітки: 1. Розподіл на групи 1-4 відповідає класифікації у табл.4.2.

2. Для сумішевих РАВ категорія встановлюється за більш високою компонентою.

3. Високоактивні РАВ поділяють на підкатегорії за питомим тепловиділенням у місцях тимчасового зберігання: «низькотемпературні» - до 2 кВт·м⁻³; високоактивні - більше 2 кВт·м⁻³.

Таблиця 4.5

Категорії РАВ з невідомим радіонуклідним складом і питомою активністю за критерієм потужності поглиненої в повітрі дози

| Категорія РАВ НРС | Потужність поглиненої в повітрі дози, мкГр·рік ⁻¹ |
|--------------------|--|
| Низької активності | 1 - 100 |

| | |
|----------------------|-------------|
| Середньої активності | 100 - 10000 |
| Високої активності | > 10000 |

4.2. Поводження з радіоактивними відходами

Проблема поведження з радіоактивними відходами (РАВ) є однією з найважливіших у технологіях промислового використання ядерної енергії та ДІВ. На відміну від інших видів отримання енергії, ядерна – характеризується інтенсивним накопиченням дуже шкідливих відходів (РАВ), які виникають на всіх стадіях ядерно-паливного циклу.

За кількістю РАВ, що накопичуються, діючі АЕС є одним з головних їх джерел. Радіоактивні речовини утворюються під час дії АЕС при поділі ядер U_{235} , U_{233} , Pu_{239} в активній зоні реактора, а також внаслідок активації нейтронами матеріалів, що могли опинитися поблизу від активної зони [8]. Річне питоме утворення РАВ, залежно від потужності та типу реакторної установки, за рік становить $0,15 - 0,35 \text{ м}^3$ рідких та $0,1 - 0,3 \text{ м}^3$ – твердих РАВ на 1 МВт.

РАВ – це усі вироби та речовини, активність радіонуклідів яких перевищує рівні, встановлені діючими нормами, крім випадків, коли планується їх подальше застосування. Небезпечність РАВ визначається можливістю поширення радіонуклідів в біосфері та викликати негативний радіаційний вплив на людину та довкілля.

РАВ – поділяють за різними показниками: агрегатним станом, періодом напіврозпаду, питомою активністю, складом випромінювання і т.д.

За агрегатним станом найбільші об'єми утворюються рідкіші РАВ, які є продуктами технологічних етапів виробничого циклу АЕС, а також – радіохімічних заводів та дослідних центрів.

На всіх етапах ЯПЦ накопичуються значні кількості твердих РАВ. Так, в реакторі АЕС потужністю 1 ГВт за рік утворюються $300-500 \text{ м}^3$ твердих РАВ, від переробки опроміненого палива ще 10 м^3 високоактивних РАВ, 40 м^3 – це РАВ середньої активності, 130 м^3 – низької активності [7].

Під час роботи АЕС утворюються три групи РАВ: газоаерозольні, рідкі та тверді, що потребує їх знешкодження. З огляду на ступінь небезпеки РАВ для людей та довкілля, є потреба у жорстких заходах підвищеної уваги: проводити збирання й

| | | | | | | |
|----|------|--------|---------|------|--|------|
| | | | | | НУЦЗУ. 2.16-47.СХ та ХТ. РПЗ-02 | Лист |
| | | | | | | 68 |
| Зм | Лист | Підпис | № докум | Дата | | |

надійну ізоляцію РАВ з урахуванням особливостей різних радіонуклідів, їх фізико-хімічних та біологічних властивостей.

Поводження з газоподібними РАВ зводиться до їх викиду після очищення та розсіювання в довкіллі [21], за умови, що такі кількості не підвищують радіаційний фон довкілля вище національних та міжнародних нормативних вимог.

Поводження з рідкими РАВ на АЕС пов'язане з особливостями технологічного процесу та не передбаченими цим процесом утворенням рідких середовищ, це:

- кубовий залишок переробки трапних вод, вод випарних установках спецводоочищення;
- відпрацьовані сорбенти з фільтрів установок спецводоочищення у разі вичерпання ресурсу іонообмінного матеріалу та інші фільтрувальні матеріали;
- шлами та пульпи; • відпрацьовані мастила та змішані рідини.

Перед переробкою рідких РАВ збирають у баки для тимчасового зберігання та витримування. Кубовий залишок, фільтрувальні матеріали разом із шлами та мастильні матеріали зберігаються окремо. Відпрацьовані фільтрувальні матеріали, сорбенти системою гідротранспорту подаються в резервуари, де зберігаються під шаром води.

Схема переробки первинних рідких відходів на АЕС з реакторами типу ВВЕР містить випарні апарати спецводоочищення та вузол реагентів. Після упарювання первинних рідких радіоактивних середовищ на установках спецводоочищення одержують кубовий залишок, який містить нерозчинні й розчинні солі натрію, заліза, магнію, кальцію тощо.

У процесі переробки радіоактивні та інші хімічні речовини виділяють з відходів, а очищену воду повертають у технологічний процес.

Для переробки рідких відходів використовують *термічний, сорбційний та мембранні методи.*

Термічний метод – дистиляція (упарювання) у випарних апаратах більш поширений та зручний спосіб переробки рідких відходів.

Сорбційний метод передбачає відокремлення радіонуклідів з рідких відходів у вигляді твердого стану шляхом адсорбції, іонного обміну, адгезії з використанням насипних або намивних фільтрів з іонообмінними смолами спеціального призначення. Але оскільки сорбція характеризується вибірковістю до окремих радіонуклідів, то цей

| | | | | | | |
|----|------|--------|---------|------|--|------|
| | | | | | НУЦЗУ. 2.16-47.СХ та ХТ. РПЗ-02 | Лист |
| | | | | | | 69 |
| Зм | Лист | Підпис | № докум | Дата | | |

спосіб очищення є додатковим.

Мембранні методи – дозволяють відокремлювати радіоактивні речовини з РАВ на молекулярному рівні (зворотний осмос, електродіаліз, ультрафільтрація).

Існує широка номенклатура радіоактивних компонент РАВ, а також нерадіоактивних домішок у їх складі, наприклад, аміаку, масел, тому усі згадані способи очищення самостійно не забезпечують знезараження рідких відходів до необхідного рівня. Відповідно процес очищення становить певну послідовність означених способів очищення, після чого утворюється два продукти: високоактивний концентрат, що підлягає подальшому ствердненню та захороненню, і очищена вода, що відповідає вимогам до якості води для повторного оборотного застосування на АЕС або для скидання у водойми.

Високо активний концентрат, продукт очищення рідких відходів, це шлаки після фільтрації й хімічної обробки, відпрацьовані іонообмінні смоли, кубові залишки після упарювання, які піддають *ствердінню* методами включення у зв'язувальні матеріали (термопластичні (бітум та ін.); терморезистивні (смоли поліефірні, карбамідні тощо); неорганічні (цемент, гіпс, скло і т.д.): бітумування, цементування, полімеризації та ін.

На даний час одним з найдоцільніших способів ствердіння рідких високоактивних РАВ визнане *оскльовання*. Спосіб оскльовання відходів забезпечує розкладання значної кількості хімічних сполук, що входять до складу відходів; тим самим усувається необхідність враховувати їхній шкідливий вплив при захороненні і значно скорочується об'єм у порівнянні з бітумуванням (у 2-4 рази) і цементуванням (у 10 разів). Більшою міцністю та хімічною стійкістю характеризується склокераміка.

Поводження з твердими РАВ. Основним джерелом утворення твердих РАВ у процесі експлуатації АЕС є технічне обслуговування й ремонт енергоблоків.

При здійсненні ремонтних робіт на устаткуванні АЕС радіоактивними стають частини або деталі заміненого устаткування й трубопроводів, інструмент, що застосовувався в роботах, електро- і теплоізоляційні матеріали, одяг, протиральне ганчір'я.

Система поведження з твердими РАВ на АЕС містить: збирання відходів у первинну тару на місцях їх утворення; сортування за активністю; транспортування до централізованих місць збору чи переробки; переробку; пакування первинної тари з

| | | | | | | |
|----|------|--------|---------|------|--|------|
| | | | | | НУЦЗУ. 2.16-47.СХ та ХТ. РПЗ-02 | Лист |
| | | | | | | 70 |
| Зм | Лист | Підпис | № докум | Дата | | |

твердими РАВ у транспортні контейнери; транспортування контейнерів із твердими РАВ до сховища ТРВ на спецавтомобілях; приймання відходів та їх вивантаження до секцій сховища; ведення обліку та звітності щодо РАВ. Усі тверді РАВ на АЕС збирають у спеціальних приміщеннях, сортують, переробляють з метою зменшення їх габаритів.

Тверді РАВ після переробки зберігають у спеціальних сховищах для твердих РАВ на території АЕС. Сховища твердих РАВ – це заглиблені у ґрунт бетоновані ємності, гідроізольовані від підземних і атмосферних вод. Їх тримають під суворим дозиметричним контролем за допомогою свердловин навкруги для проведення періодичних аналізів, з яких беруть проби води на наявність радіоактивних забруднень. Таке зберігання враховує можливість забрати РАВ для їх переробки або подальшого транспортування.

Встановлені нормативи поводження з РАВ передбачають їх сортування на етапі збирання за максимально можливою кількістю параметрів, з урахуванням вимог подальших етапів поводження з РАВ (тимчасове зберігання, переробка, кондиціонування і захоронення). Такими параметрами виступають: радіаційні властивості РАВ; можливість спалювання, пресування; доцільність дезактивації; необхідність фрагментації.

До операцій *попередньої обробки* належать дезактивація, збирання і сортування РАВ, підпресування, фрагментування, сушіння з метою зменшення об'ємів РАВ, переведення їх з більш високої групи в нижчу, покращення умов радіаційного захисту персоналу, населення та навколишнього середовища. Дезактивацією поверхонь устаткування від радіоактивного забруднення проводять за допомогою промивання, нагрівання, хімічних та електрохімічних процесів, механічного й інших видів очищення.

Метою переробки твердих РАВ обрано: підвищення безпеки на подальших етапах поводження з ними, зменшення негативного впливу на довкілля, економічність зберігання та поховання твердих РАВ.

Метою **механічної переробки** твердих РАВ прийнято: зменшення їх об'єму для пакування при транспортуванні, зберіганні, захороненні або перед наступною переробкою (*демонтаж, розпилювання, розрізування і дроблення*). Пресування РАВ є одним з найпродуктивніших методів зменшення об'єму відходів (преси низького тиску

| | | | | | | |
|----|------|--------|---------|------|--|------|
| | | | | | НУЦЗУ. 2.16-47.СХ та ХТ. РПЗ-02 | Лист |
| | | | | | | 71 |
| Зм | Лист | Підпис | № докум | Дата | | |

< 10 МН – для пластику, паперу, гуми й текстилю; суперпресування – тиском >10 МН). Спресовані «брикети» пакують в циліндричні або прямокутні контейнери.

Термічна переробка РАВ - це окисні і піролітичні технології. *Спалювання* – переробка середньоактивних РАВ є складнішою, ніж переробка низькоактивних через необхідність використання захисних екранів й дистанційної техніки. Методи хімічної переробки РАВ поділяють на дві категорії: сире окиснення (не дає великої кількості газів); хімічне окиснення (перманганатами, діхроматами, гіпохлоридами, персульфатами, пероксидами, система з азотною або сірчаною кислотами.). Технологія зменшення їх об'ємів спалюванням широко визнана, ефективна і безпечна.

Кондиціювання – **отримання** стану, що підходить до транспортування, тривалого зберігання або захоронення (оскльування, плавлення, цементування і бітумування).

Після переробки рідких та твердих РАВ утворюється продукт, який можна розглядати для використання у технологіях опромінення.

4.3. Зберігання радіоактивних відходів

Загальні РАВ від АЕС водночас з продуктами поділу ядерного палива містять відходи переробки палива, активовані продукти корозії оболонок палива та обладнання, реагенти, передбачені хіміко-технологічними процесами та трансуранові елементи (ТУЕ) – ізотопи урану, плутонію, нептунію, америцію.

Наявність ТУЕ у РАВ значно поскладнює проблему їх безпечного поховання, оскільки вони характеризуються великими періодами напіврозпаду та мають високу радіоактивність, що вимагає їх ізоляції на терміни понад 10^4 років. Таку небезпеку ТУЕ можна знизити шляхом перетворення у відносно короткоживучі продукти поділу внаслідок їх нейтронного опромінення в реакторах на швидких нейтронах або на лінійних прискорювачах заряджених часток. Але на даний час такі технології ще залишаються економічно не вигідними, тому не застосовуються у промислових масштабах [7].

Існує стратегія поводження з радіоактивними відходами в Україні [49]. Країни з розвиненою ядерною енергетикою дотримуються різних підходів до захоронення й переробки ВЯП та РАВ:

| | | | | | | |
|----|------|--------|---------|------|--|------|
| | | | | | НУЦЗУ. 2.16-47.СХ та ХТ. РПЗ-02 | Лист |
| | | | | | | 72 |
| Зм | Лист | Підпис | № докум | Дата | | |

- Стабілізація – фіксація радіонуклідів у нерозчинних матрицях для тривалого зберігання (Великобританія, Франція та Японія).
- Поховання – як і для високоактивних відходів: витримка ВЯП певний час, наступне поховання в глибоких та стійких геологічних формаціях (США, Фінляндія, Швеція).
- Відкладене рішення – довгострокове зберігання ВЯП з можливістю їх подальшої переробки або використання через певний час за умови появи нових ефективних технологій або зміна економічних факторів, що зробить таку переробку доцільною (Аргентина, Данія, Іспанія, Канада, Литва, Німеччина, Норвегія, Південна Корея, Польща, Словаччина, Угорщина, Чехія, Хорватія, Україна).
- Сучасна переробка ВЯП для отримання з нього речовин, використання яких економічно доцільне (Росія).

Тобто проблема поводження з відпрацьованим ядерним паливом АЕС і високоактивними відходами залишається дискусійною. Багато фахівців вважають, що ВЯП не можна розглядати в якості радіоактивних відходів, а слід використовувати як енергетичну сировину для реакторів інших типів, які поки не знайшли комерційного застосування. Саме відкладене рішення дозволяє розглядати РАВ як потенційні ДІВ.

На Україні відокремлена спеціалізована діяльність поводження з РАВ, що утворюються при використанні ДІВ у медицині, науці, інших галузях промисловості. Така діяльність здійснюється у межах міжобласних спеціалізованих комбінатів (ДМСК), що входять до складу Державної корпорації «Українське державне об'єднання «Радон» (УкрДО «Радон») [50]: існують Київський, Донецький, Одеський, Харківський, Дніпровський, Львівський ДМСК, які за ліцензією Держатомрегулювання проводять діяльність на територіях зон обслуговування, які показано на рис.4.1. Зараз Донецький ДМСК опинився на тимчасово неконтрольованій Україною території, але оскільки він не здійснював зберігання, а лише перевозив невеликі партії РАВ до Харківського або Дніпропетровського ДМСК, на час втрати контролю над ним, на його території не знаходилось РАВ, які можуть являти загрозу. ДМСК зобов'язані порводити збирання, перевезення, приймання твердих РАВ, у тому числі у вигляді відпрацьованих ДІВ, розміщення РАВ у спеціальних сховищах на промислових майданчиках ДМСК, де створено умови для безпечного зберігання РАВ та відпрацьованих ДІВ.

| | | | | | | |
|----|------|--------|---------|------|--|------|
| | | | | | НУЦЗУ. 2.16-47.СХ та ХТ. РПЗ-02 | Лист |
| | | | | | | 73 |
| Зм | Лист | Підпис | № докум | Дата | | |



Рис.4.1. Територіальний розподіл ДМСК в Україні

Таблиця 4.1. Відомості про РАВ, які зберігаються у ДМСК ДК УкрДО «Радон»

| Назва РАВ | ДМСК | Об'єм*, м ³ | Активність**, Бк |
|--|--------------|------------------------|------------------|
| Низько- та середньо-активні тверді РАВ | Київський | 2105,0 | 2,92E+15 |
| | Дніпровський | 591,5 | 5,95E+11 |
| | Одеський | 525,6 | 1,66E+13 |
| | Львівський | 698,2 | 5,69E+12 |
| | Харківський | 2122,6 | 5,93E+12 |
| Низько- та середньоактивні рідкі РАВ | Київський | 480 | 1,09E+13 |
| | Дніпровський | 124 | 1,38E+10 |
| | Одеський | 183 | 1,10E+11 |
| | Харківський | 2 | 7,96E+06 |
| Насосно-компресорні труби (РАВ), забруднені техногенно-підсиленими джерелами природного походження | Харківський | 812 | 2,72E+08 |
| Відпрацьовані закриті ДІВ у сховищах колодязного типу | Київський | 6611 | 1,39E+14 |
| | Дніпровський | 8391 | 1,02E+14 |
| | Одеський | 19312 | 5,49E+13 |
| | Львівський | 8151 | 3,84E+13 |
| | Харківський | 15348 | 8,09E+13 |
| Відпрацьовані закриті ДІВ у біозахисті | Київський | 114053 | 1,44E+15 |
| | Дніпровський | 212376 | 7,07E+14 |
| | Одеський | 38485 | 5,72E+14 |
| | Львівський | 96765 | 2,36E+14 |
| | Харківський | 93719 | 2,41E+14 |
| Відпрацьовані закриті ДІВ високої потужності (РІТЕГ) | Одеський | 15 | 1,97E+16 |

* – об'єм твердих РАВ - з урахуванням біозахисту відпрацьованих ДІВ;

** – активність - з урахуванням радіоактивного розпаду радіонуклідів.

Також, ці спеціалізовані підприємства залучаються до невідкладних дій відповідних державних структур із ліквідації аварійних ситуацій, пов'язаних з виявленням «покинутих» ДІВ або ДІВ у незаконному обігу. Означені ДІВ направляються до сховищ вказаних спеціалізованих підприємств де забезпечується їх безпечне та контрольоване зберігання необхідний період. Оскільки сховища РАВ споруджувались, вводились в експлуатацію та заповнювались ще за радянських часів, без дотримання повного обсягу сучасних вимог безпеки, наприкінці ХХ ст. було проведено перепрофілювання та переоснащення ДМСК для переходу на технологію тимчасового контейнерного зберігання РАВ. Після цього використання застарілих сховищ РАВ для зберігання РАВ та відпрацьованих ДІВ було зупинено, а на майданчиках ДМСК споруджено та використовуються тимчасові сховища ангарного типу для контейнерного зберігання РАВ відповідно до «Загальнодержавної цільової екологічної програми поводження з РАВ». Зупинені сховища було законсервовано, вони обслуговуються, проводиться моніторинг їх стану. Передбачається у наступному вилучення РАВ із зупинених сховищ та їх перепоховання в централізованих сховищах на майданчику комплексу «Вектор» у зоні відчуження. Це дозволить ліквідувати старі місця поховання РАВ та пов'язану з їх існуванням потенційну небезпеку розповсюдження радіонуклідів у довкілля.

ДМСК в межах діючих ліцензій здійснюють експлуатацію станцій дезактивації білизни, спецодягу і засобів індивідуального захисту, забруднених радіоактивними речовинами (спецпальні для медичного, робочого та іншого одягу). Водночас біля майданчиків ДМСК забезпечується радіаційно-дозиметричний контроль та моніторинг стану довкілля: проводиться вимірювання проб підземних та стічних вод, ґрунту, рослинності, атмосферних опадів, відібраних у санітарно-захисних зонах та зонах спостереження пунктів зберігання та поховання РАВ. В межах своєї діяльності, ДМСК на територіях відведених зон обслуговування залучаються до ліквідації наслідків аварій у випадках виявлення радіоактивно забруднених речовин та об'єктів, наприклад, металобрухту із наявністю радіонуклідів вище допустимих нормативів; радіаційні забруднення у побутових відходах, а також «покинутих» ДІВ. ДМСК за необхідності проводять радіаційний контроль речовин та об'єктів, збір та їх транспортування на ізоляцію у сховищах РАВ на промайданчиках ДМСК.

| | | | | | | |
|----|------|--------|---------|------|--|------|
| | | | | | НУЦЗУ. 2.16-47.СХ та ХТ. РПЗ-02 | Лист |
| | | | | | | 75 |
| Зм | Лист | Підпис | № докум | Дата | | |

Відповідно до рекомендацій місії МАГАТЕ «Комплексний огляд регулюючої діяльності (IRRS)» дози, які отримує персонал повинні перебувати в межах: 1-4 мЗв/рік [65].

4.4. Сучасний стан поводження з РАВ на Україні

На Запорізькій АЕС використовуються наступні установки з переробки РАВ: 2 установки глибокого упарювання для переробки кубового залишку; установки спалювання, пресування твердих РАВ (для низькоактивних РАВ); та вводиться в експлуатацію у складі комплексу установка сортування твердих РАВ (для низькоактивних РАВ).

На Рівненській АЕС експлуатуються наступні установки з переробки РАВ [47]:

- установки центрифугування (переробка трапних вод) та глибокого упарювання (переробка кубового залишку).

Здійснюється розробка комплексу з переробки твердих радіоактивних відходів, що складається з установок вилучення; фрагментації та сортування; суперпресування; системи радіаційного контролю.

На РАЕС та ЗАЕС проходять комплексні приймальні випробування (поки що на імітаторах РАВ), за результатами яких буде прийматися рішення про введення об'єктів у дослідну експлуатацію.

На Хмельницькій АЕС використовуються наступні установки з переробки РАВ:

- установка глибокого упарювання (переробка кубового залишку); установка спалювання радіоактивної оливи; установка центрифугування (переробка трапних вод).

На Южно-Українській АЕС працює лише установка пресування твердих низькоактивних РАВ.

На Україні ВЯП та високоактивні відходи довгий час вивозилися і на даний час вивозяться для переробки на заводи в Росію. На даний час поширюється практика створення на проммайданчику АЕС сухих сховищ високоактивних відходів (рис. 4.2) або витримується ВЯП в окремо влаштованих сховищах, де за час тимчасового зберігання воно значно втрачає свою активність.

| | | | | | |
|----|------|--------|---------|------|------|
| | | | | | Лист |
| | | | | | |
| Зм | Лист | Підпис | № докум | Дата | 76 |



а)



б)

Рис.4.2. Контейнери для сухого зберігання ВЯП:

а) сухі сховища Запорізької АЕС; б) доставка контейнерів з ВЯП у зону зберігання

Такі сховища для зберігання ВЯП влаштовано на Запорізькій АЕС. Планується створення централізованого сховища ВЯП для інших діючих АЕС. Стратегічно такий шлях (сухі сховища) розглядається і для подальшого розвитку атомної енергетики. Максимальний планований строк експлуатації централізованого сховища ВЯП – до 100 років. При цьому обов'язковою умовою є створення системи радіоекологічного моніторингу і контролю зони впливу сховища.

В Україні регламентується поведження з радіоактивними матеріалами, поведження з РАВ підпадає під дію наступних законів України: «Про використання ядерної енергії та радіаційну безпеку» [1], «Про захист людини від впливу іонізуючого випромінювання» [119], «Про видобування і переробку уранових руд» [67], «Про поведження з радіоактивними відходами» [18], «Про Загальнодержавну цільову екологічну програму поведження з радіоактивними відходами» [48].

4.5. Можливість використання радіаційних відходів для технологій опромінення

Сучасний світовий рівень поведження з відпрацьованим ядерним паливом АЕС та високоактивними відходами свідчить, що ця проблема є дискусійною. Тому, виходячи з широкого впровадження радіаційних технологій та ще більших перспектив їх використання можна запропонувати задіяння радіаційних відходів для корисного використання. При цьому радіоактивні відходи перейдуть у інший клас речовин, а саме – стануть джерелом іонізуючого випромінювання. Основана маса радіоактивних відходів до повторного використання у якості ДІВ – не доступна, оскільки працює

договір з Росією, за яким вона забирає ВЯП (відпрацьоване ядерне паливо).

Тому до доступних РАВ можна віднести усі інші рідкі та тверді відходи, які на даний час зберігаються на майданчиках ДМСК, а це – тисячі метрів кубічних радіоактивних речовин. Відомо, що серед 500 тис. ДІВ в Україні, більше 450 тис. шт. вже виведені з експлуатації, знаходяться на зберіганні в державних підприємствах по поводженню з радіоактивними відходами та обліковуються в Державному реєстрі радіоактивних відходів. Тобто на даний момент навіть їх можна зарахувати у якості радіаційних відходів, які можна використовувати у певних технологіях опромінення.

До радіоактивних відходів можна також віднести паразитне випромінювання об'єктів атомної енергетики, при контакті з якими можна організувати технології опромінення.

Традиційне компонування джерел іонізуючого випромінювання – їх розташування в екрануючу капсулу з можливістю направленою впливу на певний об'єкт.

Головним іонізуючим фактором радіаційних відходів є γ -випромінювання, тому саме на дію цього впливу можна розраховувати для технологічного впровадження.

Для організації використання типових РАВ – їх необхідно розташувати у екранованих контейнерах з можливістю направленою опромінення за відомою технологією, див. табл. 4.2, та рис.4.3. Надалі такий РАВ переходить у категорію ДІВ та підлягає нормативній базі його використання. На даний час існують типові установки, у які можна завантажити РАВ. Вони мають потужність обробки до 3000 т на рік, заряд ізотопу до 110 ПБк (примечание – це 3 млн Кю), енергію випромінювання до 10 МеВ, випромінюючу поверхню до 3 м², що потребує захисту бетону шаром до 2 м. Ємність з керованою висотою РАВ опускають в басейн, над яким працює конвеєр. Після доби відстоювання продукцію направляють споживачу. Використання РАВ знижує собівартість продукції, має високу надійність та низьку складність, але є висока та постійна радіаційна небезпека технології.

Таблиця 4.2

Типові установки опромінення продуктів, які можна завантажити РАВ

| Показник | Установка | | |
|--------------------|-----------|---------|--------|
| | «Пінцет» | «Парча» | «Марш» |
| Заряд ізотопу, ПБк | 8 | 35 | 28 |

| | | | | | |
|----|------|--------|---------|------|------|
| | | | | | Лист |
| | | | | | |
| Зм | Лист | Підпис | № докум | Дата | 78 |

| | | | |
|------------------------------------|---------|-----------|---------|
| Розміри пороміювача, м | 2,2×1,1 | 2,45×1,15 | 2,3×1,2 |
| Потужність виробництва, т/рік | 600 | 2900 | 2900 |
| Площа розташування, м ² | 310 | 310 | 310 |
| Шар захисту: бетон/сталь, см | 165/55 | 190/65 | 175/60 |

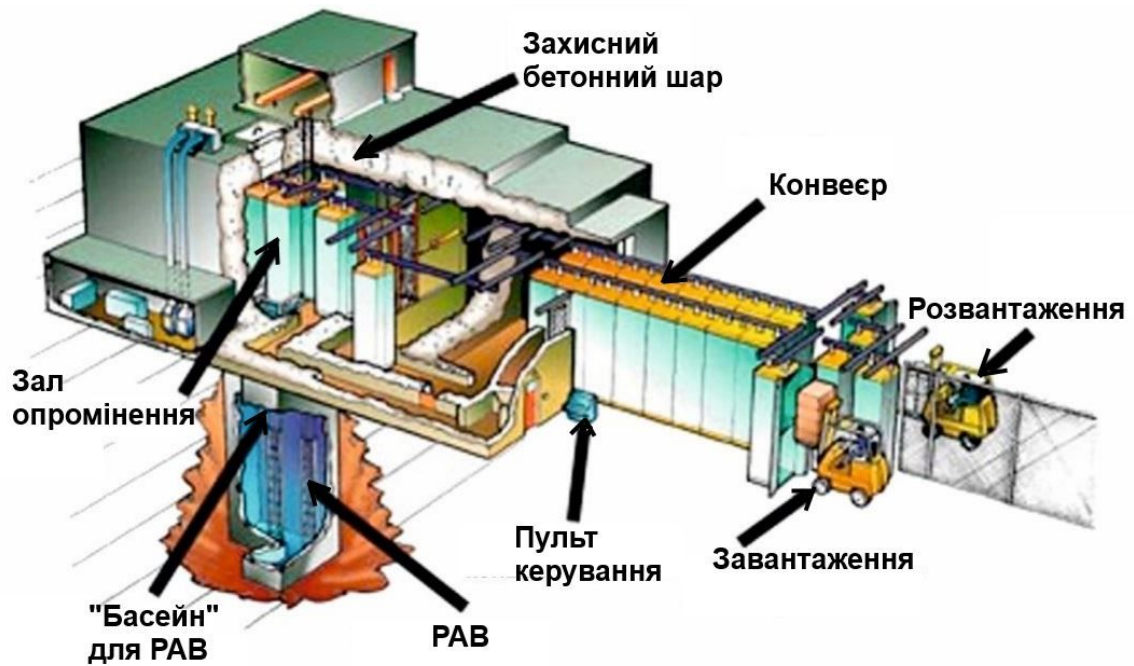


Рис. 4.3. Принципова технологічна схема обробки харчових продуктів шляхом дії РАВ

Розділ 5. ОХОРОНА ПРАЦІ

5.1. Загальні засади охорони праці при поводженні з РАВ

Зі зростанням обсягів застосування атомної енергетики у світовій енергетиці зростає відповідна частка впливу іонізуючого випромінювання на населення Землі внаслідок потрапляння радіонуклідів у довкілля [11, 12, 15]. Відповідно, подальший розвиток атомної енергетики потребує різнопланового підвищення рівня її безпеки і посилення міжнародного співробітництва для впровадження у практику розроблених стандартів, а також формування критичного ставлення до технологічних систем і елементів ядерних технологій, що характеризуються недостатньою надійністю.

На виробництві організацію охорони праці необхідно реалізовувати відповідно до Закону України «Про охорону праці» [68]. На підставі зазначених документів на підприємствах, що використовують ДІВ або атомну енергетику, розроблено інструкції з техніки безпеки для задіяних професій за положенням про розробку інструкцій з охорони праці. Керівники підприємства та його структурних підрозділів повинні забезпечити періодичне навчання робітників правилам безпеки праці. Усі працівники під час вступу на посаду та під час роботи повинні проходити навчання, інструктажі і перевірку знань з питань охорони праці, радіаційної та пожежної безпеки у відповідності з затвердженими керівником підприємства нормативними актами згідно з «Типовим положенням про навчання, інструктаж і перевірку знань працівників з питань охорони праці», «Типовим положенням про спеціальне навчання, інструктажі та перевірку знань з питань пожежної безпеки на підприємствах, в установах та організаціях України». Реалізуються умови запобігання професійним захворюванням [43, 53]. На підприємстві повинно бути забезпечено достатню наявність санітарного одягу та взуття, спецодягу і спецвзуття та засобів індивідуального захисту. Для забезпечення безпечних умов праці приміщення повинні мати необхідні площу, висоту, освітленість, вентиляцію; сходи, драбини, площадки - обмежені поручнями. Частина обладнання, що рухається, оснащують сітчастим або суцільним огороженням, гарячі поверхні апаратів, трубопроводів і баків термоізолюють, джерела радіаційного випромінювання ізолюють відповідним шляхом та використовують захист відстанню та часом перебування. Машина, транспортери й

| | | | | | | |
|----|------|--------|---------|------|--|------|
| | | | | | НУЦЗУ. 2.16-47.СХ та ХТ. РПЗ-02 | Лист |
| Зм | Лист | Підпис | № докум | Дата | | 80 |

огородження повинні бути оснащені механічним та електричним блокуванням, бути заземлені, а також мати сигналізацію, яка на початку-кінці роботи апарату автоматично вмикається. Між обладнанням повинні бути відстані, що надають можливість безпечного обслуговування і ремонту. Важливий момент в охороні праці це забезпечення цільності ізоляції електромереж від руйнування та вологи. На вологих ділянках можливо використовувати лише низьковольтну напругу. Загальним несприятливим впливом на людину у разі використання засобів радіаційної обробки іонізуюче випромінювання відповідного типу. На робочих місцях біля печей та іншого тепловипромінюючого обладнання необхідна наявність місцевої вентиляції. У аерозолеопасних виробництвах необхідно встановлювати засоби уловлювання пилу, забезпечена герметизація і максимальне ущільнення стиків і з'єднань у технологічному обладнанні, шнеках, трубопроводах для попередження утворення відкладень пилу, обладнання необхідно заземлювати. Джерела світла і світильники повинні забезпечити необхідну освітленість робочих місць. Мають бути впроваджені заходи для забезпечення загально-обмінну та місцеву вентиляцію, яка створила б комфортні параметри мікроклімату у виробничих приміщеннях у холодну і теплу пори року [68].

У залежності від величини мінімально значущої активності (МЗА) на робочому місці (МЗА) радіонукліди підрозділяють на чотири групи радіаційної небезпеки за мінімально значущою активністю на робочому місці [13]: група А - 1 кБк; група Б - 10 кБк; група В - 100 кБк; група Г - 1000 кБк (і більше); короткоіснуючі радіонукліди з періодом напіврозпаду менше 24 годин належать до групи Г. Усі роботи з використання відкритих джерел іонізуючого випромінювання поділяють на три класи. Клас відповідної роботи встановлюється установами та закладами державної санітарно-епідеміологічної служби МОЗ України відповідно до класифікації, табл.5.1.

Таблиця 5.1

Класи робіт під час відкритого контакту з радіоактивними речовинами

| Група радіаційної небезпеки | МЗА, кБк | Активність на робочому місці, кБк | | |
|-----------------------------|----------|-----------------------------------|---------------|--------------|
| | | клас робіт | | |
| | | I | II | III |
| А | 1 | $>10^5$ | $100 - 10^5$ | 1 - 100 |
| Б | 10 | $>10^6$ | $10^3 - 10^6$ | 10 - 10^3 |
| В | 100 | $>10^7$ | $10^4 - 10^7$ | 100 - 10^4 |

| | | | | |
|---|-------|------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|
| Г | >1000 | >10 ⁸ | 10 ⁵ - 10 ⁸ | 10 ³ - 10 ⁵ |
|---|-------|------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|

5.2. Аналіз ймовірної аварійної ситуації з розгерметизацією контейнера з РАВ

Під радіаційною обстановкою за умови виникнення аварій з розгерметизацією контейнера з РАВ розуміють можливість утворення та ступінь радіоактивного забруднення місцевості й атмосфери, що впливають на життєдіяльність людей та заходи безпеки при проведенні аварійно-рятувальних або невідкладних відновлювальних робіт.

Прогнозування і оцінка радіаційної обстановки містить розв'язання наступних задач: визначення напрямку осі сліду хмари поширення викиду радіоактивних речовин, внаслідок аварії або руйнування контейнера з РАВ, за методиками; визначення розмірів зон забруднення місцевості, які розмежовуються за очікуваними значеннями доз опромінювання мешканців; визначення потужності дози γ -випромінювання на осі сліду; визначення доз інгаляційного опромінювання людей, що знаходяться на сліду, за час проходження хмари; визначення концентрації радіоактивного йоду-131 в атмосфері повітря за час проходження радіоактивної хмари; визначення можливих радіаційних уражень людей, що знаходяться на забрудненій території; визначення допустимого рівня знаходження населення в зонах радіаційного забруднення [55]. Прогнозування радіаційної обстановки проводиться для можливості оперативного оповіщення у разі НС [10].

Дані задачі можна вирішувати розрахунковим шляхом з наступним уточненням за даними фактичних вимірювань на забрудненій місцевості в межах радіаційної розвідки або за результатами автоматичного моніторингу радіаційної обстановки з використанням методики «прогнозування наслідків вилливу (викиду) небезпечних хімічних речовин при аваріях на промислових об'єктах і транспорті».

Вихідними даними для прогнозування і оцінки радіаційної обстановки є: координати місця розташування контейнера РАВ; час початку викиду радіоактивних речовин в повітря; напрям вітру і його швидкість на висоті флюгеру (10 м); клас стійкості атмосфери; загальна хмарність, висота хмари і вид хмарності; прогноз зміни метеорологічних даних на ближчі 12 годин після аварії.

Для розрахунку можливої аварії з розгерметизації сховища РАВ ми обрали

| | | | | | | |
|----|------|--------|---------|------|--|------|
| | | | | | НУЦЗУ. 2.16-47.СХ та ХТ. РПЗ-02 | Лист |
| | | | | | | 82 |
| Зм | Лист | Підпис | № докум | Дата | | |

категорію стійкості атмосфери-А, сильно нестійка (конвекція), швидкість вітру - 2 м/с, вихід активності - 3% (за методикою для реакторів). Проаналізовано найнебезпечніший варіант аварійної ситуації з розгерметизацією контейнера з РАВ та викидом аерозольної хмари.

В таблиці 5.2 наведено результат розрахунку зон забруднення за вище викладеною методикою для аварії з викидом радіоактивних речовин:

Таблиця 5.2

Розміри прогнозованих зон забруднення місцевості на сліду хмари при аварії

| Вихід активності, % | Індекс зони | Тип реактора | | | | | |
|---------------------|-------------|--------------|-------|--------------------|-----------|-------|--------------------|
| | | РВПК-1000 | | | ВВЕР-1000 | | |
| | | L, км | D, км | S, км ² | L, км | D, км | S, км ² |
| 3 | М | 62,5 | 12,1 | 595 | 82,5 | 16,2 | 1050 |
| 3 | А | 14,1 | 2,75 | 30,4 | 13,0 | 2,22 | 22,7 |

Також було визначено дози опромінювання, які отримає людина при відкритому розташуванні в зоні забруднення на 1 та 9 год після аварії. На межі зони забруднення А: доза опромінювання, яку отримає людина при відкритому розташуванні протягом 1 год після аварії - 0,4 бер; доза опромінювання, яку отримає людина при відкритому розташуванні протягом 9 год після аварії - 8,5 бер. На межі зони забруднення М: доза опромінювання, яку отримає людина при відкритому розташуванні протягом 1 год після аварії - 0,1 бер; доза опромінювання, яку отримає людина при відкритому розташуванні протягом 9 год після аварії - 3 бер. Звертаємо увагу, що **потужність дози** випромінювання у середовищі постійного перебування людини не повинна перебільшувати 0,3 мбер/год.

Згідно вимог НРБУ–98 річна допустима доза 20 мЗв/рік [2].

Визначення припустимого часу роботи о/с.

1. Потужність опромінення складає (за показниками дозиметра ДП-5В) $P = 10 \text{ Р/год}$. Потрібно встановити припустимий час роботи, якщо припустима доза становить $D = 10 \text{ бер}$. $T_p = D / P = 10 / 10 = 1 \text{ год} = 60 \text{ хв}$.

2. Потужність опромінення складає (за показниками дозиметра–радіометра МКСУ, «Терра») становить $P = 0,05 \text{ Зв/год}$. Потрібно встановити припустимий час

роботи, якщо припустима доза становить $D = 0,1$ Зв. $T_p = D/P = 0,1 / 0,05 = 2$ год = 120 хв.

Таким чином знаючи потужність опромінення можна визначити припустимий час роботи. Виходячи з цього роботи по ліквідації наслідків аварій треба організувати позмінно.

5.3. Радіаційна безпека застосування радіаційних технологій

Радіаційна небезпека при виготовленні, транспортуванні, зберіганні, встановленні та експлуатації РАВ у якості ДІВ у рекомендованих режимах визначається γ -, гальмівним, рентгенівським випромінюванням; можливим радіоактивним забрудненням робочих поверхонь блоку що об лаштований ДІВ, обладнання та інше. Захисні заходи здійснюються з урахуванням впливу на людину всіх перерахованих вище видів випромінювання і спрямовані на зниження сумарної експозиційної дози випромінювання до допустимого рівня. Досягнення радіаційної безпеки досягається комплексом заходів, наприклад, санітарно-гігієнічних, інженерно-технічних та організаційних [14]. На підприємствах, що зберігають та використовують ДІВ, створюється перелік осіб, які належать до категорій А та здійснюють виготовлення, встановлення та налагодження блоку ДІВ; до категорії Б – робітники, що працюють з ДІВ та контролюють технологічні режими обробки.

Радіоізотопні прилади за ступенем радіаційної небезпеки як джерела γ -випромінювань відносять до 3 групи ДІВ, що надають на відстані 1 м від поверхні ДІВ потужність експозиційної дози більш $0,23$ мкР/с, або як джерела β -випромінювання активністю понад 50 мКи. Потужність експозиційної дози випромінювання на поверхні ДІВ не повинна бути більшою за 10 мР/год, а на відстані 1 м від поверхні РВП - $0,3$ мР/ год.

Організація роботи установки з ДІВ повинна здійснюватися в відповідності до «Санітарних правил влаштування та експлуатації радіоізотопних приладів». Підприємство, яке отримало ДІВ, має організувати зберігання блоків ДІВ в спеціально відведеному окремому приміщенні. Потужність дози випромінювання на зовнішній поверхні стін і дверях даного приміщення не повинна бути більше $0,3$ мбер/год. Вимоги до розміщення і безпечної експлуатації радіочастотних приладів для 3-ї групи ДІВ: розміщуються в місцях,

| | | | | | | |
|----|------|--------|---------|------|--|------|
| | | | | | НУЦЗУ. 2.16-47.СХ та ХТ. РПЗ-02 | Лист |
| | | | | | | 84 |
| Зм | Лист | Підпис | № докум | Дата | | |

максимально віддалених або огорожених від постійних робочих місць. При використанні ДІВ 2-й і 3-ї груп обов'язково повинні виконуватися наступні вимоги: пучок випромінювання повинен бути спрямований у бік, найбільш безпечний для робітників; установка з ДІВ повинна бути на відстані, безпечній для людей що можуть з певної причини наближуватись до установки. Час перебування персоналу на відстані менше 1 м від поверхні блока ДІВ обмежується мінімальноможливим значенням. Підприємство, яке відповідає за установку і наладку приладу з ДІВ, обов'язково здійснює дозиметричні вимірювання: на зовнішній поверхні блоку ДІВ, на відстані 1 м від поверхні блоку ДІВ і на робочих місцях, близьких до місця установки. Кімната управління повинна мати природне освітлення.

Загальний контроль потужності дози іонізуючого випромінювання здійснюється за допомогою рентгенометрів [13]. Вони призначені для оцінки радіаційного стану, перевірки надійності засобів захисту від фотонного випромінювання і надійності зберігання γ -випромінюючих ізотопів, які при взаємодії з матеріалами захисних контейнерів, утворюють гальмівне випромінювання, наприклад ^{90}Sr . Рентгенометри різних марок складаються з лічильника випромінювання з іонізаційною камерою, газорозрядний або сцинтиляційний лічильник, посилювач і нормалізатор імпульсів струму. Вихідними пристроями є стрілочні прилади, декатрони, рідкі кристали, що видають цифрову індикацію та ін. Рентгенометри можуть мати звукову сигналізацію, що вмикається за умови досягнення встановленого порогу. Шкала цих приладів відградуєвана в одиницях потужності експозиційної дози - Р/год, мР/год, мкР/год, або в одиницях еквівалентної дози фотонного випромінювання - мЗв/год, мкЗв/год.

Деякі рентгенометри, наприклад СРП-68-01, СРП-88, можуть працювати і в імпульсному режимі - реєструвати окремі імпульси. Вони мають перемикач виду робіт і подвійне позначення шкали (мкР/год або с^{-1}). Якщо прилади даного типу оснащені змінними блоками детектування, то вони стають універсальними, призначеними для рішення багатоцільових задач: вимірювання потужності дози фотонного випромінювання, ступеню забруднення поверхні активними ізотопами, вимірювання густини потоку швидких і теплових нейтронів (прилади МКС-04Н, УІМ-2-1еМ, МКС-01-Р та ін.).

Для визначення інтенсивності потоку частинок та квантів іонізуючих

| | | | | | | |
|----|------|--------|---------|------|--|------|
| | | | | | НУЦЗУ. 2.16-47.СХ та ХТ. РПЗ-02 | Лист |
| | | | | | | 85 |
| Зм | Лист | Підпис | № докум | Дата | | |

випромінювань за одиницю часу використовують радіометри. За їх допомогою визначають концентрацію радіоактивних речовин в об'єктах навколишнього середовища та біологічних речовинах, питому активність, щільність забруднення різних поверхонь радіонуклідами (КРБ-1, КРА-1, Бета, РУБ-01П6, РУГ-Р, РИ-БГ, РУГ-01М «Г» та ін.).

| | | | | | | |
|----|------|--------|---------|------|--|------|
| | | | | | НУЦЗУ. 2.16-47.СХ та ХТ. РПЗ-02 | Лист |
| | | | | | | 86 |
| Зм | Лист | Підпис | № докум | Дата | | |

ВИСНОВКИ

1. Радіаційні технології мають можливості широкого застосування у народному господарстві: у сільському господарстві, медичній галузі, для детектування будови виробів та об'єктів в аеропортах, у харчовій та хімічній промисловості. Найбільші маси речовини, що підлягають обробці, обертаються у сільському господарстві та харчовій промисловості. Відповідно, дані галузі є основними споживачами джерел іонізуючого випромінювання (ДІВ) для радіаційної обробки.
2. Іонізуюче випромінювання може мати штучне та природне походження. У якості ДІВ на практиці використовують джерела β - та фотонного випромінювання: ізотопи, наприклад збіднений уран або ^{60}Co , рентгенівське випромінювання. Типові установки містять заряд ізотопу 0,03–110 пБк (до 300000 Ки).
3. За умови застосування радіаційної обробки у народному господарстві необхідно застосовувати системи та засоби контролю режимів обробки, доз опромінення персоналу та радіаційного фону у зоні спостереження біля апарату. Для цього застосовують дозиметри, радіометри, дозкалібратори. Крім того, на організацію, що отримала ліцензію на використання ДІВ, покладається відповідальність за контроль обігу та повернення цього джерела до підприємства «РАДОН» у вигляді радіаційно-активного відходу (РАВ).
4. На даний час на Україні зберігається близько 4 млн. м³ РАВ. При їх транспортуванні або використанні необхідно враховувати ступінь їх радіаційної небезпеки на підставі законів України про охорону праці та радіаційну безпеку. Оцінка ураження територій при розгерметизації контейнера з РАВ дає розмір зони А 14,1 км та можливість роботи протягом 2 год у зоні з показаннями дозиметра-радіометра 0,05 Зв.
5. Основним джерелом РАВ в Україні є результат роботи АЕС, де утворюються рідкі та тверді відходи, які потребують переробки й зберігання з різним ступенем заходів безпеки. Ці речовини можна розташовувати у блоках випромінювання замість стандартних ДІВ. Існує варіант використання для обробки речовин наведеного випромінювання від конструкцій діючих АЕС. Для більшості напрямків практичного застосування іонізуючого випромінювання достатньо дози до 10 кГр. Технології використання РАВ знижує собівартість

| | | | | | | |
|----|------|--------|---------|------|--|------|
| | | | | | НУЦЗУ. 2.16-47.СХ та ХТ. РПЗ-02 | Лист |
| Зм | Лист | Підпис | № докум | Дата | | 87 |

продукції, має високу надійність та низьку складність.

| | | | | | | |
|----|------|--------|---------|------|--|------|
| | | | | | НУЦЗУ. 2.16-47.СХ та ХТ. РПЗ-02 | Лист |
| | | | | | | 88 |
| Зм | Лист | Підпис | № докум | Дата | | |

Перелік джерел інформації

1. Закон України «Про використання ядерної енергії та радіаційну безпеку, постанова ВР № 40/95-ВР від 08.02.95. ВВР. 1995. №12. с.81-102.
2. Норми радіаційної безпеки України (НРБУ) 6.6.1–6.5.001–98. К.: МОЗУ, 1998. 135 с.
3. Испанский протокол о сотрудничестве в области радиационного контроля металлических материалов. ООН. Эконом. и соц. совет. ECE/TRANS/AC.10/2006/2. 03.04.2006
4. Основное оборудование реакторного отделения. Балаково: БАЭС, 2000. 178 с.
5. Резепов В. К., Денисов В. П., Кирилюк Н. А. и др. Реакторы ВВЭР-1000 для атомных электростанций. Подольск: Академкнига, 2004. 333 с.
6. Афров А.М., Кокосадзе Э. Л., Семченков Ю. М. и др. ВВЭР-1000: физические основы эксплуатации, ядерное топливо, безопасность. М.: Логос, 2006. 310 с.
7. Андрушечко С. А., Афров А. М., Васильев Б. Ю. и др. АЭС с реактором типа ВВЭР-1000. От физических основ эксплуатации до эволюции проекта. М.: Логос, 2010. 604 с.
8. Овчинников Ф.Я., Семенов В.В. Эксплуатационные режимы водо-водяных энергетических реакторов. М.: Энергоатомиздат, 1988. 359 с.
9. Митин В. И., Семченков Ю. М., Калинушкин А. Е. Развитие системы внутриреакторного контроля ВВЭР. *Атомная энергия*. М.: 2009.
10. Положення про організацію оповіщення і зв'язку у надзвичайних ситуаціях. *Постанова КМУ* від 15.01.1999.
11. Будыко М. И. Современные проблемы экологии. М.: 1994. 307с.
12. Лисовский Л. А. Радиационная экология и радиационная безопасность. Мозырь: Мозырский ГПИ, 1997. 52 с.
13. Максимов М. Т., Оджагов Г. О. Радиоактивные загрязнения и их измерение. М.: Энергоатомиздат, 1989. 304 с.
14. Жуковская О. В., Кавалев С. Д., Ролевич И. В. и др. Можно ли победить радиацию. Рекомендации специалистов. Мн.: Беларусь, 1996. 32 с.
15. Памятка для населения проживающего на территории, загрязненной радиоактивными веществами. Мн.: 1997. 24 с.
16. Маргулис У.Я. Радиация и защита. М: Атомиздат, 1974.
17. Моисеев А.А., Иванов В.И. Справочник по дозиметрии и радиационной гигиене.

| | | | | | | |
|----|------|--------|---------|------|--|------|
| | | | | | НУЦЗУ. 2.16-47.СХ та ХТ. РПЗ-02 | Лист |
| | | | | | | 89 |
| Зм | Лист | Підпис | № докум | Дата | | |

М.: Энергоиздат, 1984.

18. Закон України «Про поводження з радіоактивними відходами», від 30.06.1995р. № 256/95-ВР.

19. Закон України «Про захист людини від впливу іонізуючого випромінювання». *Відомості Верховної Ради України*, 1998. № 22. с.115-135.

20. Санитарные правила проектирования и эксплуатации атомных станций. СПАС-88.

21. Ерофеев В.А. Основы обращения с радиоактивными отходами, Севастополь, 2000.

22. Голубев Б.П., Козлов В.Ф., Смирнов С.Н. Дозиметрия и РБ. М: Атомиздат, 1984.

23. Вопросы дозиметрии и РБ на АЭС, Славутич: Укратоміздат, 1998.

24. Дозиметрический и радиометрический контроль при работе с РВ и ИИИ (методическое руководство), том 1, М.: Атомиздат, 1980.

25. Афанасьев А.В., Гуманный В.В., Мясоедов Г.П. Основы ядерной физики, радиохимии и дозиметрии. Севастополь, 2003.

26. Пикаев А.К. Современное состояние радиационной технологии. 1995.

27. Аглинцев К.К. Дозиметрия ионизирующих излучений. М.: Гостехиздат, 1957.

28. Глесстон С. Атом. Атомное ядро. Атомная энергия. Развитие современных представлений об атоме и атомной энергии, пер. с англ. М.: Изд. ин. лит., 1961.

29. Гродзенский Д.Э. Радиобиология. Изд. 3-е. М.: Атомиздат, 1966.

30. Гусев Н.Г., Машкович В.П., Обвинцев Г.В. Гамма-излучение радиоактивных изотопов и продуктов деления. М.: Физматгиз, 1958.

31. Доклад Научного комитета ООН по действию атомной радиации: 1962-1965. *Документы ООН*. 1965.

32. Дэвидсон Г.О. Биологические последствия общего γ -облучения человека. Пер. с англ. М.: Атомиздат, 1960. 80 с.

33. Козлов В.Ф., Трошкин Ю.С. Справочник по РБ. М.: Атомиздат, 1967. 380 с.

34. Москалев Ю.И., Дибобес И.К., Журавлев В.Ф. и др. Концепция биологического риска воздействия ионизирующего излучения. М.: Атомиздат, 1973. 152 с.

35. Намиас Н. Ядерная энергия. Пер. с англ. М.: Изд. ин. лит., 1955.

36. Распределение, биологическое действие и ускорение выведения радиоактивных изотопов. Сборник материалов. М.: Медгиз, 1961. 342 с.

37. Петросьянц А.М. От научного поиска к атомной промышленности. М.: Атомизд.,

| | | | | | | |
|----|------|--------|---------|------|--|------|
| | | | | | НУЦЗУ. 2.16-47.СХ та ХТ. РПЗ-02 | Лист |
| | | | | | | 90 |
| Зм | Лист | Підпис | № докум | Дата | | |

1972. 220 с.

38. Ядерная энергетика Советского Союза. М: Атомная энергия, 1971, т. 30, с. 243.
39. Эйзенбад М. Радиоактивность внешней среды. Пер. с англ. М.: Атомиздат, 1967.
40. Бадрутдинов О.Р. Нормативно-правовое обеспечение радиационной безопасности. *Экологический консалтинг*. 2001. №2. С. 5-23.
41. Григорьев Ю.Г. Памятка населению по РБ. М.: Энергоатомиздат, 1990.
42. Котляров А.А., Кривашеев С.В., Курепин А.Д. Воздействие ядерного излучения радона и продуктов распада на население. *Аппаратура и новости РИ*. 1994. № 2.
43. Биндюк Т.Я., Бессчетнова О.В. Профессиональные болезни. Балашов: 2007. 128 с.
44. Ярошинская А.А. Ядерная энциклопедия. М.: 1996.
45. Данилов П. В., Жиганов К. В., Пронин А. В. Использование ионизирующих излучений в промышленности, медицине и других областях. *Молодой ученый*. 2016. №23. С. 40-44. URL: <https://moluch.ru/archive/127/35037/> (дата звернення: 13.05.2020).
46. Вимоги до упаковок для довгострокового зберігання та захоронення високоактивних радіоактивних відходів від переробки відпрацьованого ядерного палива. *ДК ядерного регулювання України*, наказ №34 від 16.02.2009. Затв. 11.03.2009, № 229/16245.
47. Поводження з РАВ. *Рівненська атомна електростанція*. URL: <https://www.rnpp.rv.ua/handling-rao.html> (дата звернення: 13.05.2020).
48. Закон України «Про Загальнодержавну цільову екологічну програму поводження з радіоактивними відходами» від 17.09.2008р № 516-VI. *ВВР*. 2009. №5. с. 8-30.
49. Стратегія поводження з радіоактивними відходами в Україні. *Розпорядження Кабінету Міністрів України* від 19.08.2009р. № 990-р.
50. Ліквідація радіаційних аварій. *Державне спеціалізоване підприємство "Об'єднання "Радон"*. URL: <https://radon.net.ua/likvidacija-radiacijnih-avarij/> (дата звернення: 13.05.2020).
51. Опромінене продовольство: не мерехтить і не псується. *Agravery*. URL: <https://agravery.com/uk/posts/show/oprominene-prodovolstvo> (дата звернення: 13.05.2020).
52. Основні санітарні правила забезпечення радіаційної безпеки України. К., 2005. 62 с.
53. Мурашко В.О., Мечев Д.С. й ін. Радіаційна гігієна. Вінниця: Нова книга, 2013. 374 с.
54. Загальні правила радіаційної безпеки використання джерел іонізуючого випромінювання у медицині. *Наказ 51/151 Держатомрегулювання і МОЗ* № 51/151 від 16.02.2017.

| | | | | | | |
|----|------|--------|---------|------|--|------|
| | | | | | НУЦЗУ. 2.16-47.СХ та ХТ. РПЗ-02 | Лист |
| | | | | | | 91 |
| Зм | Лист | Підпис | № докум | Дата | | |

55. Мурашко В.О., Костенецький М.І., Рушак Л.В. Промислові радіаційні аварії з джерелами іонізуючого випромінювання, запобігання та порядок їх розслідування. К.: 2014. 78 с.
56. Мечев Д.С. та ін. Застосування джерел іонізуючого випромінювання у медицині та попередження надмірного опромінення персоналу і пацієнтів. К.: 2010. 148 с.
57. Калиновський О.К., Краснов В.О., Пазухін Е.М. Деякі екологічні аспекти використання ядерних вибухів у мирних цілях. *Проблеми безпеки АЕС і Чорнобиля*. 2010. №14. С.113-119.
58. Невідома ядерна Україна. *Імена*. URL: <https://www.imena.ua/blog/nuclear-ukraine/> (дата звернення: 13.05.2020).
59. Про встановлення основних норм безпеки для захисту від загроз, зумовлених впливом іонізуючого випромінювання. *Директива ради 2013/59/ЄВРАТОМ*. 05.12.2013 р. 90 с.
60. Закон України «Про дозвільну діяльність у сфері використання ядерної енергії». *Відомості Верховної Ради України*, 2000, № 9, 68 с.
61. Положення «Про Державний реєстр джерел іонізуючого випромінювання». *Постанова Кабінету міністрів України* від 4 серпня 1997р. № 847.
62. Консультації відносно підвищення безпеки ДІВ в Україні. *Зелена книга*. 2008. 22 с.
63. Порядок взаємодії органів виконавчої влади та юридичних осіб, які провадять діяльність у сфері використання ядерної енергії, в разі виявлення радіоактивних матеріалів у незаконному обігу. *Постанова КМУ* від 2 червня 2003 р. № 813.
64. Ліцензійні умови провадження господарської діяльності із заготівлі, переробки, металургійної переробки металобрухту кольорових и чорних металів». *Наказ КМУ* № 183 від 18 листопада 2011 р. за N 1321/20059.
65. Комплексний огляд регулюючої діяльності (місія МАГАТЕ IRRS). 2006.
66. Grim J. Q., Ucer K. B., L. Trefilova, et al. Nonlinear quenching of densely excited states in wide-gap solids. *Physical Review. American Physical Society*. 2013. № 87(12). P. 117-125. [doi:10.1103/PhysRevB.87.125117].
67. Закон України «Про видобування і переробку уранових руд». *ВВР*. 1998. № 11-12, с. 39.
68. Закон України «Про охорону праці». *ВВР*. 1992. № 49. с. 668.

| | | | | | | |
|----|------|--------|---------|------|--|------|
| | | | | | НУЦЗУ. 2.16-47.СХ та ХТ. РПЗ-02 | Лист |
| | | | | | | 92 |
| Зм | Лист | Підпис | № докум | Дата | | |