

Всеукраїнський конкурс студентських наукових робіт  
з галузей знань і спеціальностей у 2018/2019 навчальному році

Галузь знань (спеціальності): «Техногенна безпека»

Тема: *«Удосконалення методу числової дозиметрії для забезпечення  
технології очищення спеціального робочого одягу»*

Шифр: «Спецодяг»

**ЗМІСТ**

ВСТУП	3
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ СУЧАСНИХ НАУКОВО - ТЕХНІЧНИХ ПІДХОДІВ ОЦІНКИ ЯКОСТІ СПЕЦІАЛЬНОГО ОДЯГУ	5
1.1 Гігієнічні властивості спеціального одягу	2
1.2 Аналіз існуючих методів догляду за спецодягом	9
1.3 Проходження прискорених елеронів через матеріал спеціального одягу на радіаційно-технологічній лінії стерилізаційного центру	14
РОЗДІЛ 2 МЕТОДИКА РОЗРАХУНКУ ПОГЛИНУТОЇ ДОЗИ РУХОМОГО ОБ'ЄКТА, ЩО ОПРОМІНЮЄТЬСЯ ПРИСКОРЕНИМИ ЕЛЕКТРОНАМИ	20
ВИСНОВКИ	26
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	27

## ВСТУП

Для захисту працівників, які виконують шкідливі, небезпечні та брудні види робіт, а також здійснюють роботи в особливих температурних умовах видається спецодяг. Спеціальний одяг регулює тепловий стан організму, оберігаючи його від перегрівання і переохолодження, сприяє попередженню простудних захворювань, а також повинен задовольняти певні експлуатаційні вимоги – бути зручним, достатньо міцним. Спецодяг в процесі носіння потребує догляду, оскільки погіршення первинних захисних, гігієнічних і експлуатаційних властивостей спецодягу не забезпечують нормальні функції організму і здатність людини зберігати потрібну працездатність, сприяє виникненню, у робочих, шкірних, простудних та інших захворювань.

Забруднення одягу відбувається зсередини (рідкими і газоподібними продуктами життєдіяльності шкіри) і зовні (від потрапляння пилу і забруднюючих речовин). Одяг та білизна, крім механічного (пил, бруд), і хімічного (гази) забруднення, піддаються до забруднення мікроорганізмами і паразитами. З огляду на епідемічну небезпеку зараженого одягу її необхідно дезінфікувати.

Дезінфекція верхнього одягу, проводиться обробкою за допомогою пароповітряної чи пароформалінової суміші, кип'ятінням, пранням або замочуванням у розчинах для дезінфекції. Обробка пароповітряною сумішшю використовується для дезінфекції усіх видів одягу та засобів індивідуального захисту, окрім шубно-хутрових, шкіряних і валяних виробів, які підлягають обробці пароформаліновою сумішшю. Обробка за допомогою кип'ятіння застосовується для проведення дезінфекції виробів з бавовнянопаперових тканин та засобів індивідуального захисту, які виготовлені з гуми або прогумованої тканини.

Однак такі види дезінфекції можуть викликати зношеність і усадку тканин, крім того, для деяких широко використовуваних видів утеплювачів спецодягу (швейна вата, ватин) прання взагалі неприйнятне, так як погіршується якість спецодягу.

Для вирішення зазначеної проблеми запропоновано застосовувати спосіб очищення одягу, заснований на застосуванні іонізуючого випромінювання (прискорені електрони). Таким чином вирішення зазначеної наукової проблеми є необхідним та актуальним завданням сьогодення.

**Мета і задачі дослідження.** Метою роботи є розробка науково обґрунтованих закономірностей дії величин інтенсивності випромінювання заряджених електронів, для забезпечення якісної технології біологічного очищення спеціального робочого одягу.

Для досягнення зазначеної мети поставлено такі наукові задачі:

1. Провести аналіз сучасних науково-технічних підходів очищення спеціального одягу.
2. Визначити санітарно-гігієнічні особливості експлуатації одягу.
3. Провести експериментальні дослідження проходження прискорених електронів через матеріал спеціального одягу на радіаційно-технологічній лінії стерилізаційного центру.
4. Провести комп'ютерне моделювання проходження іонізуючого випромінювання через матеріал спеціального одягу для визначення потужності стерилізаційної дози.

**Об'єктом дослідження** є очищення спеціального робочого одягу.

**Предметом дослідження** є удосконалення методів числової дозиметрії.

**Методи дослідження:** теоретичні і експериментальні. Теоретичні дослідження базуються на застосуванні теорії математичної фізики, теорії атомної фізики, математичних методів чисельного моделювання. Для моделювання проходження прискорених електронів через речовину з метою вивчення їх радіаційно-захисних властивостей було обрано метод Монте-Карло. Експериментальні дослідження реалізувалися проведенням експериментів щодо визначення процесу проходження іонізуючого випромінювання через захисний матеріал та проводились у спеціалізованій та акредитованій лабораторії.

## **РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ СУЧАСНИХ НАУКОВО - ТЕХНІЧНИХ ПІДХОДІВ ОЦІНКИ ЯКОСТІ СПЕЦІАЛЬНОГО ОДЯГУ**

Захисні, експлуатаційні та гігієнічні властивості спецодягу багато в чому визначаються матеріалами, з яких він виготовляється. Асортимент матеріалів, використовуваних для виготовлення спеціального одягу, досить різноманітний. Для верху виробів в основному використовуються бавовняні, лляні, вовняні, змішані і синтетичні тканини, натуральне і штучне хутро, трикотажні полотна. В даний час все частіше використовуються більш довговічні і зносостійкі сумішеві тканини. Хоча тканини зі стовідсотковим вмістом натуральних волокон залишаються актуальними для специфічних спеціальностей, де використання синтетичних ниток просто неприпустимо з міркувань пожежної безпеки, або де велика ймовірність виникнення статичної електрики в матеріалі одягу. В якості підкладкових матеріалів виступають бавовняні, змішані і синтетичні тканини. Основними утеплювачами робочого одягу є вата, ватин, хутро штучне і натуральне, синтетичний об'ємний утеплювач [1].

### **1.1 Гігієнічні властивості спеціального одягу**

На сьогоднішній день підібраний великий науковий матеріал по вивченню гігієнічних властивостей одягу і взуття і їх впливу на організм людини. Результати досліджень свідчать про те, що нераціональний по гігієнічним властивостям спецодяг погіршує самопочуття людини, знижує рівень функціонування систем організму і працездатність, а також може викликати ряд гострих і хронічних захворювань. Все це призводить до зниження рівня здоров'я, зростання загальної захворюваності і, в кінцевому рахунку, до збільшення відриву від виробничої діяльності [2].

Призначення спецодягу - не тільки забезпечувати захист працюючих від різних небезпечних і шкідливих виробничих факторів, але і зберігати їх нормальний тепловий стан, що є однією з умов високої працездатності людини. Проектуванням та розробкою спеціального одягу із спеціальними

властивостями для захисту працюючих в несприятливих для організму людини умовах займалися багато вітчизняних вчених [3].

Незалежно від типу, призначення, крою та форми одяг повинен відповідати погодним умовам, стану організму і виконуваний роботі, важити не більше 10% маси тіла людини, має крій, який не ускладнює кровообігу, не стискає дихання і рухів і не викликає зміщення внутрішніх органів, легко очищатися від пилу і забруднень, бути міцною. Одяг грає велику роль в процесах теплообміну організму з навколишнім середовищем. Вона забезпечує такий мікроклімат, який в різних умовах навколишнього середовища дозволяє організму залишатися в нормальному тепловому режимі. Мікроклімат підодеяжного простору є основним параметром при виборі костюма, так як в кінцевому підсумку підодяговий мікроклімат в значній мірі визначає теплове самопочуття людини [4].

Під підодяговим мікрокліматом слід розуміти комплексну характеристику фізичних факторів повітряного прошарку, що прилягає до поверхні шкіри і безпосередньо впливає на фізіологічний стан людини. Ця індивідуальне мікросередовище знаходиться в особливо тісній взаємодії з організмом, змінюється під впливом його життєдіяльності і в свою чергу безперервно впливає на організм; від особливостей підодягового мікроклімату залежить стан терморегуляції організму. Підодяговий мікроклімат характеризується температурою, вологістю повітря і вмістом вуглекислоти.

Температура підодягового простору коливається від 30,5 до 34,6 °C при температурі навколишнього повітря 9-22 °C. У помірному кліматі температура підодягового простору знижується в міру віддалення від тіла, а при високій температурі навколишнього середовища знижується в міру наближення до тіла через нагрівання сонячними променями поверхні одягу. Відносна вологість підодягового повітря в умовах середньої кліматичної смуги зазвичай менше вологості навколишнього повітря і підвищується при підвищенні температури повітря. Так, наприклад, при температурі навколишнього повітря 17 °C вологість підодягового повітря становить близько 60%, при підвищенні

температури атмосферного повітря до 24 °С вологість повітря в підодяговому просторі зменшується до 40%. При підвищенні температури навколишнього повітря до 30-32 °С, коли людина активно пітніє, вологість підодягового повітря зростає до 90-95% [5].

Повітря підодягового простору містить близько 1,5-2,3% вуглекислоти, її джерелом є шкіра. При температурі навколишнього повітря 24-25 °С за 1 год в підодяговий простір виділяється 255 мг вуглекислоти. У забрудненому одязі на поверхні шкіри, особливо при зволоженні і підвищенні температури, відбувається інтенсивне розкладання поту і органічних речовин зі значним збільшенням вмісту вуглекислоти в повітрі підодягового простору [6].

Властивості одягу в значній мірі залежать від властивостей тканин. Тканини повинні володіти теплопровідністю відповідно до кліматичних умов, достатньої повітропроникністю, гігроскопічністю і вологоємністю, малим газопоглинанням, не мати дратівливих властивостей. Тканини повинні бути м'якими, еластичними і разом з тим міцними, не змінювати своїх гігієнічних властивостей в процесі носіння.

Залежно від призначення одягу вимоги до тканин різні. Наприклад, хороша повітропроникність важлива для літнього одягу, і навпаки, одяг для роботи на вітру при низькій температурі повітря повинна мати мінімальну повітропроникність. Гарне поглинання водяної пари - необхідна властивість білизняних тканин, абсолютно неприйнятне для одягу людей, що працюють в атмосфері підвищеної вологості або при постійному змочуванні одягу водою (робочі фарбувального цеху, моряки, рибалки та ін.). При гігієнічній оцінці тканин одягу досліджують їх ставлення до повітря, води, теплові властивості [7].

Повітропроникність тканин має велике значення для вентиляції підодягового простору. Вона залежить від кількості і обсягу пор в тканині, характеру обробки тканини. Повітронепроникний одяг створює труднощі в вентильованні підодягового простору, яке швидко насичується водяними парами, що порушує випаровування поту і створює передумови для

перегрівання людини. Дуже важливим є збереження тканинами достатньою повітропроникності і у вологому стані, тобто після змочування дощем або намокання від поту.

Важливим показником гігієнічних властивостей тканин є їх ставлення до води. Вода в тканинах може перебувати у вигляді пари або в рідкокраплинному стані. У першому випадку говорять про гігроскопічності, в другому - про вологоємності тканин.

Гігроскопічність означає здатність тканин поглинати воду у вигляді водяної пари з повітря - вбирати пароподібні виділення шкіри людини. Гігроскопічність тканин різна. Якщо гігроскопічність льняного полотна прийняти за одиницю, то гігроскопічність ситцю складе 0,97, сукна- 1,59, шовку -1,37, замші -3,13.

Велике значення мають теплові властивості тканин. Втрати тепла через одяг визначаються теплопровідні властивості тканини, а також залежать від насичення тканин вологою. Ступінь впливу тканин одягу на загальну тепловіддачу служить показником її теплових властивостей. Ця оцінка проводиться шляхом визначення теплопровідності тканин.

Під теплопровідністю розуміють кількість тепла в калоріях, що проходить в 1 с через 1 см<sup>2</sup> тканини при її товщині 1 см і температурній різниці на протилежних поверхнях в 1 ° С. Теплопровідність тканини залежить від величини пор в матеріалі, причому мають значення не стільки великі проміжки між волокнами, скільки дрібні - так звані капілярні пори. Теплопровідність ношеного або неодноразово прати тканини підвищується, так як капілярних пор стає менше, число більших проміжків збільшується.

Внаслідок різної вологості навколишнього повітря пори одягу містять більшу або меншу кількість води. Від цього змінюється теплопровідність, так як волога тканина краще проводить тепло, ніж суха. При повному намоканні теплопровідність вовни збільшується на 100%, шовку на 40% і бавовняних тканин на 16% [8].



Під впливом носіння тканину одягу змінює свої властивості внаслідок зносу і забруднення. Забруднення одягу відбувається зсередини (рідкими і газоподібними продуктами життєдіяльності шкіри) і зовні (від пилу і забруднюючих речовин). Розрізняють механічне (пил, бруд), хімічне (гази) і бактеріальне забруднення одягу.

Певну роль відіграє газопоглинаємі тканин. Це властивість має особливе значення в виробничих і польових умовах. Величина поглинання газів залежить від їх концентрації і вологості тканини. Вовна поглинає газів більше, ніж бавовняна тканина, і повільніше їх виділяє. Іноді кількість газів, адсорбованих тканинами, настільки велике, що при зворотному їх виділенні вони можуть стати причиною отруєння (анілін). Здатність тканин сорбувати гази (пари) з повітря залежить також від структури тканини і характеру її обробки [9].

Одяг та білизна, крім механічного та хімічного забруднення, піддаються забруднення мікроорганізмами і паразитами. Тканини одягу, забруднені пилом, виділеннями з носоглотки, випарами, можуть містити патогенні збудники - мікобактерію туберкульозу, мікроорганізми тифо-паратифозної групи, стрептококи, стафілококи. Особливо сильно забруднюються білизна і вовняний одяг, велика товщина якої, рихлість і порівняно рідкісна прання сприяють накопиченню мікроорганізмів. Через забруднений одяг можуть передаватися черевний тиф, дизентерія та інші інфекції. Небезпека такої передачі визначається тривалістю виживання мікроорганізмів на тканині. З огляду на епідемічну небезпеку зараженого одягу її необхідно дезінфікувати.

## **1.2 Аналіз існуючих методів догляду за спецодягом**

Відсутність у малих і середніх підприємствах обладнання і процесу прання, чищення і знепилювання, сушки і зазвичай супутнього процесу провітрювання спецодягу створює при її зберіганні сприятливі умови для розмноження мікроорганізмів, у тому числі і патогенних, які є однією з причин неприємних запахів у побутових приміщеннях, руйнування тканини і захворювання шкіри. Порушення первинних властивостей матеріалу внаслідок

забруднення і супутнє погіршення захисних, гігієнічних і експлуатаційних властивостей спецодягу не забезпечують нормальні функції організму і здатність людини зберігати потрібну працездатність, сприяють виникненню у робочих ряду шкірних, простудних та інших захворювань.

Збереження захисних і гігієнічних якостей і презентабельного зовнішнього вигляду робочого одягу залежить від раціонального підходу до експлуатації, очищенні, пранні, обладнання, умов і миючих (для чищення) речовин. Будь-який спецодяг вимагає максимально комфортного догляду з метою запобігти псуванню захисних властивостей матеріалу.

Сучасний спецодяг виготовляється з використанням особливих видів утеплювачів, світловідбиваючих смуг, емблем, клейових вставок, має складну незнімну фурнітуру, верхні покриття із спеціальними водонепроникними і вогнезахисними просоченнями. Звичайні побутові пральні машини не гарантують збереження захисних властивостей і зовнішнього вигляду спецодягу при частому пранні і не видаляють промислові забруднювачі. Різні типи тканин вимагають особливого догляду, який орієнтований, перш за все, на збереження захисних властивостей одягу, що також обумовлює необхідність чистки і прання спецодягу у спеціалізованих підприємствах [10].

Наприклад, делікатного ставлення вимагає мембранний спецодяг. Пральний порошок, відбілювач, кип'ятіння здатні якщо не зруйнувати мембрану, то повністю нівелювати її дихаючі властивості. Слід використовувати збалансовані рідкі склади для прання. Аналогічний догляд передбачений для нетканого поліестерового флісу. При високій температурі води його тонковолокнистих склад може частково змінити структуру Робочий одяг з вологозахисної тканини зі своїми властивостями чинить опір проникненню води всередину структури, температурний діапазон нагрівання не повинен перевищувати 40-50 градусів. Відповідно невисока температура води не може у повній мірі видалити всі забруднення, тому повинні використовуватися допоміжні рідкі речовини з синтетичними ензимами [11].

Фрагменти спецодягу (вставки) зі штучної шкіри під впливом гарячої води і хімічної обробки змінюються у такій значній мірі, що вимагають заміни або ремонту. Це зауваження справедливо для штучного хутра і матеріалів зі світловідбиваючими ефектами. Щоб не сталося деформації окремих деталей спецодягу, перед пранням закріплюють все фіксують деталі, будь то застібка блискавки, карабін або шнурівка. Утеплений спецодяг, тканини на льняній, бавовняній і лавсановій основі зі складними багатофункціональними просоченнями не повинні піддаватися традиційного прання, для них передбачена спеціальна чистка. Логотипи на спецодязі, особливо у техніці шовкографії, надають виробу певну стильність, яку легко втратити, якщо нагріти воду для прання понад 50°C або спробувати пройтися по поверхні виробу гарячою праскою [12].

В даний час склад тканин настільки часто оновлюється, що не завжди може відповідати маркуванню одягу символам по догляду. Цілком ймовірно, що модифікована тканина нового покоління допускає прання на професійному обладнанні без жодного збитку для водовідштовхувальних, кислотозахисних та інших просочень. Деякі моделі одягу краще прати за допомогою промислових машин, які мають великий діаметр барабана. В такому обладнанні можна буде позбутися механічним шляхом навіть від сильного забруднення, так як бруд буде вимиватися падінням з висоти всередині барабана.

Такі важливі умови, як час і спосіб впливу на матеріал, його чутливість до хімічних препаратів і механічних впливів, особливості просочення матеріалу, враховуються в процесі прання і сушіння спецодягу на спеціальному обладнанні і визначаються спеціальними програмами прання. Ці програми мають адаптовані для спецодягу алгоритми прання, для того щоб одяг якомога довше зберігав свій зовнішній вигляд, а головне - не втрачав захисні властивості. При цьому обладнання виконує свою основну функцію - ефективно видаляє найстійкіші забруднення. Програми дозволяють провести ретельне очищення важких матеріалів, в тому числі з використанням аквачистки - альтернативи традиційної хімічистки, що пропонує більш

дбайливий догляд за речами. Економія є очевидною - речі зношуються менше. Порівняльні тести показують, що спецодяг служить в два рази довше, немає необхідності в утилізації шкідливих хімікатів, що використовуються в хімчистці, а витрата електроенергії і води мінімальний. Спеціалізовані цехи, в яких стирається спецодяг, мають високий ступінь автоматизації, що включає комп'ютерне дозування професійних миючих засобів і комп'ютерний контроль за процесом обробки.

Аквачищення - професійна волога чистка - спосіб чистки виробів та одягу з текстильних матеріалів з використанням води в якості розчинника. Для посилення миючої здатності води використовуються миючі засоби та препарати, що утворюють емульсії і перешкоджають зворотному проникненню забруднень в волокна. Основним принципом акватехнології є те, що механічна дія на тканину зведена до мінімуму, а процес видалення забруднень відбувається за допомогою спеціальних професійних засобів, в основному на основі натуральних рослинних субстанцій, із захисними функціями для волокон: проти переходу одного кольору на інший, проти усадки, проти утворення заломів, проти втрати еластичності і т.д. Для аквачистки випускаються спеціалізовані машини, конструкція і комп'ютер яких дозволять зробити водну обробку без ризику навіть для самих делікатних виробів, наприклад високошвидкісні пральні машини серії WF (Італія). Аквачищення зберігає колірну гамму виробів. В процесі аквачистки зберігаються практично всі складові, стійкі до механічних впливів. Використовувані препарати і засоби біорозкладністю і не завдають шкоди навколишньому середовищу.

Для дезінфекції спецодягу працівників, чия праця відбувається в умовах підвищеного впливу мікробної факторів, розроблені технології та обладнання обробки одягу озоном. Природні бактерицидні властивості озону широко використовуються для очищення повітря і води. Обробка озоном робочого одягу - ще одна сфера його можливого застосування. В процесі озонування, завдяки високій окислювальній здатності озону, виявляється згубний вплив на цвіль, гриби, бактерії, віруси, усуваються сторонні запахи. Дезінфікуючі

властивості озону дозволяють прибрати запах диму, неприємні запахи з взуття, стерилізувати речі, не придатні для традиційної промислової обробки у водному середовищі або розчинниках. Після обробки озоном вироби виходять дезінфікованими з нейтральним запахом [13].

В даний час розроблена і знайшла застосування комбінована технологія прання в пральній машині із застосуванням миючих засобів і озонуванням води. До пральній машині підключається озоногенератори. Прання з озоном виключає виникнення «перехресного зараження» в білизні та одязі. Одночасно істотно знижується споживання миючих засобів при пранні. Так, за даними доповіді Університетської лікарні Саутгемптона, прання з озоном дозволяє економити 36,49% на воді, газі та електриці. Разом з цим в доповіді фігурують дані про скорочення витрати миючих засобів на 50%. За деякими даними, економія миючих засобів становить до 70-80%. В основному такі пральні машини з озоном використовуються в медичних і соціальних установах [13].

На скорочення термінів санітарної обробки спецодягу впливає попереднє знепилювання. Для підприємств вугільної галузі, борошномельних підприємств, будівельного виробництва та інші, притаманно забруднення спецодягу пилом. В цьому випадку можна застосувати пристрої для знепилювання. Перші розробки обладнання для видалення пилу відомі з двадцятих років минулого століття. У вітчизняній і зарубіжній літературі є описи пристроїв знепилювання одягу, призначених для роботи в різних галузях промисловості. Найбільш розповсюдженим різновидом видалення пилу зі спецодягу залишається пневматичний спосіб як найбільш швидкий і економічно обґрунтований. Розроблено установки, в яких очищення досягається звичайними засобами для систем вентиляції шляхом обдування одягу потоком повітря, в яких одночасно здійснюється аеродинамічний струшування [14].

Знепилювання відбувається в результаті прояви інерційних ефектів, порушуваних в процесі взаємодії знепилюючих тканин з повітряними потоками, які обтікають їх з відносно невеликими швидкостями. Струшування

тканин, подібно «полоскання» прапорів і вітрил в вітряну погоду, поширюється на всю їх площу; воно досить енергійно, щоб зірвати з них налиплі частки забруднення, і в той же час не завдає суттєвих пошкоджень одязі. Струшування тканини здійснюється за її коливальних рухах, викликаних хвилями. Спосіб реалізований в установках для знепилювання спецодягу [15].

Однак такі види догляду можуть викликати зношеність і усадку тканин, крім того, для деяких широко використовуваних видів утеплювачів спецодягу (швейна вата, ватин) прання взагалі неприйнятне, так як погіршується якість спеціального одягу.

Тому пропонуємо застосовувати спосіб дезінфекції одягу, заснований на застосуванні іонізуючого випромінювання. Сутність способу полягає в тому, що одяг піддається обробці одним з видів іонізуючого випромінювання - прискореними електронами.

### **1.3 Проходження прискорених елеронів через матеріал спеціального одягу на радіаційно-технологічній лінії стерилізаційного центру**

Радіаційні технології знаходять своє застосування в багатьох сферах життєдіяльності людини. Галузь застосування радіаційних технологій, і зокрема, прискорювачів електронів дуже широка [16]:

1. Радіаційне модифікування матеріалів:
  - а. Виробництво кабелів і проводів з радіаційно-зшитою ізоляцією.
  - б. Виготовлення зміцнених і термосідаючих виробів.
  - в. Вулканізація еластомерів і виробів з них.
2. Радіаційна полімеризація:
  - а. Радіаційне затвердіння покриттів.
  - б. Радіаційна щеплювальна полімеризація.
  - в. Виробництво модифікованих пористих матеріалів.

3. Радіаційна деструкція (отримання корму і кормових добавок з целюлозовмісних відходів, регулювання молекулярної маси полімерів, деструкція тефлону і гум з бутилкаучуку).

4. Радіаційна стерилізація медичних виробів.
5. Використання радіаційних технологій в екології:
  - a. Радіаційна очищення природної води.
  - б. Радіаційна очищення стічних вод і осадів стічних вод.
  - в. Радіаційна очищення викидних газів.
  - г. Радіаційна обробка твердих відходів.
6. Радіаційна обробка харчових продуктів.
7. Радіаційно-фізичні технології (іонна імплантація (на прискорювачах іонів), легування напівпровідників за допомогою ядерних реакцій (під дією теплових нейтронів), модифікування напівпровідникових матеріалів і виробів, виготовлення полімерних мембран і резисторів для літографії, зміна забарвлення скла і кристалів, тепла дія потужних електронних пучків).
8. Застосування прискорювачів електронів в медицині:
  - a. Променева терапія злоякісних новоутворень.
  - б. Променева терапія непухлинних захворювань.
  - в. Інтраопераційна променева терапія.
9. Застосування прискорювачів електронів в доглядових комплексах.
10. Застосування електронних прискорювачів для дефектоскопії.
11. Застосування іонізуючого випромінювання для збереження музейних експонатів.

Стандартна технологічна установка для стерилізації включає прискорювач електронів з системою сканування пучка, а також конвеєр для дистанційної транспортування ящиків з робочими виробами в зону опромінення. Одяг, який спрямовується на радіаційну стерилізацію, пакується в картонні гофроящики, розмір і маса яких попередньо погоджуються для забезпечення необхідного режиму обробки.

Всі сучасні прискорювачі в залежності від форми траєкторії прискорених частинок діляться на дві великі групи: лінійні і циклічні [17]. Нерезонансними лінійними прискорювачами, в яких для прискорення використовується постійне електростатичне поле, є імпульсні високовольтні трансформатори,

високовольтні установки типу Кокрофта-Уолтона, електростатичний генератор Ван де Грааф і ін. До таких прискорювачів відноситься розглянутий в даній роботі лінійний прискорювач електронів (ЛУЕ) ЛУ-10.

На цій установці накопичений великий досвід по стерилізації промислових партій різних одноразових виробів медичного призначення: шприців, голок до них, систем переливання крові, бинтів, кетгуту та ін. При стерилізаційній дозі 25кГр продуктивність радіаційно-технологічної установки становить не менше 15 т продукції на добу [18].

Характеристики ЛУЕ ЛУ-10 наведено у табл. 1.1 [19].

Таблиця 1.1 - Параметри випромінювання радіаційної установки з прискорювачем ЛУ-10

Електронне випромінювання	
Енергія електронів, МеВ	8...18
Номінальне значення енергії електронів, МеВ	10
Тривалість імпульсу, мкс	3.5
Частота проходження імпульсів пучка, Гц	12.5...300
Струм пучка (середнє значення), мкА	до 1000
Частота сканування пучка, Гц	3
Геометричні розміри пучка (на випускному вікні), см	2×30
Нерівномірність лінійної щільності потоку електронів уздовж робочої зони розгортки пучка, % не більше	±3
Потужність поглиненої дози електронного випромінювання в дакріле, Гр/с	до $1 \cdot 10^3$
Гальмівне випромінювання	
Потік енергії (потужність) гальмівного випромінювання (ГВ), кВт	до 1.6
Геометричні розміри потоку ГВ (на конвертері), см	3×35
Потужність поглиненої дози ГВ в дакріле, Гр/с	до 1.0

Одним з основних критеріїв радіаційної обробки є поглинена доза. Доза в будь-якій точці ящика залежить від енергії електронів, середнього струму,



ширини розгортки, швидкості конвеєра, товщини і щільності об'єкта, а також самого матеріалу, який знаходиться між вікном виведення пучка, і цією точкою. На дозу також може впливати наявність неоднорідностей в оброблюваному матеріалі внаслідок розсіювання електронів на межах розділу [20].

Щоб знати яку дозу необхідно надати спеціальному одягу, що обробляється, для забезпечення її стерильності (стерилізаційна доза) необхідно попередньо провести випробування. Для проведення випробувань відбираємо по 5 зразків швейної вати і синтепону, кожному з яких необхідно повідомити певну дозу по мірі наростання: на перший - 5 кГр, другий - 10 кГр, далі - 15, 20, і 25 кГр. Після опромінення ці зразки відправляємо в бактеріологічну лабораторію.

У лабораторії визначають загальну кількість бактерій об'єкта, наявність санітарно-показової мікрофлори (бактерії групи кишкової палички, ентерококів), а також наявність на поверхні досліджуваного об'єкта умовно-патогенної і патогенної мікрофлори, характерною для виробництва (*Salmonella*, *Staphylococcus*).

Відбір проб для санітарно-мікробіологічного дослідження предметів побуту і обладнання проводиться за допомогою таких методів:

- змивів (тампонами або серветками);
- відбитків (контактний метод);
- агаровим заливанням.

Для визначення мікрофлори різних горизонтальних поверхонь, а також тканин застосовується метод агарової заливки. Для відбору проби використовується спеціальна металева пластинка висотою 2 см у вигляді кільця усіченої форми з діаметром верхньої поверхні кола 5 см і нижньої меншою - 4 см. (рис. 1.1, а). Перед дослідженням кільце фламбірують обпаленням, охолоджують, поміщають на поверхню досліджуваного об'єкта нижнім краєм і заливають розплавленим і охолодженим до 45°C мясопептонним агаром або середовищем Ендо. Через 5-10 хв після застигання середовища кільце обережно знімають і витрушують у стерильну чашку Петрі застиглу агарову пластинку

вгору нижньою поверхнею, яка стикалась з досліджуваним об'єктом. Метод зручний тим, що на поверхню середовища захоплюють всі мікроорганізми, що знаходяться на досліджуваній ділянці об'єкта, але він не дає уявлення про загальне обсіменіння предметів через обмеженість досліджуваної площі. Його рекомендують застосовувати при невеликій бактеріальній забрудненості.

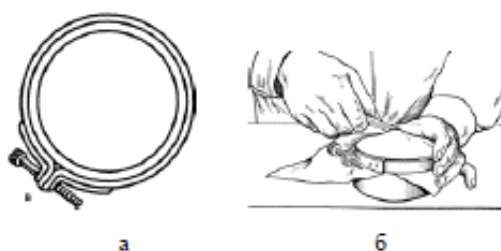


Рисунок 1.1 - а - кільце для закріплення тканини у зібраному вигляді; б - взяття проб мікрофлори тканин

При оцінці санітарного стану предметів побуту, виготовлених з тканин (постільна білизна, ковдри, одяг та ін.), також можна застосовувати метод, який полягає у струшуванні ділянки забруднених тканин над чашкою Петрі з живильним середовищем. Обстежувану тканину затискають до спеціальній металевій обойми, що складається з двох кілець, вкладених один до одного (рис.1, б), і поміщають над чашкою Петрі із середовищем. Струшування тканини можна робити просто биттям по її зовнішньої поверхні стерильним пінцетом або, закріпивши у центрі тканини стерильну шпильку, кілька разів її відтягують і відпускають. Разом з пилом з тканини на живильне середовище потрапляють і мікроорганізми, які перебувають у ній. Чашку закривають і поміщають до термостат для інкубації [21].

Лабораторія після проведення досліджень дає висновок, яка була кількість бактерій та мікроорганізмів до дезінфекції та яка доза є стерилізаційної для даних видів утеплювачів.

Крім того, метою випробувань є встановлення максимально допустимого значення дози. Процедура ця є обов'язковою, тому що при перевищенні допустимого значення можна зруйнувати матеріал зразка. Якщо, наприклад,

синтепону дати завищену дозу, то він буде розповзатися, якщо ще більшу, то буде розсипатися. Якщо дати малу дозу, то синтепон не буде повністю стерилізований.

Поглинена доза визначається експериментальним шляхом. Ця процедура витратна по часу і ресурсам. Значно скоротити ці затрати дозволяє чисельне моделювання.

Чисельне моделювання в радіаційних технологіях сьогодні є одним з основних інструментів для:

- розрахунку просторових розподілів дози випромінювання в опромінюваних об'єктах при плануванні процесу опромінення;
- пошуку оптимальних режимів роботи і параметрів опромінюваних установок;
- оцінки безпеки режимів роботи опромінюваних установок;
- вибір методів контролю процесу опромінення;
- розробки нових методів обробки продукції та матеріалів [22].

Тому, успіх застосування іонізуючих випромінювань в радіаційних технологіях в значній мірі залежить від розробки обчислювальних методів і комп'ютерних програм для моделювання процесів опромінення продукції та матеріалів.

В якості програмного забезпечення, що реалізує моделювання проходження іонізуючого випромінювання був обраний програмний комплекс GEANT4 [23-24]. Обґрунтування вибору даного програмного комплексу було розглянуто в [25], де було проведено порівняння з іншими пакетами, що дозволяють моделювати проходження іонізуючого випромінювання через матеріал методом Монте-Карло.

## РОЗДІЛ 2 МЕТОДИКА РОЗРАХУНКУ ПОГЛИНУТОЇ ДОЗИ РУХОМОГО ОБ'ЄКТА, ЩО ОПРОМІНЮЄТЬСЯ ПРИСКОРЕНИМИ ЕЛЕКТРОНАМИ

Для ефективного застосування обчислювальних методів використовують знання фізики процесу проходження прискорених електронів через речовину. Тому, для розрахунку поглиненої дози  $D_e$  речовиною при проходженні прискорених електронів використовується наступна формула:

$$D_e = 1,6^{13} \cdot \Phi \cdot \frac{S_{col}}{\rho}, \quad (2.1)$$

где  $\Phi$  – флюенс електронів (число частинок, які перетинають поверхню одиничної площі —  $\Phi = N/S$ ),  $\text{см}^{-2}$ ;  $\frac{S_{col}}{\rho}$  – гальмівна здатність речовини,  $\text{MeV} \cdot \text{см}^2/\text{г}$ .

Проведемо розрахунок ослаблення пучка прискорених електронів при проходженні через повітряний прошарок між джерелом електронів (прискорювачем) і об'єктом, що опромінюється. Нехай прискорювач електронів випромінює монохроматичне пучок прискорених електронів. Число взаємодій (розсіяння і поглинання) в нескінченно тонкому шарі речовини поглинача  $dx$  пропорційне концентрації атомів в речовині поглинача  $n$ , інтенсивності падаючого пучка  $N$ :

$$-dN = \mu' N dx, \quad (2.1)$$

де  $\mu'$  — лінійний коефіцієнт ослаблення,  $\text{см}^{-1}$ .

Після інтегрування виразу (2.2) отримуємо закон ослаблення прискорених електронів в речовині поглинача (повітря):

$$N = N_0 e^{-\mu' x} \quad (2.3)$$

де  $x$  – товщина поглинача,  $\text{см}$ .

Лінійний коефіцієнт ослаблення  $\mu'$  залежить від максимальної енергії випромінювання  $E_{\max}$  і властивостей речовини - поглинача. При визначенні енергії  $\beta$ -частинок в першому наближенні  $\mu'$  залежить від числа електронів  $n_e$  в одиниці об'єму речовини - поглинача. Останню величину,  $n_e$ , легко визначити за

допомогою параметрів  $Z$  і  $A$ , числа Авогадро  $N_a$  і щільності речовини  $\rho$ , використовуючи співвідношення:

$$n_e = N_a \rho \frac{Z}{A} \quad (2.4)$$

Вважаючи лінійний коефіцієнт ослаблення  $\mu'$  пропорційним числу електронів  $n_e$ .

$$\mu' = K \cdot n_e, \quad (2.5)$$

де  $K$  - коефіцієнт пропорційності, отримуємо співвідношення:

$$\mu' = K N_a \rho \frac{Z}{A} \quad (2.2)$$

Оскільки відношення  $Z/A$  для різних речовин - поглиначів змінюються в досить вузьких межах (0,5-0,4), практичніше користуватися замість лінійного коефіцієнта ослаблення  $\mu'$  масовим коефіцієнтом ослаблення:  $\mu = \mu'/\rho$  (см<sup>2</sup>/г), який може бути знайдений в [26]. Таким чином ми можемо знайти  $\mu'$  для даної речовини з табличних даних.

Так як опромінення матеріалу робочого одягу в наших умовах проводиться на конвеєрі, то нам треба врахувати швидкість конвеєра, тобто необхідно враховувати час опромінення. Розглянемо зміни, які відбуваються за проміжок часу  $t$ . Так як, за визначенням флюенс дорівнює числу частинок, які перетинають поверхню площею  $S$ :

$$\Phi = \frac{N}{S}, \quad (2.7)$$

то за час  $t$  конвеєр пройде шлях, що дорівнює добутку швидкості конвеєра на час  $t$ , а площа  $S$  буде дорівнює добутку пройденого шляху на довжину обробленої ділянки об'єкта (довжина ящика, наповненого матеріалом робочого одягу)  $l$ :

$$S = v \cdot t \cdot l \quad (2.8)$$

І кінцева формула поглиненої дози рухомого об'єкта, що опромінюється приймає наступний вигляд:

$$D_e = 1.6 \cdot 10^{-13} N_0 \frac{e^{-\mu'x}}{v \cdot t \cdot l} \cdot \frac{S_{col}}{\rho} \quad (2.9)$$

Відповідно до даних наведеними в [27], в НІК «Прискорювач» ННЦ ХФТІ випускне вікно має розміри 2x30 см. Для оцінки діаметр пучка приймемо рівним 1 см. Частота проходження імпульсів пучка - 12,5 - 300 Гц (для розрахунків цю величину приймемо рівній 100 Гц), частота сканування пучка - 3 Гц. Потужність пучка - 10 кВт, енергія - 10 МеВ. Струм пучка складе - 1 мА, що відповідає  $N_0 = 6,24 * 10^{15}$  електронів в імпульсі. Ширина фуфайки (в середньому) дорівнює 50 см, довжина - 70 см. Відстань між випускним вікном і опромінюється об'єктом - близько 1м.

Також, будемо вважати, що матеріал утепленого спеціального одягу - целюлоза, так як бавовна складається з целюлози на 99,5%, її хімічна формула  $[C_6H_{10}O_5]$  і щільність  $1,5 \text{ г / см}^3$ . Гальмівна здатність целюлози представлена на рис. 2.1

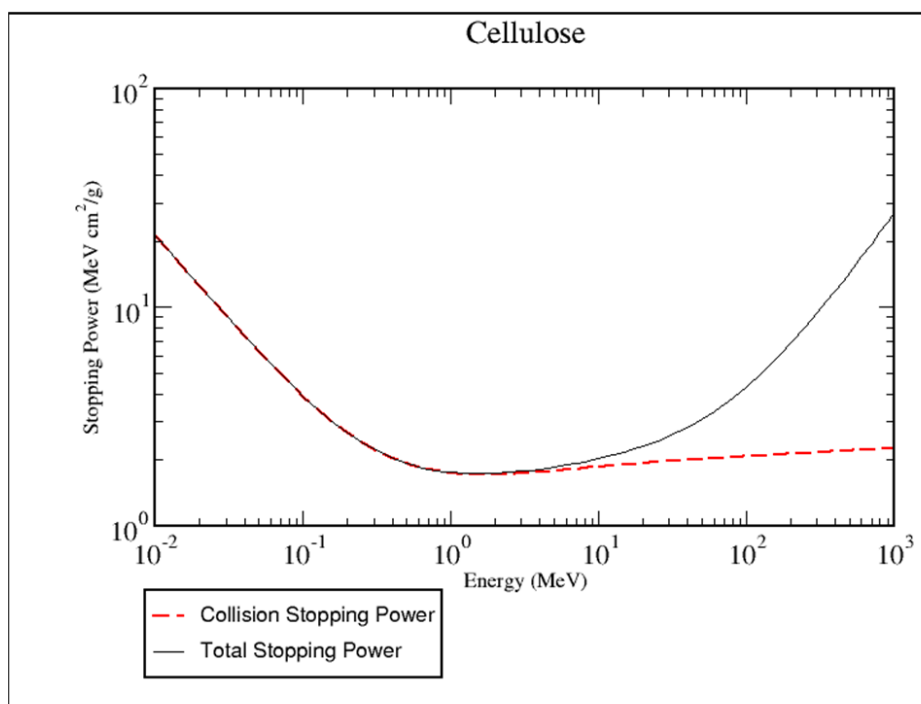


Рисунок 2.1 - Гальмівна здатність целюлози в залежності від енергії пучка електронів

Так як щільність повітря вкрай мала в порівнянні з опромінюваним об'єктом і становить  $0.00129 \text{ г / см}^3$ , і на підставі рис. 2.2 для шару повітря в 1 м величина в розмірності осі ординат дорівнюватиме  $0,129 \text{ г/см}^2$  величину  $e^{-\mu'x}$  у формулі 2.9 приймемо рівної 0,9. І для заданої енергії 10 МеВ гальмівна здатність целюлози дорівнює  $1.859 \text{ МеВ} \cdot \text{см}^2/\text{г}$ .

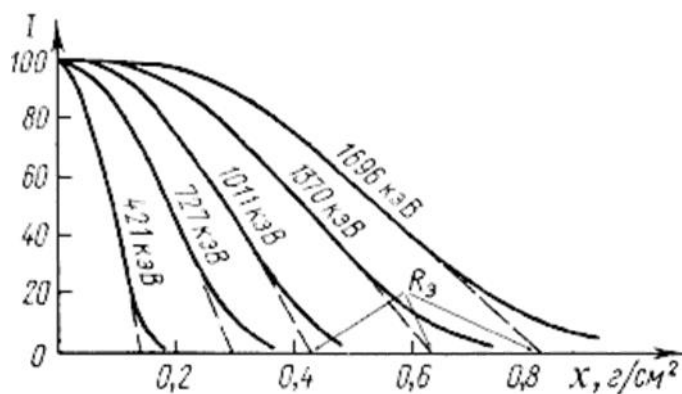


Рисунок 2.2 - Ослаблення інтенсивності пучка електронів в залежності від товщини повітря

Беручи до уваги перераховані вище параметри розрахуємо порядок обчислення параметрів, що залишилися у формулі (2.9), а саме  $v \cdot t \cdot l$ . За одну секунду пучок сканується три рази при цьому випускається 100 імпульсів пучків електронів і за цей час конвеєр проходить  $v$  сантиметрів. Площа пучка становить  $0.7854 \text{ см}^2$ . За 1 секунду загальна довжина опроміненого виробу складе 300 см. Приймемо швидкість конвеєра дорівнює  $1 \text{ см/с}$ . За 1 с прискорювач зробить 100 імпульсів електронів і беручи до уваги, що діаметр пучка - 1 см і ширина оброблюваної поверхні - 50 см, то на кожен сантиметр оброблюваної доведеться 2 імпульсу, таким чином  $N_0$  у формулі (2.9) подвоюється. Узагальнюючи вищенаведені викладки формула (2.9) набуває такого вигляду з урахуванням частоти проходження імпульсів пучка, швидкості конвеєра і довжини оброблюваного об'єкта (крайовими ефектами нехтуємо і припускаємо, що обробляється об'єкт не довше ширини конвеєра):

$$D_e = 1.6 \cdot 10^{-13} \eta \cdot N_0 \frac{v \cdot d \cdot S_{col}}{v \cdot l \cdot \rho} \quad (1)$$

де  $\eta$ - коефіцієнт ослаблення при проходженні пучка прискорених електронів (див. пояснення вище);  $\nu$  - частота проходження імпульсів пучка, Гц;  $d$  - діаметр пучка, см;  $v$  - швидкість конвеєра, см/с;  $l$  - ширина оброблюваного об'єкта, см.

На рис. 2.3 представлений графік залежності поглиненої дози утепленого спеціального одягу в залежності від частоти проходження імпульсів пучка для швидкості конвеєра 1 см /с.

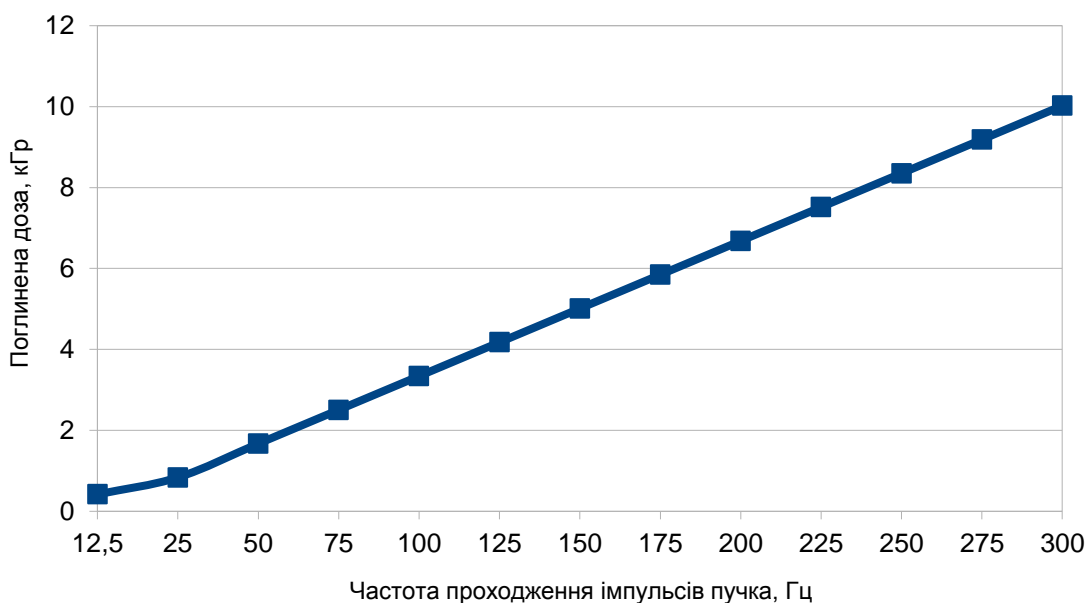


Рисунок 2.3 - Залежність поглиненої дози утепленого спеціального одягу в залежності від частоти проходження імпульсів пучка для швидкості конвеєра 1 см/с.

На рис. 2.4 представлений графік залежності поглиненої дози утепленого спеціального одягу в залежності від частоти проходження імпульсів пучка для швидкості конвеєра 0.5 см/с.



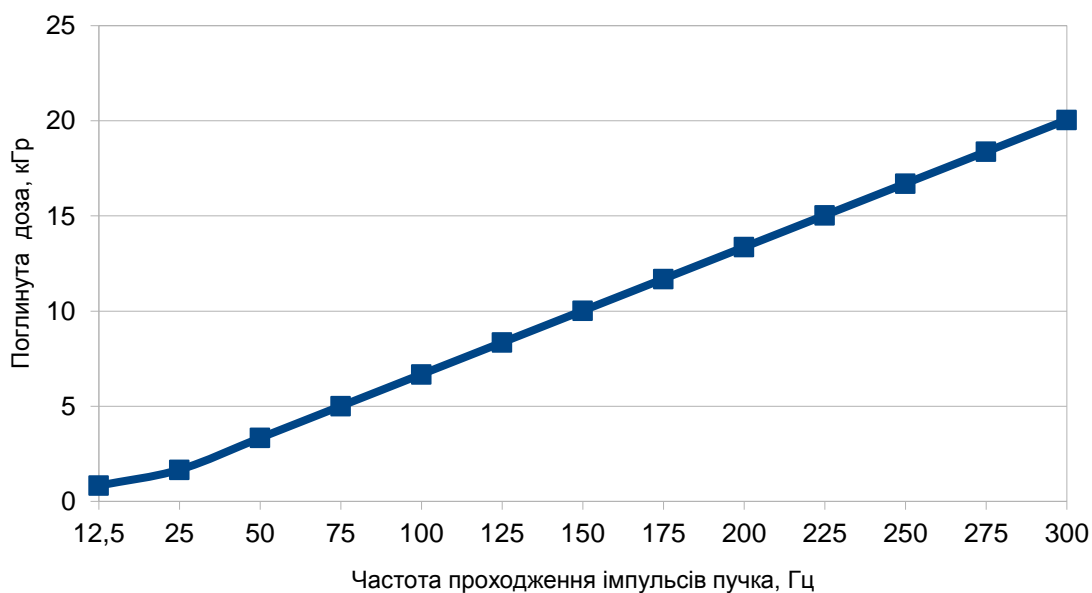


Рисунок 2.4 - Залежність поглиненої дози утепленого спеціального одягу в залежності від частоти проходження імпульсів пучка для швидкості конвеєра 0.5 см/с.

На рис. 2.5 представлений графік залежності поглиненої дози утепленого спеціального одягу в залежності від частоти проходження імпульсів пучка для швидкості конвеєра 2 см/с.

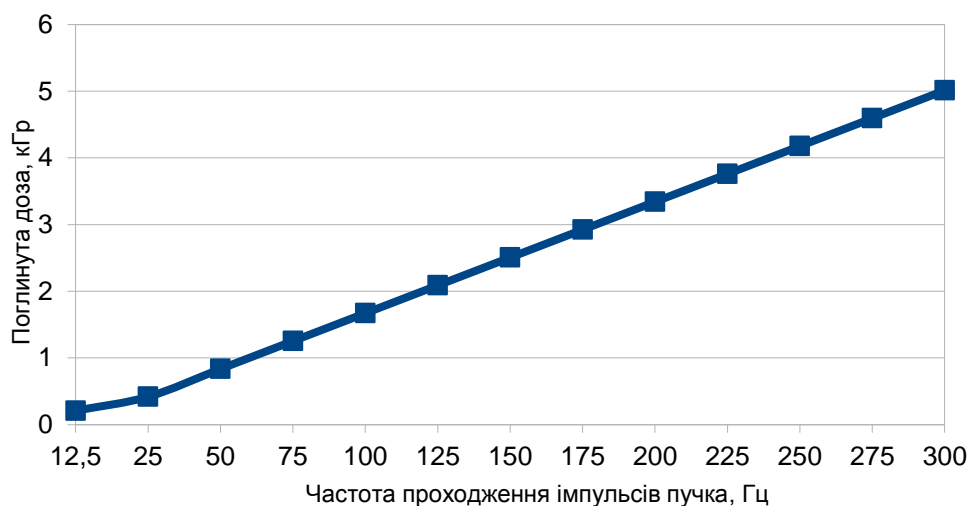


Рисунок 2. 5- Залежність поглиненої дози утепленого спеціального одягу в залежності від частоти проходження імпульсів пучка для швидкості конвеєра 2 см/с.

## ВИСНОВКИ

З розвитком промисловості, в останні роки спостерігається збільшення кількості промислових радіаційних установок, розширення асортименту оброблюваних іонізуючим випромінюванням виробів, розробка та впровадження нових способів і методів радіаційної обробки. Пучки електронів і гальмівне випромінювання широко використовуються в різних промислових радіаційно-технологічних процесах. До таких процесів відносяться стерилізація медичних препаратів та інструментарію, пастеризація і стерилізація харчових продуктів, радіаційна полімеризація і вулканізація, радіаційна обробка сільськогосподарської продукції, розробка нових матеріалів з унікальними властивостями, очищення стічних вод і топкових газів, митний контроль та ін.

Радіаційні технології стерилізації та обробки, відрізняються високим ступенем ефективності, високою продуктивністю, точністю дозування випромінювання, можливістю опромінення запакованих продуктів, відсутністю високого нагріву продукту і як наслідок можливість стерилізації термолабільних об'єктів, а також низькими експлуатаційними витратами і відповідністю прийнятим екологічним нормам. Тому пропонується за допомогою прискорених електронів проводити біологічну очистку робочого одягу від мікроорганізмів.

Проведено аналіз сучасних підходів до дезінфекції спеціального одягу, та визначено певні недоліки цих методів так, наприклад, утеплений одяг та одяг, оброблений спеціальними речовинами, прати заборонено. Для того, щоб визначити яка доза буде ефективна для стерилізації одягу, проведено експеримент, щодо визначення бактерій та мікроорганізмів, в матеріалах спеціального одягу, до дезінфекції іонізуючим випромінюванням та після. Визначено і обґрунтовано необхідність використання чисельного моделювання в радіаційних технологіях. Отримана математична залежність поглиненої дози рухомого об'єкта, яка дозволить розрахувати технологічні режими процесу радіаційної стерилізації біологічно-зараженого матеріалу спеціального одягу.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Денисенко, М. В. Удосконалення нормативних документів з проектування та застосування засобів індивідуального захисту працівників в гарячих цехах: дис. канд. техн. наук : 05.01.02 / Денисенко Марина Володимирівна – Харків, 2015. – 169 С.
2. Третьякова Л. Д. Оцінювання ризику у використанні захисного одягу / Л.Д. Третьякова, Н. В. Остапенко // Проблеми охорони праці в Україні. – 2016. – Вип. 32. – С. 57-66.
3. Ромась М.Д. Щодо визначення потреби в засобах індивідуального захисту для працівників на виробництві / М.Д. Ромась, О.В. Цибульська // Проблеми охорони праці в Україні. – 2015. - Вип. 29. – С. 88-102.
4. Журавлева Н. Л. Создание комфортного микроклимата пододежного пространства в герметичных изделиях специального назначения //Иновации и перспективы сервиса. Сборник научных статей VII Международная научно-техническая конференция.–2011.–часть. – 2011. – Т. 5.
5. Каминский С. М. Искусственные материалы для спецодежды и рабочей обуви / С. М. Каминский, К. М. Смирнов. // Охрана труда. – 2001.– № 4. – С. 18–19.
6. Колосніченко М. В. Кондуктивні системи охолодження для спецодягу різноманітного призначення в умовах мікроклімату, що нагріває / М. В. Колосніченко // Вісник технологічного університету Поділля. – 2003. – № 4. – С. 90–93.
7. Колосніченко М. В. Розвиток наукових основ створення термозахисного спеціального одягу: рукопис. дис. на здобуття наук. ступеня доктора. техн. наук: спец. 05.19.04 “Технологія швейних виробів” / М. В. Колосніченко. – К., 2004. – 350 с.
8. Бартон Э. Человек в условиях холода. Физиологические явления, возникающие при действии низких температур / Э. Бартон. – М.: Медиздат, 1977. – 184 с.

9. Аверин Ю. Ф. Моделирование нестационарных температурных полей в многослойных пакетах теплозащитной одежды / Ю. Ф. Аверин, Н. И. Простов, В. И. Логинов, А. К. Некрасов // Проблемы повышения эффективности пожарной техники. – 1988. – С. 98–104.

10. Котова А. К., Молокоедова И. В., Томаков М. В. Проблемы и правила ухода за спецодеждой // Актуальные проблемы экологии и охраны труда: сборник статей VIII Международной научно-практической конференции (12 мая 2016 года) / Юго-Зап. гос. ун-т. – Курск, 2016. – Ч. 2. С. 94–99.

11. Барсукова О. В., Бабенко О. Б., Бакал В. П. Рекомендації з використання тканин з мембранним покриттям під час проектування та виготовлення спеціальних видів зимового форменого одягу // Спеціальна техніка. – 2014. – С. 60-74

12. Герасимов М.Н., Махов О.Н. Современные материалы для спецодежды зарубежных фирм / Тезисы докладов международной научно-технической конференции. — Иваново, 2001. — С. 16–28.

13. Озонирование – дезинфекция как дополнительная услуга в химчистке и не только [Электронный ресурс]. – URL: <http://ozonesystems.com.ua> (дата обращения: 06.11.2016).

14. Пончек М. И. Устройства для обеспыливания спецодежды. Обзоры по межотраслевой тематике. М., ГОСИНТИ № 1/80—70, 1970.

15. Андрейченко Л.М. Вопрос об улучшении санитарного режима специальной одежды шахтеров // Название журнала: Гигиена Труда и Профессиональные Заболевания; 1989 С. 43-44

16. Алимов А. С. Практическое применение электронных ускорителей / А. С. Алимов. – Москва: Препринт НИИЯФ МГУ № 2011-13/877, 2011. – 41 С.

17. Ливингстон Стенли М. Ускорители: Установки для получения заряженных частиц больших энергий / М. Стенли, Ливингстон // Пер. с англ. Э. Л. Бурштейна; Под ред. [и с предисл.] М. С. Рабиновича. – Москва: Изд-во иностр. лит. – 1956. – 148 С.

18. Айзацкий Н. И. Радиационные технологии с применением электронного и тормозного излучений / Н. И. Айзацкий, В. Н. Борискин, А. Н. Довбня, А. И. Зыков, Э. С. Злуницын, С. П. Карасев, М. А. Красноголовец, В. А. Попенко, Г. Д. Пугачев, Ю. Д. Тур, В. Л. Уваров, Г. Л. Фурсов // Вопросы атомной науки и техники. — 1999. — № 1. — С. 61-63.

19. Борискин В. Н. Развитие радиационных технологий и испытаний в НИК «Ускоритель» ННЦ ХФТИ / В. Н. Борискин, С. А. Ванжа, В. Н. Верещака и др. // Вопросы атомной науки и техники. — 2008. — № 5. — С. 150-154.

20. Титов Д. В. Метод измерения поглощенной дозы при обработке продукции на линейном ускорителе электронов / Д. В. Титов, Е. Л. Ноздрачева, В. А. Шевченко // Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Серія : Електроенергетика та перетворювальна техніка. Прилади та методи контролю та визначення складу речовин. - 2014. - № 19. - С. 58-64.

21. Методические указания к лабораторному практикуму по курсам "Санитарная микробиология", "Санитарно-микробиологический контроль на производстве", КПВ "Микробиология" / ВСГТУ ; сост. Е. Г. Инешина, С. В. Гомбоева. - Улан-Удэ: [б.и], 2006. - 89 С.

22. Салах Саван Ибрахим А. Вычислительные методы дозиметрии высокоэнергетического электронного излучения в радиационных технологиях: дис. канд. техн. наук : 01.05.02 / Салах, Саван Ибрахим А. — Харьков, 2016. — 169 С.

23. Agostinelli S. GEANT4 – a simulation toolkit / S. Agostinelli, J. Allison, K. Amako, J. Apostolakis, H. Araujo, P. Arce, M. Asai, D. Axen, S. Banerjee, G. Barrant, et al. // Nuclear instruments and methods in physics research section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. – 2003. – 506(3). – P. 250-303. – doi:10.1016/S0168-9002(03)01368-8.

24. Allison J. GEANT4 developments and applications / J. Allison, K. Amako, J. Apostolakis, H. Araujo, P. A. Dubois, M. Asai, G. Barrant, R. Capra, S. Chauvie, R. Chytracsek, et al. // IEEE Transactions on Nuclear Science. – 2006. – 53(1). – P. 270-278. doi:10.1109/TNS.2006.869826.

25. Моргунов В. В. Численное моделирование определения радиационно-защитных показателей материалов для создания рабочей одежды / В. В. Моргунов, Е. Н. Черняк, Н. В. Диденко // Комунальне господарство міст. – 2015. – №120(1). – С. 42–49.

26. Berger M. J. Stopping-power and range tables for electrons, protons, and helium ions / M. J. Berger, J. Coursey, M. Zucker, J. Chang // NIST Physics Laboratory.– 1998.

27. Борискин, В. Н., Ванжа, С. А., Верещака, В. Н., Довбня, А. Н., Злуницын, Э. С., Зыков, А. И., Уваров, В. Л. (2008). Развитие радиационных технологий и испытаний в НИК «Ускоритель» ННЦ ХФТИ. Вопросы атомной науки и техники.