

**НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ  
ІНСТИТУТ ЯДЕРНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ**

**НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ  
ІНСТИТУТ ЯДЕРНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ**

Кваліфікаційна наукова  
праця на правах рукопису

**КОВАЛІНСЬКА ТЕТЯНА ВОЛОДИМИРІВНА**

УДК: 621.384.644.3

**ДИСЕРТАЦІЯ**

**ВИКОРИСТАННЯ ІОНІЗУЮЧОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ  
В ІННОВАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЯХ**

**01.04.16 - фізика ядра, елементарних частинок та високих енергій**

Подається на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідні джерела.

\_\_\_\_\_ Т.В. Ковалінська

Науковий консультант:

доктор технічних наук,

старший науковий співробітник

головний науковий співробітник

відділу структури ядра

Інституту ядерних досліджень НАН України

Сахно Віктор Іванович

**Київ 2021**



## АНОТАЦІЯ

***Ковалінська Т.В. Використання іонізуючого випромінювання в інноваційних технологіях. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.***

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 01.04.16 – фізика ядра, елементарних частинок і високих енергій. Інститут ядерних досліджень НАН України. Київ, 2021.

Досліджено проблеми використання ядерної енергії для технологічного розвитку суспільства. Дисертація охоплює перспективні ядерні та радіаційні технології покращення будівельних матеріалів, високоякісних продуктів харчування, промислової дезінфекції та стерилізації, функціональні радіаційні випробування і сертифікацію техніки та матеріалів для об'єктів критичної інфраструктури, використання ядерної енергії для вирішення актуальних проблем медицини, дослідницьку та промислову техніку для реалізації інноваційних радіаційних технологій виробництва.

Основне завдання – розробити шляхи вирішення фізико-технічних проблем використання ядерної енергії в різних галузях промисловості. Метою є поглиблене дослідження ефектів взаємодії радіації з матерією, перспективних для практичного використання в реальних технологічних процесах, дослідження та розробка технічних засобів для фундаментальних і прикладних досліджень даного напрямку, розробка технологій, перспективних для використання в різних галузях промисловості.

Виявлено оригінальний економічно і енергетично вигідний напрямок застосування заряджених частинок низьких та наднизьких енергій для модифікації органічної сировини при виробництві харчових продуктів та деяких інших технологічних процесах, пов'язаних з сучасними високомолекулярними сполуками і матеріалами. Розроблено наукові основи проектування радіаційної техніки для досліджень та реалізації технологічних процесів, пов'язаних з опромінюванням іонами низьких та наднизьких енергій. Розроблено ряд установок для опромінювання

іонами в лабораторних дослідженнях, при розробці методів використання іонів, для випробувань та здійснення практичних технологій в галузі виробництва харчових продуктів. Започатковано та експериментально випробувано оригінальний напрямок радіаційних технологій, пов'язаний з використанням заряджених частинок низької та наднизької енергії.

Удосконалено традиційні напрямки прогресу промислових технологій, пов'язаних з мирним використанням ядерної енергії. Удосконалено методики знешкодження патогенної мікрофлори в готових промислових харчових продуктах без впливу на їхні поживні та смакові показники. Їх впровадження дозволяє запобігати виникненню епідеміологічних проблем, що поширюються через харчові продукти та сировину. Запропоновано оригінальні шляхи використання ядерної енергії як технологічного інструменту активної модифікації сировини в безпечні для споживання дієтичні високоякісні продукти харчування з заданими властивостями.

Узагальнено результати досліджень шляхів прогресу техніки генерації іонізуючих випромінювань, необхідної для забезпечення поступального розвитку практичних методів застосування ядерної енергії в промислових процесах. Отримали подальший розвиток конструкції технічних засобів генерації, транспортування, експериментальних робіт та допоміжних технічних засобів для розробок технологій з іонізуючими випромінюваннями. Модернізовано радіаційний комплекс ІЯД, який забезпечить фундаментальні дослідження і прикладні роботи в широкому діапазоні енергій іонізуючих випромінювань в різних галузях реальної промисловості. Запропоновано перспективний шлях створення радіаційних комплексів – імітаторів різних факторів ядерної енергії. Досліджено можливості таких імітаторів. Експериментально доведено, що об'єднання низки ядерно-фізичної техніки на вирішення цільової прикладної програми – це найефективніший шлях корисного практичного використання цієї дорогої сучасної техніки. За допомогою імітаторів в ІЯД розроблено оригінальні технології термостійких ядерних мембран підвищеної міцності, удосконалено комплексні технології функціональних випробувань обладнання критичної сфери на предмет надійності роботи в екстремальних ситуаціях (умовах експлуатації), технології дослідження реальної

функціональності нових матеріалів, підвищення функціональної ефективності лікарських засобів.

Наведено інноваційні технології, розроблені та реалізовані на удосконаленій радіаційній техніці для харчового виробництва, промислової індустрії, медицини. Створено оригінальні композитні цементуючі системи, які надали можливість виробляти радіаційно модифікований композитний полімербетон, що різко переважає усі існуючі типи сучасних промислових бетонів за показниками міцності, корозійної стійкості, стирання, морозостійкості та стійкості до агресивних середовищ. Запропоновано нові підходи до промислової гідрофобізації готових цементних виробів, пов'язані з залучення ядерної енергії та сучасних силіконових модифікаторів. Розроблено радіаційну технологію отримання (виробництва) нового покрівельного органо-мінерального композитного матеріалу з тривалою експлуатацією в будь-яких кліматичних умовах, радіаційну технологію гідрофобізації конструкційних будівельних матеріалів з дерева.

Наведено нові напрямки радіаційних технологій для вирішення екологічних проблем пов'язаних зі знешкодженням інфікованих стоків інфекційних відділень лікарень, полімерних відходів від зношених промислових і побутових виробів (вторинних полімерів). Розроблено шлях їх використання для виготовлення дорожнього покриття підвищеної якості за рахунок модифікації природного зв'язуючого (бітуму) вторинними полімерами.

**Ключові слова:** іонізуюче випромінювання, ядерна енергія, електрони, іони, радіаційні дослідження, радіаційна модифікація матеріалів, радіаційна техніка, радіаційні технології, технологічна дозиметрія, імітатори, композитні матеріали, радіаційна дезінфекція, гідрофобізація.

## ABSTRACT

***Kovalinska T. Using ionized irradiation in radiation technologies. – Qualification scientific paper, manuscript copyright.***

Dissertation for the Doctor of Technical Sciences degree major in 01.04.16 – physics of nucleus, elementary particles, and high energies. – Institute for Nuclear Research, National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, 2021.

The problems of using nuclear energy for the technological development of the society are researched. The dissertation encompasses promising nuclear and radiation technologies of improving building materials, high quality food, industrial disinfection and sterilization, functional radiation testing and certification of equipment and materials for critical infrastructure, the usage of nuclear energy for solving actual problems of medicine, research, and industrial equipment for the implementation of innovative radiation technologies of the production.

The main task is to develop the ways of solving physical and technical problems of nuclear energy usage in various industries. The aim is a profound research of the effects of the interaction of radiation with the substance which are promising for practical usage in real technological processes, research and development of technical means for the fundamental and applied research in this area, the development of technologies that are promising to use in various sectors of the economy.

The original, not yet widespread but economically and energy-efficient direction of using charged particles of low and ultra-low energies for the modification of organic raw materials in food production and some other technological processes was discovered. These processes are connected with modern macromolecular compounds and materials. Scientific basics of projecting radiation technics for the research and realization of technological processes connected with irradiation with ions of low and ultra-low energies are developed. A set of installations for irradiation with ions in laboratory research was developed, in searching of methods of using ions for testing and implementation of

practical technologies in the food production branch. The ordinal direction of radiation technologies was initiated and experimentally tested. This direction is connected with the usage of charged particles of low and ultra-low energy.

The traditional directions of progress of industrial technologies, related to the peaceful use of nuclear energy, were improved. Methods of neutralization of pathogenic microflora in ready-to-use industrial food products without any influence on their nutritional and gustatory qualities were improved. Their implementation allows to prevent epidemiological problems that are spread through food and raw materials. Original ways of using nuclear energy as a technological tool of active modification of raw materials into dietary high quality food products that are safe for consumption, with pre-determined properties are offered.

The research results of the ways of progress of ionizing irradiation generation technique, necessary for the progressive development of practical methods of nuclear energy use in industrial processes are generalized. Further development was received in the construction of technical means of generation, transportation, experimental work and auxiliary technical means for the development of technologies with ionizing irradiation. The radiation complex of the Institute of Nuclear Research was modernized, which will provide basic research and applied work in a wide range of ionizing irradiation energies in various branches of the real industry. The creation of radiation complexes – simulators of various factors of nuclear energy was offered as a perspective way. The capacities of such simulators were researched. It was experimentally proven that combining a number of nuclear and physics techniques for solving the targeted applied programme is the most effective way of using this expensive modern technology. At the Institute of Nuclear Research, with the help of simulators, original technologies of heat-resistant nuclear membranes of high strength were developed, complex technologies of functional testing of critical sphere equipment for the reliability of functioning in extreme situations (operating conditions) were improved, as well as research technologies of the real functionality of new materials, and improvement of the efficiency of drugs.

Innovative technologies which were developed and implemented on the improved radiation technique for food production, industry, and medicine were presented. Original

composite cementing systems were created, which made it possible to produce radiation-modified composite polymer concrete which is much better than all existing types of modern industrial concretes regarding their strength, corrosion resistance, abrasion, frost resistance and resistance to aggressive environments. New approaches to the industrial hydrophobization of finished cement products, connected with the involvement of nuclear energy and modern silicone modifiers were offered. Radiation technology for obtaining (production) of the new roofing organic-mineral composite material with long-term operation in any climatic conditions, and radiation technology for the hydrophobization of structural building materials of wood were developed.

New directions of radiation technologies for solving ecological problems connected with the neutralization of infected drains from infectious departments of hospitals, polymeric waste from the worn-out industrial and household products (secondary polymers) were presented. The way of their usage for the production of the high-quality road surface through the modification of natural binding (bitumen) with secondary polymers was developed.

**Key words:** Ionizing radiation, nuclear energy, electrons, ions, radiation research, radiation modification of materials, radiation technology, radiation technology, technological dosimetry, simulators, composite materials, radiation disinfection, hydrophobization.



## СПИСКИ НАУКОВИХ ПРАЦЬ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

*Список наукових праць, в яких опубліковано основні наукові результати дисертації (без праць у журналах за матеріалами конференцій)*

### Монографія

1. Вишневський І.М., Гайдар Г.П., Коваленко О.В., **Ковалінська Т.В.**, Коломієць М.Ф., Липська А.І., Литовченко П.Г., Сахно В.І., Шевель В.М. Радіаційні та ядерні технології в Інституті ядерних досліджень НАН України : монографія. Київ : Ін-т ядерних досліджень, 2014. 176 с.

### Статті у наукових фахових виданнях

2. Зелінський А.Г., Желтоножский В.А., Сахно В.И., **Ковалинская Т.В.**, Халова Н.В. Применение технологического ускорителя электронов для ядерных исследований. *Ядерна фізика та енергетика*. 2011. Т.12. №3. С. 311–315.

3. **Ковалінська Т.В.**, Остапенко І.А., Сахно В.І., Зелінський А.Г. Шляхи вдосконалення радіаційної техніки для кваліфікації обладнання АЕС. *Ядерна фізика та енергетика*. 2013. Т.14. №1. С. 91–96.

4. Ahmedzade P., Fainleib A., Günay T., Starostenko O., **Kovalinska T.** Effect of Gamma Irradiated Recycled Low Density Polyethylene on the High and Low Temperature Properties of Bitumen. *International Journal of Polymer Science*. 2013. vol. 2013. 07/2013. Article ID 141298. P. 9.

5. **Ковалінська Т.В.** Електромеханічний прилад для контролю конфігурації пучка електронів потужного промислового прискорювача радіаційної установки. *Науковий вісник Ужгородського університету. Серія фізика*. 2014. №35. С. 131–135.

6. Остапенко І.А., **Ковалінська Т.В.**, Сахно В.І. Проект удосконаленого дослідницького радіаційного комплексу ІЯД НАН України. *Науковий вісник Ужгородського університету. Серія фізика*. 2014. №35. С. 167–171.

7. **Ковалінська Т.В.** Радіаційні технології в різних галузях економіки. *Вісник НАНУ*.

*Розробки Інституту ядерних досліджень НАН України. 2014. №12. С. 64–69.*

8. **Kovalinska T.V.**, Zelinskyi A.G., Sakhno V.I., Fainleib O.M., Kolesnik D.Yu., Sheinich L.O. Physical and technological basics and new generation technologie of radiation-modified polymer concrete. *Науковий вісник Ужгородського університету. Серія фізика. 2015. №37. С. 116–122.*

9. Остапенко І.А., **Ковалінська Т.В.**, Сахно В.І. Характеристики лічильника СИ5007 в оберненому включенні. *Науковий вісник Ужгородського університету. Серія фізика. 2015. №38. С. 141–148.*

10. Михнева Е.Г., **Ковалинская Т.В.**, Сахно В.И. Радиационные технологии переработки моллюсков. *Науковий вісник Ужгородського університету. Серія фізика. 2015. №38. С. 171–177.*

11. **Ковалінська Т.В.**, Остапенко І.А., Сахно В.І. Технологія рівномірного електронного опромінення промислових виробів великих габаритів. *Ядерна фізика та енергетика. 2016. Т. 17. № 2. С. 199–203.*

12. **Ковалінська Т.В.**, Сахно В.І., Іванов Ю.В., Міхнева Є.Г., Зелінський А.Г. Радіаційна технологія гідрофобізації будівельних матеріалів. *Ядерна фізика та енергетика. 2016. Т. 17. № 4. С. 418–424.*

13. **Ковалінська Т.В.**, Сахно В.І., Іванов Ю.В. Експлуатація промислового прискорювача електронів при мінімальній інтенсивності пучка. *Ядерна фізика та енергетика. 2018. Т. 19. № 3. С. 293–298.*

14. Борзаковський А.Є., **Ковалінська Т.В.**, Сахно В.І., Хомич І.А. Удосконалення технології виготовлення трекових мембран. *Ядерна фізика та енергетика. 2018. Т. 19. № 4. С. 400–405.*

15. **Ковалінська Т.В.**, Жернов О.А., Сахно В.І., Маєвська Т.М., Іванов Ю.В., Ніколаєв В.Г., Сахно Л.О., Шлапацька В.В. Дослідження можливостей застосування продуктів радіолізу води в медичних цілях. *Науковий вісник Ужгородського університету. Серія фізика. 2018. Том 43. С.137-146.*

16. **Ковалінська Т.В.**, Сахно В.І. Електрофізичний імітатор ушкоджуючих факторів ядерної енергії. *Ядерна фізика та енергетика. 2019. Т. 20. № 1. С. 84–89.*

17. Хомич І.А., **Ковалінська Т.В.**, Сахно В.І. Радіаційні проблеми функціональних

випробувань обладнання АЕС на електрофізичній установці ІЯД НАН України. *Національний вісник Ужгородського університету. Серія Фізика*. 2019. №45. С. 61–72.

18. **Ковалінська Т.В.**, Борзаковський А.Є., Сахно В.І., Файнлейб О.М., Григор'єва О.П., Старостенко О.М., Гусакова К.Г., F. Gouanve, E. Espuche, D. Grande. Дослідження перспектив створення трекових мембран з поліціануратів на радіаційному комплексі ІЯД НАН України. *Полімерний журнал*. 2019. №3. С. 159–166.

19. Хомич І.А., **Ковалінська Т.В.**, Сахно В.І., Іванов Ю.В. Проблеми та засоби формування радіаційних полів для функціональних випробувань і кваліфікації електротехнічного обладнання АЕС. *Ядерна фізика та енергетика*. 2019. Т. 20. № 4. С. 420–427.

20. **Ковалінська Т.В.**, Хомич І.А., Сахно В.І., Іванов Ю.В., Мельниченко О.В., Шлапацька В.В. Радіаційні функціональні дослідження тонких полімерних плівок для кваліфікації на використання в критичному обладнанні ядерних об'єктів. *Національний вісник Ужгородського університету. Серія Фізика*. 2020. №47. С. 63–73.

21. Хомич І.А., **Ковалінська Т.В.**, Сахно В.І., Іванов Ю.В. Ефективність та перспективи реалізації заходів кваліфікації обладнання, важливого для безпеки у вітчизняній ядерній енергетиці. *Ядерна фізика та енергетика*. 2020. Т.21. №4. С. 369–376.

22. **Ковалінська Т.В.**, Сахно В.І., Іванов Ю.В., Шлапацька В.В., Мельниченко О.В., Файнлейб А.М., Григор'єва О.П., Старостенко О.М., Grande D. Функціональні випробування полімерних плівок щільними електронними пучками. *Полімерний журнал*. 2020. №4. С. 254–261.

23. Grigoryeva O., Fainleib A., Starostenko O., Gusakova K., Sakhno V., Borzakovskiy A., **Kovalinska T.**, Youssef B., Gouanve F., Espuche E., Grande D. Thermally Stable Nanoporous Cyanate Ester Resin/Linear Polyurethane Hybrid Networks Created by Nuclear Technologies. *Polymer*. 2021. 123831

## Патенти

24. Полімербітумна композиція: пат. 107760 Україна. № 201313780; заявл. 27.11.2013; опубл. 10.02.15, Бюл. № 3. 5 с.
25. Полімербітумна композиція: пат. №108432 Україна. № 201313781; заявл. 27.11.2013; опубл. 27.04.15, Бюл. № 8. 5 с.
26. Полімербітумна композиція: пат. №108433 Україна. № 201313782; заявл. 27.11.2013; опубл. 27.04.15, Бюл. № 8. 6 с.
27. Полімербітумна композиція пат. №108434 Україна. № 201313783; заявл. 27.11.2013; опубл. 27.04.15, Бюл. № 8. 7 с.

## *Список наукових праць, що засвідчують апробацію матеріалів дисертації*

### Матеріали міжнародних наукових конференцій

28. **Kovalinska T.V.**, Ostapenko I.A., Sakhno V.I., Zelinskyu A.G. The development of new projection methods of radiation protection of industrial radiation installations. *The 4th International conference "Current Problems in Nuclear Physics and Atomic Energy" : Proceedings*. In two parts. Part I., Kyiv, September 3-7 2012. Kyiv, 2012. P. 150–154.
29. **Kovalinska T.V.**, Ostapenko I.A., Sakhno V.I., Zelinskyu A.G. The improvement of KINR NASU experimental base and methods of nondestructive control offunctional characteristics of Nuclear Power Stations' equipment and materials. *The 4th International conference "Current Problems in Nuclear Physics and Atomic Energy"*. Proceedings. In two parts. Part I., Kyiv, September 3-7 2012. Kyiv, 2012. P. 155–159.
30. **Kovalinska T.V.**, Khalova N.V., Ostapenko I.A., Sakhno V.I., Shlapatska V.V., Zelinskyu A.G. The problems of the usage of powerful electrons accelerators for the irradiation of Nuclear Power Stations' equipment and materials. *The 4th International Conference "Current Problems in Nuclear Physics and Atomic Energy"*. Proceedings. In two parts. Part I., Kyiv, September 3-7 2012. Kyiv, 2012. P. 504–509.
31. **Ковалінська Т.В.**, Римаренко Т.І., Сахно В.І. Електрофізична інноваційна технологія рибної кулінарії з комбінації морських і прісноводних риб. *Інтегроване управління водними ресурсами*. К.: ДІА, 2013. С. 294–306.

32. **Kovalinska T.**, Sakhno V., Maievska T., Mikhneva E. Electrophysical radiation technologies in the production of food products. *Compiled by International Cooperation Department Shandong Academy of Sciences*. Jinan, 30<sup>th</sup> October 2017. Jinan, 2017. P. 36–48.

#### Тези доповідей

33. Ahmedzade P., Fainleib A., Günay T., Starostenko O., Grigoryeva O., Sakhno V., **Kovalinska T.**, Martinez-Barrera G. Modification of bitumen by gamma irradiated recycled low density polyethylene for pavement application. *ROSAM is a Polychar satellite meeting: Book of Abstracts*, Rouen, France June 3-7, 2013. Rouen, France, 2013. P. 78.

34. Ahmedzade P., Fainleib A., Grigoryeva O., Günay T., Kultayev B., Sakhno V., Starostenko O., **Kovalinska T.** Modification of bitumen by recycled post-consumer low density polyethylene with surface activated using air ion irradiation. *3<sup>rd</sup> International Conference on Sustainable Construction Materials & Technologies: Book of Abstracts*, Kyoto, Japan. August 18-21, 2013. Kyoto, Japan, 2013. P. 134.

35. **Kovalinska T.**, Sakhno V. Complex research and qualification methods of cement products for the processing, accumulation and storage of radioactive waste. *2<sup>nd</sup> International Symposium on Cement-based Materials for Nuclear Wastes*. Book of Abstracts, Avignon, France. June 3-6, 2014. Avignon, France, 2014. P. 77.

36. Бондаренко Д.В., Зелінський А.Г., **Ковалінська Т.В.**, Лебська Т.К., Сахно В.І., Халова Н.В. Дослідження шляхів адаптації аероіонних технологій до виробництва в'яленої продукції з чорноморських видів риби. *XIX щорічна конференція Інституту ядерних досліджень НАН України: зб. тез доп. наук.-практ. конф., м. Київ, 24-27 січня 2012 р. Київ, 2012. С. 154–155.*

37. Зелінський А.Г., **Ковалінська Т.В.**, Лебська Т.К., Голембовська Н.В., Сахно В.І., Халова Н.В. Дослідження ефективності використання пікохвильових технологій ІЯД НАН України для виробництва пресервів з прісноводних риби. *XIX щорічна конференція Інституту ядерних досліджень НАН України: зб. тез доп. наук.-практ. конф., м. Київ, 24-27 січня 2012 р. Київ, 2012. С. 156–157.*

38. Зелінський А.Г., **Ковалінська Т.В.**, Лебська Т.К., Маєвська Т., Сахно В.І., Халова Н.В. Дослідження процесів радіаційної модифікації міофібрилярних білків у харчових продуктах. *XIX щорічна конференція Інституту ядерних досліджень НАН України*: зб. тез доп. наук.-практ. конф., м. Київ, 24-27 січня 2012 р. Київ, 2012. С.161.
39. Зелінський А.Г., **Ковалінська Т.В.**, Лебська Т.К., Міхнева К., Сахно В.І., Халова Н.В. Експериментальне дослідження впливу електронного опромінювання на структурно-механічні властивості тканин рапани, восьминогів та кальмарів на радіаційній установці ІЯД НАН України. *XIX щорічна конференція Інституту ядерних досліджень НАН України*: зб. тез доп. наук.-практ. конф., м. Київ, 24-27 січня 2012 р. Київ, 2012. С.162.
40. Вишневський І.М., Зелінський А.Г., **Ковалінська Т.В.**, Остапенко І.А., Пилипець Д.Т., Сахно В.І., Халова Н.В. Дослідження проблем використання радіаційної установки ІЯД НАН України в технологіях нових конструкційних матеріалів в ядерній енергетиці. *XIX щорічна конференція Інституту ядерних досліджень НАН України*: зб. тез доп. наук.-практ. конф., м. Київ, 24-27 січня 2012 р. Київ, 2012. С. 96–97.
41. **Ковалінська Т.В.**, Остапенко І.А., Сахно В.І., Вишневський І.М. Перспективи розвитку експериментальної бази радіаційних досліджень ІЯД НАН України. *XX щорічна конференція Інституту ядерних досліджень НАН України*: зб. тез доп. наук.-практ. конф., м. Київ, 28 січня-1 лютого 2013 р. Київ, 2013. С. 102.
42. Вишневський І.М., **Ковалінська Т.В.**, Сахно В.І. Історія, стан та перспективи розвитку радіаційних технологій в ІЯД НАН України. *XX щорічна конференція Інституту ядерних досліджень НАН України*: зб. тез доп. наук.-практ. конф., м. Київ, 28 січня-1 лютого 2013 р. Київ, 2013. С. 116.
43. **Ковалінська Т.В.**, Остапенко І.А., Сахно В.І., Желтоножський В.О. Актуальність дослідження впливу іонізуючих випромінювань та заряджених частинок низьких енергій на функціональні характеристики обладнання для ядерної енергетики. *XX щорічна конференція Інституту ядерних досліджень НАН України*: зб. тез доп. наук.-практ. конф., м. Київ, 28 січня-1 лютого 2013 р. Київ, 2013. С. 102.

44. Зелінський А.Г., **Ковалінська Т.В.**, Остапенко І.А., Сахно В.І. Дослідження радіаційної стійкості конструкційних матеріалів АЕС України. *XX щорічна конференція Інституту ядерних досліджень НАН України*: зб. тез доп. наук.-практ. конф., м. Київ, 28 січня-1 лютого 2013 р. Київ, 2013. С. 103.
45. **Ковалінська Т.В.**, Остапенко І.А., Сахно В.І., Зелінський А.Г., Халова Н.В. Проблеми оптимізації опромінювання промислових виробів. *XX щорічна конференція Інституту ядерних досліджень НАН України*: зб. тез доп. наук.-практ. конф., м. Київ, 28 січня-1 лютого 2013 р. Київ, 2013. С. 114.
46. **Ковалінська Т.В.**, Зелінський А.Г., Сахно В.І., Остапенко І.А., Халова Н.В., Шлапацька В.В. Проблеми технологічної дозиметрії радіаційних процесів. *XX щорічна конференція Інституту ядерних досліджень НАН України*: зб. тез доп. наук.-практ. конф., м. Київ, 28 січня-1 лютого 2013 р. Київ, 2013. С. 115.
47. Корсаньскы Р., **Kovalinska T.**, Sakhno V. The radiation stability of magnetic fluids for bioapplications and technical applications. *Міжнародна конференція молодих учених і аспірантів «ІЕФ-2013»*: матеріали конф. м. Ужгород, 20-23 травня 2013 р. Ужгород, 2013. С. 57–58.
48. **Ковалінська Т.В.** Електромеханічний прилад для контролю конфігурації пучка електронів потужного промислового прискорювача радіаційної установки. *Міжнародна конференція молодих учених і аспірантів «ІЕФ-2013»*: матеріали конф. м. Ужгород, 20-23 травня 2013 р. Ужгород, 2013. С. 297–298.
49. **Ковалінська Т.В.**, Остапенко І.А., Сахно В.І. Проект удосконаленого дослідницького радіаційного комплексу ІЯД НАН України. *Міжнародна конференція молодих учених і аспірантів «ІЕФ-2013»*: матеріали конф. м. Ужгород, 20-23 травня 2013 р. Ужгород, 2013. С. 299–300.
50. **Ковалінська Т.В.**, Сахно В.І. Аналіз результатів радіаційних випробувань магнітних рідин і обговорення перспектив радіаційних технологій створення магнетизованих біопрепаратів. *Міжнародна конференція молодих учених і аспірантів «ІЕФ-2013»*: матеріали конф. м. Ужгород, 20-23 травня 2013 р. Ужгород, 2013. С. 116–117.

51. **Ковалінська Т.В.**, Вишневський І.М., Остапенко І.А., Сахно В.І., Файнлейб А.М. Методи дослідження і кваліфікації цементних виробів для переробки та зберігання радіоактивних відходів. *XXI щорічна конференція Інституту ядерних досліджень НАН України*: зб. тез доп. наук.-практ. конф., м. Київ, 27-31 січня 2014 р. Київ, 2014. С. 108.
52. Остапенко І.А., Вишневський І.М., **Ковалінська Т.В.**, Сахно В.І. Дослідження параметрів поля радіаційної установки ІЯД НАН України з метою проведення кваліфікаційних випробувань обладнання АЕС. *XXI щорічна конференція Інституту ядерних досліджень НАН України*: зб. тез доп. наук.-практ. конф., м. Київ, 27-31 січня 2014 р. Київ, 2014. С. 114.
53. Сахно В.І., Вишневський І.М., Зелінський А.Г., **Ковалінська Т.В.**, Остапенко І.А., Халова Н.В. Дослідження та розробка прискорювача 0,5 МеВ для експериментального радіаційного комплексу. *XXI щорічна конференція Інституту ядерних досліджень НАН України*: зб. тез доп. наук.-практ. конф., м. Київ, 27-31 січня 2014 р. Київ, 2014. С. 121.
54. Сахно В.І., **Ковалінська Т.В.**, Вишневський І.М., Зелінський А.Г., Остапенко І.А. Удосконалена система вимірювань змішаних  $\beta$ -,  $\gamma$ -полів у реакційній камері радіаційної установки ІЯД НАН України. *XXII щорічна конференція Інституту ядерних досліджень НАН України*: зб. тез доп. наук.-практ. конф., м. Київ, 26-30 січня 2015 р. Київ, 2015. С. 109.
55. Сахно В.І., **Ковалінська Т.В.**, Вишневський І.М., Зелінський А.Г., Остапенко І.А. Техніка та методи радіаційних вимірювань у дослідженнях на пучках електронів 4 МеВ радіаційної установки ІЯД. *XXII щорічна конференція Інституту ядерних досліджень НАН України*: зб. тез доп. наук.-практ. конф., м. Київ, 26-30 січня 2015 р. Київ, 2015. С. 109–110.
56. Сахно В.І., **Ковалінська Т.В.**, Вишневський І.М., Зелінський А.Г., Остапенко І.А., Халова Н.В. Дослідження та розробка прискорювача 0.5 МеВ для експериментального радіаційного комплексу. *XXII щорічна конференція Інституту ядерних досліджень НАН України*: зб. тез доп. наук.-практ. конф., м. Київ, 26-30 січня 2015 р. Київ, 2015. С. 110–111.



57. Вишневецький І.М., Гайдар Г.П., Коваленко О.В, **Ковалінська Т.В.**, Коломієць М.Ф, Липська А.І., Литовченко П.Г., Сахно В.І., Шевель В.М. Радіаційні та ядерні технології в Інституті ядерних досліджень НАН України. *XXII щорічна конференція Інституту ядерних досліджень НАН України*: зб. тез доп. наук.-практ. конф., м. Київ, 26-30 січня 2015 р. Київ, 2015. С. 120.
58. **Ковалінська Т.В.** Актуальні напрямки радіаційних технологій. *XXII щорічна конференція Інституту ядерних досліджень НАН України*: зб. тез доп. наук.-практ. конф., м. Київ, 26-30 січня 2015 р. Київ, 2015. С. 126.
59. **Ковалінська Т.В.**, Зелінський А.Г., Сахно В.І., Файнлейб О.М., Колесник Д.Ю., Шейніч Л.О. Фізико-технічні основи і технологія нового покоління радіаційно-модифікованого полімербетону. *Міжнародна конференція молодих учених і аспірантів «ІЕФ-2013»*: матеріали конф. м. Ужгород, 18-22 травня 2015 р. Ужгород, 2015. С. 141–142.
60. Остапенко І.А., **Ковалінська Т.В.**, Сахно В.І. Дослідження нетрадиційних методів вимірювання інтенсивних змішаних радіаційних полів. *Міжнародна конференція молодих учених і аспірантів «ІЕФ-2013»*: матеріали конф. м. Ужгород, 18-22 травня 2015 р. Ужгород, 2015. С.177–178.
61. Михнева Е.Г., **Ковалинская Т.В.**, Сахно В.И. Радиационные технологии переработки. *Міжнародна конференція молодих учених і аспірантів «ІЕФ-2013»*: матеріали конф. м. Ужгород, 18-22 травня 2015 р. Ужгород, 2015. С. 154–155.
62. **Ковалінська Т.В.**, Зелінський А.Г., Міхнева Є.Г., Сахно В.І. Розробка і випробування радіаційних технологій промислової дезінфекції готових харчових продуктів. *XXIV щорічна конференція Інституту ядерних досліджень НАН України*: зб. тез доп. наук.-практ. конф., м. Київ, 10-13 квітня 2017 р. Київ, 2017. С. 201–203.
63. **Ковалінська Т.В.**, Іванов Ю.В., Зелінський А.Г., Міхнева Є.Г., Сахно В.І., Хамбір С.І. Радіаційна модифікація пористих будівельних матеріалів. *XXIV щорічна конференція Інституту ядерних досліджень НАН України*: зб. тез доп. наук.-практ. конф., м. Київ, 10-13 квітня 2017 р. Київ, 2017. С. 145–146.
64. **Ковалинская Т.В.**, Сахно В.И., Михнева Е.Г. Электрофизика – инновационное технологическое направление в производстве продуктов питания из гидробионтов.

- VII Міжнародна науково-практична конференція вчених, аспірантів і студентів НУБіП України: збірник праць, м. Київ, 27-28 квітня 2017 р. Київ, 2017. С. 247–248.*
65. Сахно В.И., Михнева Е.Г., **Ковалинская Т.В.**, Лебская Т.К. Исследование возможностей применения ионизирующих излучений в качестве инструмента пищевых технологий. *VII Міжнародна науково-практична конференція вчених, аспірантів і студентів НУБіП України: збірник праць, м. Київ, 27-28 квітня 2017 р. Київ, 2017. С. 253–254.*
66. **Ковалинская Т.В.**, Михнева Е.Г., Сахно В.И., Голембовская И.В. Ионные технологии в переработке рыбы. *VII Міжнародна науково-практична конференція вчених, аспірантів і студентів НУБіП України: збірник праць, м. Київ, 27-28 квітня 2017 р. Київ, 2017. С. 254–255.*
67. Иванов Ю.В., Сахно В.І., **Ковалінська Т.В.**, Жернов О.А., Зелінський А.Г., Сахно Л.О., Ніколаєв В.Г. Модернізація радіаційної установки СРТ для медико-біологічних досліджень in-vivo. *XXV щорічна конференція Інституту ядерних досліджень НАН України: зб. тез доп. наук.-практ. конф., м. Київ, 16-20 квітня 2018 р. Київ, 2018. С. 128–129.*
68. Сахно В.І., Иванов Ю.В., **Ковалінська Т.В.**, Жернов О.А., Зелінський А.Г. Дослідження шляхів експлуатації потужного промислового прискорювача при низьких і наднизьких струмах пучка. *XXV щорічна конференція Інституту ядерних досліджень НАН України: зб. тез доп. наук.-практ. конф., м. Київ, 16-20 квітня 2018 р. Київ, 2018. С. 140–141.*
69. Сахно В.І., Жернов О.А., **Ковалінська Т.В.**, Сахно Л.О., Ніколаєв В.Г., Иванов Ю.В. Аналіз спектра гідролізатів радіаційної технології модифікації медичних розчинів. *XXV щорічна конференція Інституту ядерних досліджень НАН України: зб. тез доп. наук.-практ. конф., м. Київ, 16-20 квітня 2018 р. Київ, 2018. С. 225–226.*
70. **Ковалінська Т.В.**, Сахно В.І., Иванов Ю.В., Хомич І.А., Маєвська Т.І. Розробки радіаційних технологій гідролізних наноматеріалів для ядерної та традиційної медицини. *XXVI щорічна конференція Інституту ядерних досліджень НАН України: зб. тез доп. наук.-практ. конф., м. Київ, 8-12 квітня 2019 р. Київ, 2019. С. 104–105.*

71. Борзаковський А.Є., **Ковалінська Т.В.**, Сахно В.І., Іванов Ю.В., Куц В.І., Боровець М.І., Рилошко В.О., Фанлейб О.М. Дослідження перспектив реалізації трекових технологій нанопористих матеріалів на ядерно-фізичних радіаційних установках ІЯД НАН України. *XXVI щорічна конференція Інституту ядерних досліджень НАН України*: зб. тез доп. наук.-практ. конф., м. Київ, 8-12 квітня 2019 р. Київ, 2019. С. 104.
72. Хомич І.А., Сахно В.І., **Ковалінська Т.В.** Аналіз результатів кваліфікації обладнання у вітчизняній атомній енергетиці. *XXVII щорічна конференція Інституту ядерних досліджень НАН України. До 50-річчя ІЯД НАН України*: зб. тез доп. наук.-практ. конф., м. Київ, 21-25 вересня 2020 р. Київ, 2020. С. 153–154.
73. **Ковалінська Т.В.**, Іванов Ю.В., Сахно В.І., Файнлейб О.М., Григор'єва О.П., Старостенко О.М., Мельниченко О.В., Шлапацька В.В., Пилипенко А.М. Дослідження радіаційної стійкості плівок для ядерних мембран з поліціануратів. *XXVII щорічна конференція Інституту ядерних досліджень НАН України. До 50-річчя ІЯД НАН України*: зб. тез доп. наук.-практ. конф., м. Київ, 21-25 вересня 2020 р. Київ, 2020. С. 164–165.
74. **Ковалінська Т.В.**, Іванов Ю.В., Сахно В.І. Імітація уражуючих факторів ядерного впливу. *XXVII щорічна конференція Інституту ядерних досліджень НАН України. До 50-річчя ІЯД НАН України*: зб. тез доп. наук.-практ. конф., м. Київ, 21-25 вересня 2020 р. Київ, 2020. С. 166–167.
75. Лебська Т.К., Борисенко Р.В., Бондаренко Є.В., **Ковалінська Т.В.**, Сахно В.І. Перспективи аероіонних технологій у процесах в'ялення риби. *XXVII щорічна конференція Інституту ядерних досліджень НАН України. До 50-річчя ІЯД НАН України*: зб. тез доп. наук.-практ. конф., м. Київ, 21-25 вересня 2020 р. Київ, 2020. С. 254.

## ЗМІСТ

|  |           |
|--|-----------|
| <b>АНОТАЦІЯ</b>  | <b>1</b>  |
| <b>ABSTRACT</b>  | <b>4</b>  |
| <b>СПИСКИ НАУКОВИХ ПРАЦЬ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ</b>   | <b>7</b>  |
| Список наукових праць, в яких опубліковано основні наукові результати дисертації   | 7         |
| Список наукових праць, що засвідчують апробацію матеріалів дисертації  | 10        |
| <b>ВСТУП</b>   | <b>23</b> |
| <b>РОЗДІЛ 1 СТАН ПРОМИСЛОВОГО ВИКОРИСТАННЯ ЯДЕРНОЇ ЕНЕРГІЇ (РАДІАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ) У СВІТІ</b>  | <b>32</b> |
| 1.1 Досвід розробок і розвиток техніки для радіаційних технологій на основі одного джерела іонізуючих випромінювань  | 42        |
| 1.2 Промислове використання іонізуючих випромінювань в Україні   | 47        |
| 1.3 Аналіз проблем розвитку радіаційних технологій   | 51        |
| 1.4 Висновки   | 54        |
| <b>РОЗДІЛ 2 ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДІВ ВИКОРИСТАННЯ ЕНЕРГІЇ ВИПРОМІНЮВАНЬ ДЛЯ ВИРІШЕННЯ ПРОБЛЕМ В РІЗНИХ ГАЛУЗЯХ</b>  | <b>58</b> |
| 2.1 Дослідження методів використання енергії випромінювань для вирішення екологічних проблем   | 58        |
| 2.2 Дослідження вимог до технічного удосконалення експериментальної ядерно-фізичної техніки ІЯД та шляхів її залучення до вирішення сучасних потреб промислових технологій | 63        |
| 2.3 Удосконалення системи технологічної дозиметрії радіаційної установки   | 74        |
| 2.4 Розробка методів і засобів формування радіаційних полів  | 79        |
| 2.5 Дослідження ефективності формування радіаційних полів  | 82        |
| 2.6 Вирішення супутніх технічних проблем   | 87        |
| 2.7 Висновки   | 88        |
| <b>РОЗДІЛ 3 РОЗРОБКА ДОСЛІДНИЦЬКИХ КОМПЛЕКСІВ</b>  | <b>91</b> |
| 3.1. Удосконалення структури радіаційного комплексу ІЯД НАН України  | 91        |
| 3.1.1 Удосконалення експериментальної бази радіаційних досліджень в діапазоні низьких енергій  | 91        |
| 3.1.2 Удосконалення структури дослідницької радіаційної бази ІЯД НАН України   | 93        |
| 3.1.3 Проектування і монтаж нового генеруючого обладнання для модернізації діючої радіаційної установки  | 94        |
| 3.1.4 Розробка структури і вибір конструкції генератора електронів   | 99        |

|  |            |
|--|------------|
| низької енергії  |            |
| 3.1.5 Розробка радіаційної установки з генератором електронів<br>низької енергії   | 104        |
| 3.1.6 Висновки   | 108        |
| 3.2 Створення радіаційного комплексу для досліджень і прикладних<br>робіт з електронами широкого енергетичного спектру                                   | 108        |
| 3.3 Удосконалення структури радіаційного комплексу ІЯД НАНУ<br>засобами генерації важких заряджених частинок   | 110        |
| 3.3.1 Розробка техніки для технологічного опромінення іонами<br>атмосферних газів  | 110        |
| 3.3.2 Іонізація  | 116        |
| 3.3.3 Висновки   | 122        |
| 3.4 Дослідження і розробки методів формування і транспортування<br>інтенсивних пучків іонів великого перерізу  | 123        |
| 3.4.1 Дослідження ефективності розроблених методів формування<br>потоків іонів   | 124        |
| 3.4.2 Експериментальні дослідження ефективності генерації і<br>транспортування аероіонів в потенціальному полі за схемою<br>прискорювача прямої дії      | 128        |
| 3.4.3 Висновки   | 134        |
| 3.5 Дослідження методів конструювання технічних засобів<br>детектування та отримання інформації про параметри заряджених<br>частинок низької енергії     | 135        |
| 3.5.1 Метрологія іонізуючих частинок низької енергії   | 136        |
| 3.5.2 Методика вимірювань  | 139        |
| 3.5.3 Розробка конструкції іонного спектрометра  | 142        |
| 3.5.4 Розробка конструкції датчика щільності струму аероіонів  | 143        |
| 3.5.5 Висновки   | 145        |
| 3.6 Висновок   | 146        |
| <b>РОЗДІЛ 4 ДОСЛІДЖЕННЯ ПЕРСПЕКТИВНИХ НАПРЯМКІВ<br/>СТРУКТУРНОГО РОЗВИТКУ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЇ БАЗИ<br/>ПРИКЛАДНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ</b>                           | <b>151</b> |
| 4.1 Імітатори як перспективний напрямок створення техніки для<br>прикладних досліджень з використанням ядерної енергії                                   | 151        |
| 4.2 Імітатори, як перспективний напрямок створення техніки для<br>прикладних досліджень з використанням ядерної енергії.                                 | 158        |
| 4.2.1 Розробка радіаційних технологій отримання та дослідження<br>методів застосування гідролізних наноматеріалів для ядерної та<br>традиційної медицини | 158        |
| 4.2.2 Медико-біологічні результати випробувань функціональності<br>радіолізатів  | 170        |
| 4.2.3 Висновок   | 176        |

|                                      |  |            |
|--------------------------------------|--|------------|
| 4.3                                  | Дослідження ефективності імітаторів складної структури   | 177        |
| 4.3.1                                | Структура технічних засобів імітатор   | 182        |
| 4.3.2                                | Теоретичні дослідження і розрахунки  | 186        |
| 4.3.3                                | Розрахунки геометрії треків  | 187        |
| 4.3.4                                | Експерименти і випробування  | 188        |
| 4.3.5                                | Організація вузла опромінення  | 189        |
| 4.3.6                                | Методика експериментів та отримані на імітаторі результати   | 190        |
| 4.3.7                                | Розробка методів і засобів оперативної метрології в радіаційних процесах   | 191        |
| 4.3.8                                | Технологічні особливості радіаційної сенсibiliзації  | 193        |
| 4.3.9                                | Радіаційні функціональні дослідження і кваліфікація плівок поліціануратів  | 193        |
| 4.3.10                               | Розробка методики функціональних досліджень полімерних плівок  | 196        |
| 4.3.11                               | Результати функціональних досліджень плівок поліціануратів   | 198        |
| 4.3.12                               | Висновки   | 200        |
| 4.4                                  | Технічний комплекс імітації критичних ситуацій, що пов'язані з проблемами безпечного поводження з ядерною енергією | 202        |
| 4.4.1                                | Актуальність напрямку  | 203        |
| 4.4.2                                | Напрямки розробки  | 204        |
| 4.4.3                                | Дослідження і формування технічних вимог до імітатора  | 205        |
| 4.4.4                                | Технічне втілення  | 208        |
| 4.4.5                                | Перспектива розвитку комплексу   | 212        |
| 4.4.6                                | Адаптація електрофізичного генератора термоядерних нейтронів   | 214        |
| 4.4.7                                | Результати технічних розробок імітатора  | 215        |
| 4.4.8                                | Висновки   | 216        |
| <b>РОЗДІЛ 5 ІННОВАЦІЙНІ РОЗРОБКИ</b> |  | <b>217</b> |
| 5.1                                  | Аероіонні технології харчових продуктів  | 217        |
| 5.1.1                                | Дослідження стану проблеми   | 217        |
| 5.1.2                                | Дослідження механізмів модифікації структури природної органічної сировини в електрофізичних аероіонних установках | 218        |
| 5.1.3                                | Дослідження фізичних основ технологічної структуризації органічних матеріалів                                      | 227        |
| 5.1.4                                | Аналіз результатів експериментів   | 232        |
| 5.1.5                                | Висновки   | 233        |
| 5.2                                  | Розробки і випробування інноваційних іонних технологій цілеспрямованої модифікації структур органічних матеріалів  | 238        |

|   |            |
|---|------------|
| 5.3 Аероіонна технологія рибних рулетів з різної сировини   | 239        |
| 5.3.1 Дослідження процесів використання енергії іонів для гомогенізації гетерогенних структур органічних матеріалів | 239        |
| 5.3.2 Методика експерименту   | 245        |
| 5.3.3 Результати досліджень   | 247        |
| 5.3.4 Висновки  | 253        |
| 5.4 Дослідження технологічних проблем   | 254        |
| 5.4.1 Удосконалення технології  | 254        |
| 5.4.2 Постановка експерименту   | 256        |
| 5.5 Вплив іонів низької енергії на живі клітини   | 260        |
| 5.5.1 Методи і техніка експериментів  | 263        |
| 5.5.2 Мікробіологічні дослідження в розроблених технологічних процесах  | 264        |
| 5.6 Дослідження і випробування аероіонних технологій в'яленої харчової продукції                                    | 268        |
| 5.6.1 Інноваційна аероіонна технологія виробництва в'яленої щуки  | 268        |
| 5.6.2 Результати випробування технології в'яленої щуки  | 273        |
| 5.6.3 Дослідження аероіонного процесу в'ялення бичка чорноморського   | 275        |
| 5.6.4 Висновки  | 278        |
| 5.7 Аероіонна технологія баликової продукції з прісноводної риби  | 278        |
| 5.8 Інноваційна аероіонна технологія кулінарної продукції з риби  | 282        |
| 5.9 Дослідження аероіонної технології провісної продукції із філе оселедця тихоокеанського                          | 283        |
| 5.10 Дослідження шляхів використання іонів атмосферних газів в технологіях пресервів                                | 287        |
| 5.11 Результати досліджень  | 293        |
| 5.12 Висновки   | 294        |
| 5.13 Практичні розробки аероіонних технологій харчових продуктів  | 295        |
| <b>РОЗДІЛ 6 РАДІАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ В БАЗОВИХ ГАЛУЗЯХ ВИРОБНИЦТВА</b>   | <b>299</b> |
| 6.1 Дослідження і розробки технології нового покоління радіаційно-модифікованого полімербетону                      | 300        |
| 6.1.1 Об'єкт досліджень   | 301        |
| 6.1.2 Фізичні основи нових радіаційних технологій виробництва   | 304        |
| 6.1.3. Ідея вирішення завдання  | 306        |
| 6.1.4 Функціональні дослідження олігомерів  | 308        |
| 6.1.5 Технологія виробництва радіаційно-модифікованого полімербетону  | 311        |

|         |  |            |
|---------|--|------------|
| 6.1.6   | Метрологія процесів  | 313        |
| 6.1.7   | Дослідження характеристик РМПБ   | 314        |
| 6.1.8   | Висновок   | 317        |
| 6.2     | Радіаційні технології гідрофобізації пористих матеріалів   | 320        |
| 6.2.1   | Розробка інноваційної технології композитного гідрофобного покрівельного матеріалу                                   | 320        |
| 6.2.1.1 | Вибір технології модифікування   | 323        |
| 6.2.1.2 | Радіаційні дослідження   | 324        |
| 6.2.1.3 | Технологічний процес   | 324        |
| 6.2.1.4 | Дослідження технології радіаційно-хімічної модифікації   | 326        |
| 6.2.1.5 | Вимірювання ефекту гідрофобізації  | 326        |
| 6.2.1.6 | Оцінка показника пружної деформації  | 328        |
| 6.2.1.7 | Висновки   | 329        |
| 6.2.2   | Гідрофобізація конструкційних матеріалів з дерева  | 331        |
| 6.2.3   | Дослідження можливості використання енергії випромінювань для виробництва термостійкого асфальту підвищеної міцності | 346        |
| 6.2.4   | Висновки   | 350        |
|         | <b>ПРАКТИЧНІ РЕЗУЛЬТАТИ ДИСЕРТАЦІЇ</b>   | <b>351</b> |
|         | <b>ВИСНОВКИ</b>  | <b>353</b> |
|         | <b>СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ</b>  | <b>359</b> |



## ВСТУП

**Актуальність теми.** Сучасна промисловість у всьому світі характеризується зростанням обсягів використання ядерної енергії в різних галузях. Фундаментальні та прикладні дослідження цього напрямку характерні для всіх розвинутих країн. Визначальною умовою організації досліджень є створення науково-дослідних експериментальних установок, здатних генерувати іонізуючі випромінювання з необхідними параметрами для здійснення експериментальних досліджень, та пошук нових методів використання ядерної енергії для вирішення актуальних завдань розвитку промисловості.

Україна відноситься до числа розвинених держав і має помітний парк таких екзотичних установок. Їх перелік розширюється новими радіаційними установками та технологіями для їх застосування, реалізуються унікальні технології промислового виробництва харчових продуктів, медичних засобів, будівельних матеріалів. Останнім часом ці технології отримали сильний поштовх подальшого росту та почали інтенсивно розроблятися з огляду на нові соціально-економічні виклики як оптимальний шлях реалізації екологічно-чистих і енергетично малозатратних напрямків промислового виробництва.

Характерно, що будь-який зразок радіаційних установок є оригінальною конструкцією та належить до промислових об'єктів високої одиничної вартості. Тому ефективність використання такої техніки можлива лише за умови максимального розширення сфери її застосування. Ці проблеми – є темою численних наукових і науково-практичних міжнародних і національних конференцій. За період розвитку радіаційної техніки, вона стала наукоємною та стимулює бурхливий прогрес техніки в різних галузях, в яких прийнято використовувати найсучасніші технічні засоби та методи виробництва – теорії систем, прикладну математику, кібернетику й обчислювальну техніку, теорію систем автоматичного регулювання й управління, силову та промислову електроніку та інші наукоємні дисципліни. А практичний досвід створення сучасної радіаційної техніки показує, що це можливе лише за умови, коли до складу відповідних закладів

будуть входити колективи різнопланових спеціалістів, орієнтованих на досягнення конкретних цілей. Таким шляхом створюються радіаційні технічні засоби, призначені для широкого кола наукових і прикладних задач.

Після надходження такої техніки до замовників, останні вирішують усі проблеми її експлуатації – амортизаційні та експлуатаційні витрати, економіку застосування, конкретизують сферу використання. Тому проблеми подальшого розвитку нової техніки є завжди актуальними та визначають ефективність і терміни застосування таких установок, а отже, використання вкладених у нову техніку коштів.

В ІЯД НАН України великий практичний досвід вирішення проблем розширення обсягів використання радіаційної техніки, Насамперед електрофізичних установок на основі прискорювачів заряджених частинок – найбільш складної області радіаційної техніки. Накопичено великий обсяг оригінальних технічних розробок, призначених для використання на електрофізичних установках ІЯД, які в принципі можуть бути використані не тільки для модернізації, але й для створення нових радіаційних установок різноманітного призначення. На їх основі створено оригінальні зразки електрофізичних радіаційних установок та розроблено інноваційні технології для екологічних досліджень, медицини, атомної енергетики, харчової та будівельної галузей.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Наукові дослідження проведено у рамках науково-дослідних робіт в Інституті ядерних досліджень НАН України, що виконувались на замовлення Національної академії наук України та інших замовників з 2011 по 2020 рр.: “Радіаційні зміни органічних матеріалів, поширених у виробництві кабельних виробів, що застосовуються на АЕС” (2011, ДР №0111U007039), “Дослідження впливу іонів низьких енергій на структури матеріалів” (2012-2016, ДР №0112U003596), “Розробка нових радіаційно-технологічних методів подовження термінів експлуатації бетонних конструкцій на об'єктах атомної енергетики” (2013-2014 ДР №0113U005377, 2015-2016, ДР №0115U004374), “Дослідження збуджених атомних ядер і механізмів ядерних процесів в біляпорогових реакціях” (2013-2017), “Експериментальна обробка зразків

препаратів замовника” (2014, за Договором №73-332/14), “Наукові основи радіаційних технологій складних органічних матеріалів природного походження” (2015, ДР №0115U004106), “Розробка радіаційних технологій отримання та дослідження методів застосування гідролізних наноматеріалів для ядерної та традиційної медицини” (2016-2018, ДР№0116U002989), “Електрофізичний технічний комплекс для імітації уражуючих факторів ядерного впливу” (2019-2021, ДР № 0119U01835), “Нанопористі термостійкі полімерні матеріали” – “ПОЛІНАНОПОР” (2018, ДР № 0118U002342, 2019, ДР№ 0119U102067, 2020 ДР№ 0120U103160), “Дослідження поділу ядер в низькоенергетичній області, розробка нових методів реєстрації” (2018-2021), “Дослідження структури ядер, механізмів ядерних реакцій та фізичних процесів в пучках заряджених частинок продуктів поділу ядер та вивчення фізичних процесів у пучках заряджених іонів” (2019-2022).

**Мета і завдання дослідження.** Метою дисертаційної роботи є дослідження перспективних шляхів використання іонізуючого випромінювання в інноваційних технологіях виробництва.

Для досягнення мети поставлено наступні **завдання**:

- Визначити перелік і вимоги до фізичних параметрів технічних засобів, які необхідно забезпечити на сучасному етапі розвитку радіаційних технологій.
- Дослідити методи використання енергії випромінювань для вирішення екологічних проблем утилізації промислових відходів і матеріалів.
- Вивчити можливості удосконалення радіаційної техніки до потреб будівельної індустрії.
- Дослідити проблеми формування радіаційних полів великого перерізу, необхідних для подальшого прогресу функціональних випробувань і сертифікації критичного обладнання в ядерній енергетиці.
- Дослідити ефективність системи трансформації емітансу пучка, специфіку роботи елементів та їх можливі конструкції. Розробити оперативні методики розрахунків та технічні засоби контролю.

- Вивчити можливості використання потоків аероіонів, іонів атмосферних газів невисокої енергії, не вище 50 кеВ з концентраціями понад  $10^7$  іон/см<sup>3</sup> для різних галузей промисловості.

- Випробувати методики радіаційних технологій для дослідження функціональності критичного обладнання АЕС.

- Вивчити імітатори як перспективний напрямок прикладних досліджень з використанням ядерної енергії.

- Дослідити технологію термостійких ядерних фільтрів (мембран) підвищеної міцності та інших нанопористих полімерних матеріалів для різних галузей виробництва.

- Дослідити можливості радіаційних технологій для модифікації сировини та подовження термінів зберігання харчових продуктів.

- Розробити способи радіаційно-хімічної модифікації бетону, асфальту та деревини для підвищення їх споживчих властивостей.

**Об'єкти дослідження** – процеси модифікації структури матеріалів під дією іонізуючої радіації. Промислові технології з використанням енергії різних видів іонізуючих випромінювань та технічні засоби їх генерації для експериментальних досліджень та прикладних робіт

**Предмет дослідження** – шляхи розвитку інноваційних технологій з використанням іонізуючих випромінювань, напрямки розвитку експериментальної радіаційної техніки, методи її використання в різних галузях промисловості.

В обсязі досліджень – методики радіаційної модифікації матеріалів, радіаційна техніка та інноваційні технології з їх використанням.

**Методи досліджень.** Експериментальні дослідження, аналіз опублікованих матеріалів, натурне моделювання, розробка проектів технічних засобів генерації випромінювань, практичні випробування інноваційних технологій використання іонізуючої радіації.

## **Наукова новизна одержаних результатів.**

Створено багатоцільовий науково-дослідний радіаційний технічний комплекс для фундаментальних і прикладних досліджень з широким переліком доступних іонізуючих випромінювань.

Розроблено інноваційні методи використання енергії іонізуючих випромінювань для медичної, харчової, будівельної галузей, дорожнього будівництва та вирішення екологічних проблем.

Створено та досліджено оригінальну методику використання мегавольтних електронів для покращення характеристик твердих будівельних матеріалів.

Встановлено межі поглинутих доз радіаційної обробки електронами, оптимальні для отримання керованого процесу радіаційно-хімічної модифікації бетонів з метою гідрофобізації та зміцнення.

Створено радіаційну методику модифікації, яка забезпечує отримання бетону з суттєво покращеними технічними характеристиками, а саме:

- у 32 рази зменшується водопоглинання;
- на 34% зростає міцність на стискання;
- у 4 рази зростає водонепроникність;
- у 2 рази підвищується морозостійкість.

Розроблено нові оригінальні методи використання енергії випромінювань при виробництві харчових продуктів, що гарантують високу якість і безпеку споживання та виключають застосування хімічних речовин.

Встановлено перелік наукових і технологічних умов ефективного використання енергії мегавольтних електронів для радіаційної обробки харчових продуктів.

**Вперше** розроблено наукову основу використання енергії атмосферних іонів для промислових радіаційних технологій. Розширено знання про малодосліджені процеси формування, прискорення, транспортування в атмосфері іонів низьких і наднизьких енергій. Виявлено механізми їх використання для модифікації широкого кола органічних матеріалів. Встановлено, що концентровані потоки іонів

атмосферних газів (аероіонів) впливають на фізичний стан опромінюваного органічного матеріалу і стимулюють його модифікацію через тепломасові процеси.

*Вперше* досліджено динаміку тепломасових процесів та способи керування ними в іонних технологіях переробки харчової сировини. Встановлено, що обробка харчових продуктів аероіонами стимулює природні процеси молекулярної перебудови та модифікації їхнього хімічного складу до стану готового до споживання харчового продукту.

*Вперше* створено новий прикладний електрофізичний радіаційний напрямок використання іонного опромінювання для ефективного енергозберігаючого виробництва харчових продуктів.

Створено наукову основу проектування дослідницької техніки для вивчення можливостей застосування аероіонів в інноваційних радіаційних технологіях та розроблено методи вимірювання їхніх параметрів.

Отримали подальший розвиток методи радіаційних функціональних випробувань обладнання, критичного для експлуатації АЕС шляхом досліджень функціональності комплектуючих матеріалів.

Розроблено та реалізовано удосконалену структуру радіаційного експериментального комплексу з розширеним діапазоном енергії та набором заряджених частинок. Втілюється проект удосконалення радіаційного комплексу ІЯД НАН України потужною установкою генерації електронів 0,4 МеВ.

Підтверджено ефективність радіації як універсального інструменту цілеспрямованого регулювання властивостей кінцевого продукту.

**Практичне значення** одержаних результатів.

Удосконалено та передано в користування дослідницький радіаційний комплекс ІЯД НАН України.

Розроблено технологію радіаційно-модифікованого бетону (РМПБ) підвищеної міцності та стійкого до корозії, шляхом введення до складу бетону нових вітчизняних нетоксичних олігомерів з примусовим твердненням в матеріалі під дією мегавольтних електронів. Успішно здійснено комплексну розробку технології та техніки, яка забезпечує виробництво РМПБ з характеристиками,

суттєво вищими за типовий бетон – нового композитного матеріалу придатного для експлуатації в екстремальних умовах.

Створено спеціалізовану дослідницьку радіаційну техніку, методики та засоби контролю в процесах опромінення для досліджень і випробувань важких (до 50 кг) зразків з щільних матеріалів, яка ще не має вітчизняних аналогів.

Виготовлено РМПБ та встановлено його реальні показники згідно діючих стандартів будівельної галузі. Виявлено підвищення довговічності РМПБ при експлуатації в несприятливих умовах, що є корисною при виробництві бетонних та залізобетонних конструкцій для критичних галузей – атомної енергетики, хімічного виробництва, сховищ радіоактивних і токсичних відходів.

Розроблено науково-технологічну основу даного напрямку радіаційних технологій, а саме: сформульовано нові підходи до формування структури цементуючих систем для бетонних конструкцій в ядерній енергетиці та індустрії, радіаційні технології нових термостійких матеріалів підвищеної міцності для дорожнього покриття, армовані відходами фіброматеріалів та вторинними полімерами.

Розроблено оригінальну радіаційну технологію виробництва трекових ядерних мембран різного призначення з нових термостійких і міцних вітчизняних полімерних матеріалів.

Встановлено технічні деталі, що є важливими для впровадження інноваційних радіаційних технологій у промисловість – габаритні та вагові показники упаковок харчової продукції для її конв'єрсної дезінфекції електронами 4 MeV, застереження щодо рецептур харчових продуктів з метою виключення з їх складу синтетичних консервантів, фумігантів, ароматизаторів, стабілізаторів, які під дією енергії випромінювання можуть стимулювати небажані хімічні реакції. Розроблено методики технологічної дозиметрії при радіаційній обробці великих партій харчових продуктів, упакованих в транспортну тару, реалізованих на традиційних виробничих лініях.

**Особистий внесок** здобувача полягає у дослідженні стану проблеми, виборі й аргументуванні теми, формулюванні наукової концепції роботи, її теоретичному та

експериментальному підтвердженні, проведенні аналітичних та експериментальних досліджень, формулюванні висновків, підготовці матеріалів до публікацій, активній участі в отриманні та аналізі експериментальних результатів, редагуванні статей на етапах взаємодії з журналами.

У матеріалах, що опубліковано у співавторстві, автору належать: наукове обґрунтування теоретичних положень, постановка, планування, проведення експериментів, аналіз отриманих результатів, формулювання та узагальнення основних висновків.

#### **Апробація** результатів дисертації.

Результати досліджень, викладені у дисертації, були представлені на 19 конференціях:

- Щорічних конференціях Інституту ядерних досліджень НАН України (Київ, Україна, 2012-2020, усні та стендові доповіді);
- The 4<sup>th</sup> International Conference "Current Problems in Nuclear Physics and Atomic Energy (Київ, Україна, 2012, усна доповідь);
- Міжнародних конференціях «Інтегроване управління водними ресурсами» (Київ, Україна, 2013, 2014, усні доповіді);
- Міжнародна конференція молодих учених і аспірантів (Ужгород, Україна, 2013, 2015, усні доповіді);
- 3<sup>rd</sup> International Conference on Sustainable Construction Materials & Technologies (Киото, Японія, 2013, усна доповідь співавтором);
- ROSAM is a Polychar satellite meeting (Руан, Франція, 2013, усна доповідь співавтором);
- 2<sup>nd</sup> International Symposium on Cement-based Materials for Nuclear Wastes (Авіньйон, Франція, 2014, стендова доповідь);
- VII Міжнародна науково-практична конференція вчених, аспірантів і студентів (Київ, Україна, 2017, усна доповідь співавтором);
- Compiled by International Cooperation Department Shandong Academy of Sciences (Жинан, Китай, 2017, усна доповідь співавтором),



а також на наукових семінарах відділу структури ядра Інституту ядерних досліджень НАН України (Київ, 2012-2020), на міжнародних наукових семінарах Інституту хімії високомолекулярних сполук (2014-2015, 2018-2020), міжнародному семінарі «Радиационные технологии в промышленности и медицине» (Астана, Казахстан, 2013, усна доповідь).

**Публікації.** Результати дисертаційної роботи опубліковано у 75 роботах, у тому числі в 1 монографії (розділ 1), 22 статтях у фахових наукових журналах та 5 збірниках матеріалів міжнародних конференцій, 4 патентах, 43 тезах доповідей на наукових конференціях.

**Структура дисертації.** Дисертаційна робота складається зі вступу, 6 розділів, практичних результатів, висновків, списку використаних джерел з 303 найменувань. Загальний обсяг роботи – 392 сторінки, з них 327 основного тексту, вона містить 35 таблиць та 198 рисунків.

## РОЗДІЛ 1 СТАН ПРОМИСЛОВОГО ВИКОРИСТАННЯ ЯДЕРНОЇ ЕНЕРГІЇ (РАДІАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ) У СВІТІ

Прошло вже більше 80 років з початку застосування людством атомної енергії. Але і зараз відомі фахівці та національні наукові організації в усіх країнах постійно вносять вагомий вклад у корисну справу ефективного використання енергії ядер та іонізуючої радіації в багатогранне життя сучасної цивілізації. Існують різні напрямки використання радіації в промисловості. У даному огляді розглянуті лише найбільш відомі та вагомі для сучасного промислового виробництва. Проаналізовано досягнення Міжнародних організацій та базові досягнення одного з найбільших ядерних центрів України – Інституту ядерних досліджень НАН України в м.Києві.

З аналізу публікацій [4, 6, 7, 13-17, 21, 22, 27, 33, 36, 37, 46, 53, 69, 87, 124, 205, 301] можна зробити висновки, що інформація в суспільстві про ядерну енергію обмежена лише найвідомішими технологіями з прямим використанням ядерної енергії. А щодо непрямого (“неенергетичного”) використання, то дані досить обмежені. Це спотворює загальне суспільне розуміння значення ядерної енергії. Тому відсутнє свідоме відношення до ядерної енергії як одного з базових напрямків подальшого розвитку цивілізації. Дана робота присвячена неенергетичному застосуванню ядерної фізики в житті суспільства.

**Загальні положення.** Ядерні технології можна умовно рознести на два класи – енергетичні, де енергія ядерних процесів використовується безпосередньо (ядерні технології) і неенергетичні, де кінцевий результат досягається за рахунок інших процесів, але стимульованих ядерною енергією (радіаційні технології).

Усі існуючі технології будуються за загальним принципом – способом отримання та передачі енергії в матеріал для досягнення технологічного ефекту (фізичного, хімічного тощо) або в сировину для її перетворення (модифікації) в потрібний споживацький продукт.

Спільною проблемою для усіх неенергетичних ядерних технологій є ефективність використання переданої енергії до сировини для її модифікації.

Найменш ефективними є технології з використанням теплової енергії. Але, де-факто, вони найбільш поширені в сучасному виробництві. Перехід від технологій “теплових” до більш ефективних радіаційних забезпечить гігантський ривок в прогресі промислового виробництва. Цим визначається підвищена зацікавленість в радіаційних технологіях всіх країн світу, а особливо країн з обмеженим економічним потенціалом, як шляху до підвищення добробуту своїх громадян.

Загальні положення теорії ядра є науковою базою ядерних технологій. І розроблялись вони для прямого енергетичного застосування ядерної енергії. Ядра в атомах складаються з двох типів нуклонів – протонів та нейтронів. Вони утримуються в ядрі за рахунок так званої сильної взаємодії. Енергія зв'язку нуклонів залежить від загальної кількості нуклонів у ядрі. В залежності від кількості протонів та нейтронів ядро може бути стабільним або схильним до спонтанного поділу.

Технологічно спонтанне ділення часто використовують як метод отримання іонізуючих випромінювань або як джерела теплової енергії, наприклад, в радіоізотопних генераторах.

У легких ядер при збільшенні кількості нуклонів енергія зв'язку зростає, а у важких – падає. Якщо додавати нуклони в легкі ядра чи віднімати їх у важких ядер, то ця різниця в енергії зв'язку буде виділятися у вигляді кінетичної енергії частинок, які вивільняються в результаті таких дій. Кінетична енергія (енергія руху) частинок переходить в тепловий рух атомів після зіткнення частинок з ними. Таким чином ядерна енергія проявляється у вигляді нагрівання.

Зміна складу ядра називається ядерним перетворенням або ядерною реакцією. Ядерна реакція зі зменшенням кількості нуклонів в ядрі називається ядерним розпадом або діленням ядра, а при збільшенні кількості нуклонів в ядрі – термоядерною реакцією або ядерним синтезом.

В промислових технологіях використовують той факт, що в атомах є структури з меншою енергією зв'язків між собою та ядром атому – “оболонкові структури”, які складаються з елементарних заряджених частинок (електронів). Їх практичне використання характерне для “радіаційних” технологій, що і забезпечило найбільш широке використання ядерної енергії для потреб промисловості. Цей шлях

обіцяє створення новітніх енергозберігаючих і екологічно безпечних технологій виробництва нових матеріалів, виробів та послуг.

*Особливість ядерних і радіаційних технологій та їх місце в економічному прогресі суспільства.* Ядерні технології базуються на оперуванні дуже дрібними часточками матерії – розмірами до  $10^{-10}$ - $10^{-15}$  м. Вони дрібніші за ті, що використовують зараз, наприклад, в нанотехнологіях. Тому ядерні технології є ефективнішими, оскільки вони надають можливості синтезу нових матеріалів з унікальними властивостями, яких не існує в природі. Це, наприклад, доведено в ЛЯР ОІЯД Дубна академіком Г.М. Фльоровим [294, 295]. В його лабораторії було науково-обґрунтовано, що використання радіації єдино можливий шлях суттєвого прогресу сучасних технологій на користь розширення асортименту життєво необхідних засобів (наприклад, ядерних фільтрів) для безпечного існування людей та природи.

Радіаційні та ядерні технології використовують природні ефекти, за якими існує весь Всесвіт. Такі технології є варіантом корисного використання природного феномену. Їх відносять до екологічно прийнятних, бо вони не вносять в природу нових речовин, таких як органічна хімія (полімерні матеріали, консерванти, стабілізатори тощо). Аргументація проста: синтетичні матеріали не мають в природі механізмів їхньої утилізації за єдиним еволюційним принципом "з землі вийшов – в землю повернувся", який забезпечує існування й еволюцію усього суцього на Землі. Досвід техногенних аварій на об'єктах ядерної енергетики показав, що відходи радіаційних технологій завжди утилізуються в природі за рахунок хімічних реакцій та фізичних показників напіврозпаду. Хімічно-синтезовані матеріали до таких не відносяться, вони не мають природних механізмів структурних перетворень і фактично порушують хід природних процесів трансформації енергії. Технологічно ядерні технології зручніші, бо оперують самими дрібними часточками матерії. А проникнення технологій в область малорозмірних об'єктів є енергетично вигідним і технологічно досконалим шляхом створення нових матеріалів з потрібними властивостями.

В дисертації обрано цей шлях для створення новітніх енергозберігаючих і екологічно безпечних технологій виробництва нових матеріалів, виробів та послуг.

*Методи використання ядерної енергії.* Різниця між енергетичними і неенергетичними методами використання іонізуючих випромінювань наведена на рис. 1.1.

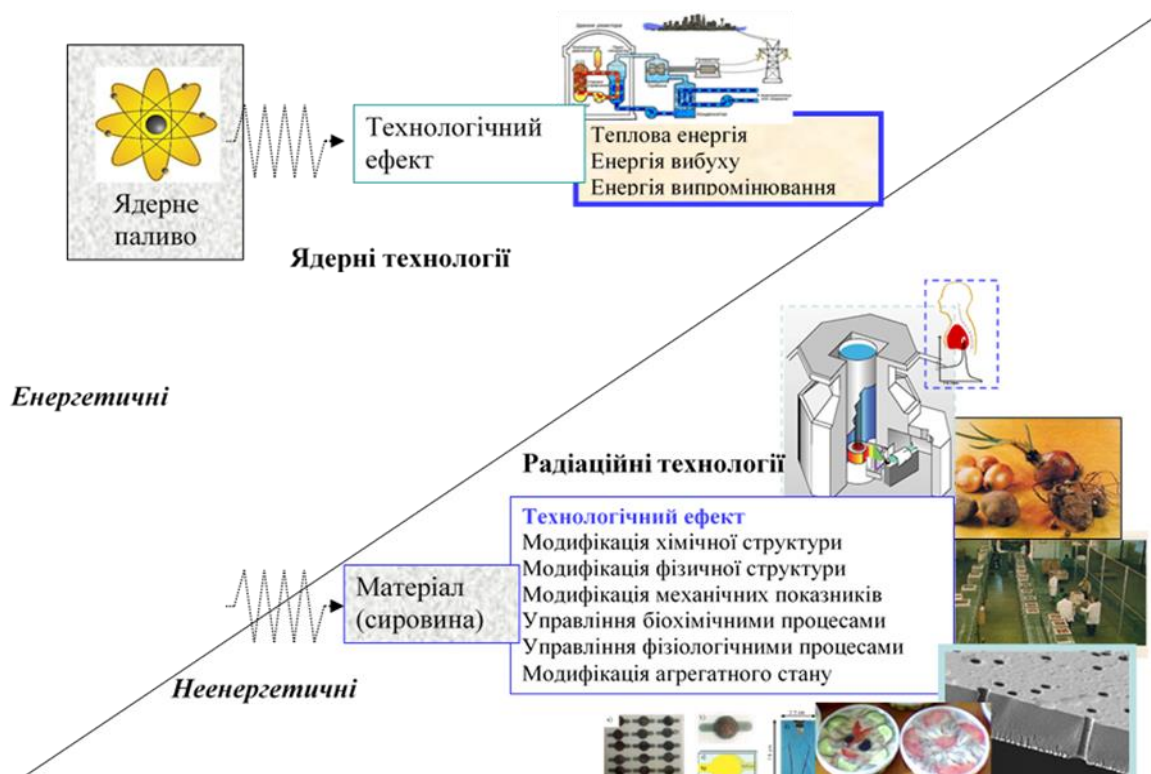


Рис. 1.1 Традиційні методи використання ядерної енергії

Область енергетичного використання прийнято відносити до ядерних технологій, де енергія, що виділяється при ядерних реакціях, використовується безпосередньо для перетворення в інші види енергії (теплову та електричну в ядерній енергетиці), енергію вибуху (в військових цілях, будівництві) чи енергію вторинного іонізуючого випромінювання (радіоактивні ізотопи промислового та медичного призначення) (верхня частина рис. 1.1).

Неенергетичне застосування характерне для радіаційних технологій. В основі цих технологій – цілеспрямоване керування за допомогою радіації хімічними процесами в матеріалах. Результуючі технологічні ефекти (нижня частина рис. 1.1) забезпечують отримання потрібного ефекту з нижчими енерговитратами, ніж теплові, хімічні чи будь-які інші технології. До того ж, за допомогою радіації можна

створювати хімічні сполуки та структури з унікальними властивостями, недоступними для природних хімічних процесів.

*Історія розвитку.* Вказані особливості різного застосування ядерної енергії формувалися на усьому проміжку часу від відкриття іонізуючих випромінювань до широкого використання радіації. На рис. 1.2 наведена ілюстрація усіх етапів технологічного освоєння ядерної енергії.

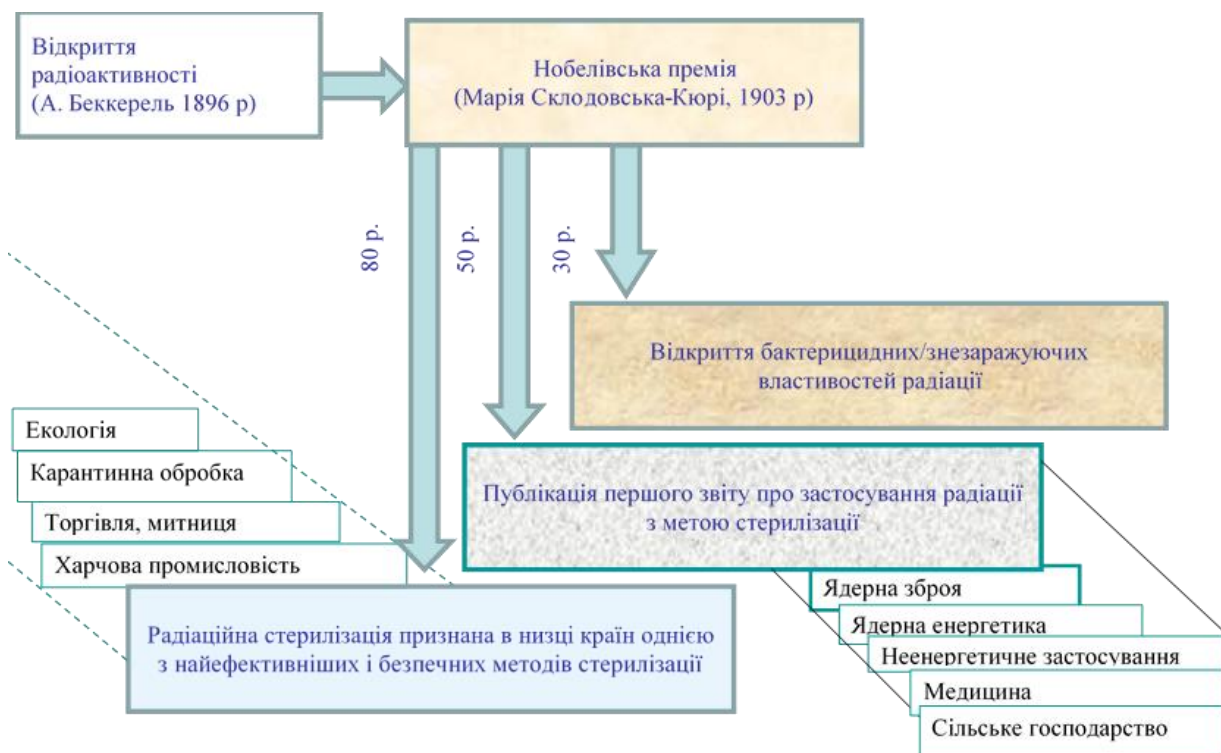


Рис. 1.2 Історія розвитку методів використання енергії іонізуючих випромінювань

Вже за перші 50 років були оцінені переваги використання енергії в неенергетичних напрямках (на нижній правій частині рис. 1.2). А за наступні 30 років радіація впевнено зайняла провідне місце та дала поштовх до створення нових напрямків її корисного використання (внизу зліва на рис. 1.2). Останнім часом, відбувається активне проникнення радіаційних технологій у виробництво нових оригінальних матеріалів для індустрії, ядерної енергетики, медицини, харчової промисловості.

*Світовий досвід промислового використання іонізуючих випромінювань.* За час формування радіаційних технологій, як одного з важливих напрямків технологічного розвитку цивілізації (рис. 1.3), нагромаджено великий практичний

досвід їх розробки, створено численні, в тому числі унікальні, зразки техніки для їх здійснення.



Рис. 1.3 Ілюстрація світового досвіду технологічного використання радіації

Характерно, що радіаційні технології використовують не лише країни з високим рівнем технологічного розвитку, а і країни з невисоким економічним рівнем, через простоту і доступність методів досягнення нових високих технологічних результатів. Найпопулярніші напрямки застосування радіації було визначено в доповіді заст. директора МАГАТЕ доктора С.Мачі (вони наведені на нижній правій діаграмі рис. 1.3) [33]. Як видно з цієї діаграми, радіація використовується в широкому переліку наукових досліджень і практичних технологій. Найбільш популярними є ядерна енергетика, виробництво харчових продуктів, сільське господарство, виробництво полімерів, знезараження промислових та комунальних відходів, медицина. Вже створено Міжнародний кодекс законів щодо промислового неенергетичного застосування ядерної енергії та стандарти їх використання і поширення. Все це сприяло високим темпам впровадження радіаційних технологій в різних країнах. Важко назвати інші технологічні напрямки, які могли б конкурувати з такими темпами розвитку. На

діаграмах наведені дані, які містяться в звітах та бюлетенях МАГАТЕ, спеціальних публікаціях найбільш розвинених країн світу [13,15, 27, 36, 41, 42, 53].

Основні механізми і процеси, які відбуваються в матеріалах під впливом енергії іонізуючих випромінювань. Згідно законів збереження енергії, наслідками дії радіації є модифікація структур елементів опроміненої матерії. Модифікація структури сировини в кінцевий продукт є метою будь-яких технологічних процесів. Різниця тільки в тому, які складові матерії модифікуються (об'єднання молекул, окремі молекули, нанорозмірні компоненти, окремі нанорозмірні ( $10^{-9}$  м) групи тощо).

В харчовій галузі модифікація здійснюється традиційно під впливом теплової енергії – випромінюванням з довжиною хвилі в одиниці-сотні мікрометрів, яка поглинається на коливальних рівнях молекул та їх груп. Хімічні технології модифікують структури хімічних сполук в складі сировини (наприклад, нанотехнології). Ядерна енергія забезпечує модифікацію найбільш дрібних складових сировини [32], аж до окремих атомів (рис. 1.4).

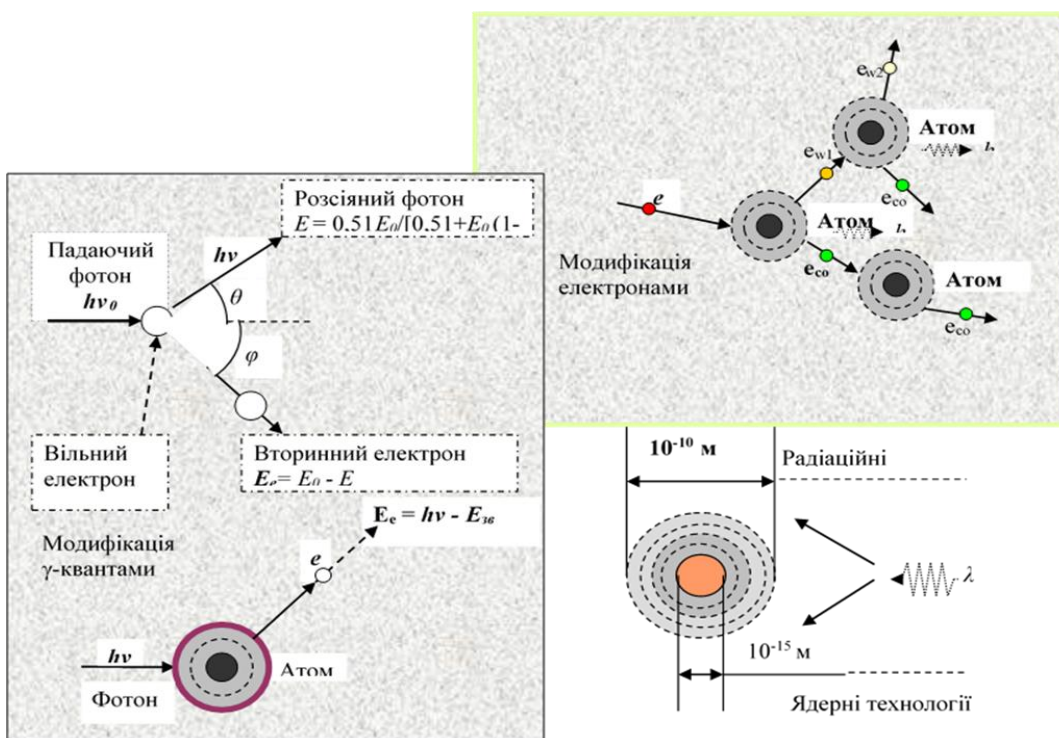


Рис. 1.4 Схеми реакцій модифікування оболонок структур атомів в радіаційних технологіях з різними видами радіації



На схемі справа внизу показана різниця ядерних і радіаційних технологій, а саме, коли довжина хвилі (енергія) випромінювання наближається до  $10^{-15}$  м, то вона проникає всередину атому і модифікує його ядро. А це характерно для ядерних технологій з утворенням нових хімічних елементів чи їх різновидів – ізотопів. За цими показниками і здійснюється класифікація технологій на ядерні та радіаційні.

*Основа радіаційних методів.* Основою радіаційних процесів є модифікація лише зовнішніх оболонкових структур атомів з метою керування ковалентними зв'язками атомів і молекул, які забезпечують модифікацію фізико-хімічної структури сировини в потрібний продукт.

Схема процесів модифікацій під дією фотонів від джерел гамма-випромінювання наведена в лівій частині рис. 1.4. Головне, що як тільки в результаті взаємодії фотона (чи електрона) з атомом утворюється вторинний електрон, то в органічній матерії відразу стимулюються ті чи інші хімічні перетворення (модифікація). В живих органічних молекулах (мікроорганізмах) порушуються іонні зв'язки між різними складовими молекули та відбувається її модифікація в іншу органічну (неживу) молекулу. В цьому основний ефект радіаційних технологій.

Інколи застосовують термін "пікохвильові технології", бо основою радіаційних методів є використання електромагнітного випромінювання з дуже короткою хвилею ( $\lambda$ ), яка лежить в пікометровому діапазоні. Аналогічні ефекти супроводжують передачу енергії для модифікації сировини через елементарні заряджені частинки – електрони з енергією не вище 10 МеВ.

Традиційно і довгий час основною метою пікохвильових технологій було знешкодження живої мікрофлори (стерилізація). За звичай паралельно відбувається і модифікація хімічних структур органічної речовини. Вибором кількості енергії (доз опромінення) можна ефективно формувати потрібний технологічний ефект – пастеризацію, стерилізацію, хімічну деструкцію чи структурування.

Аналогічні ефекти відбуваються у випадку передачі в матеріал енергії через електрони (справа на рис. 1.4). Тут валентні зв'язки формуються за рахунок прямої передачі електронами енергії атому ( $e_{co}$ ). Але тут процес більш тривалий, бо

електрони високих енергій передаються її частинками при кожному подальшому зіткненні з атомами сировини ( $e$ ). Реально відбуваються численні зіткнення, аж поки налітаючий електрон не втратить енергію нижчу певного порогу. Цікаво, що одночасно при зіткненнях генеруються і кванти фотонів (гама випромінювання), які в свою чергу модифікують інші атоми, за механізмами взаємодії фотонів з атомами (схема зліва). Це свідчить, що ефективність процесів модифікації при опроміненні електронами суттєво більша. Тому практично усі нові технологічні процеси базуються на штучних джерелах електронів – спеціальних машинах, здатних генерувати потоки електронів необхідних енергій в діапазоні до 10 МеВ.

Для радіаційних технологій це заборонено, тому дозволена енергія (довжина хвилі) випромінювань в радіаційних технологіях знаходиться суттєво нижче – в пікометровому діапазоні. Це еквівалентно енергії фотонів до 5 МеВ (енергії електронів – до 10 МеВ). Такі параметри гарантують отримання потрібного технологічного результату без будь-яких небажаних параметрів. Цей природний механізм передачі енергії є гарантією отримання стабільного технологічного результату – безпечного продукту.

*Інші ефекти під дією іонізуючих випромінювань.* Раніше наведені дані відносяться до взаємодії з органічною матерією, яка характеризується досить обмеженим переліком елементів у своєму складі. В основному це легкі елементи, не важчі за кисень та вуглець. Для матеріалів з важких елементів радикальний механізм не працює.

Багатокомпонентні процеси передачі енергії іонізуючих випромінювань в матеріали сприяли широкому використанню радіації в різних галузях виробництва.

Фактори дії на тверді та важкі матеріали, властиві електронам, надали можливість використання їх в деяких напрямках матеріалознавства, пов'язаного з переробкою твердих тіл.

На рис. 1.5 наведена загальновідома схема передачі енергії електронів в тверде тіло [56].

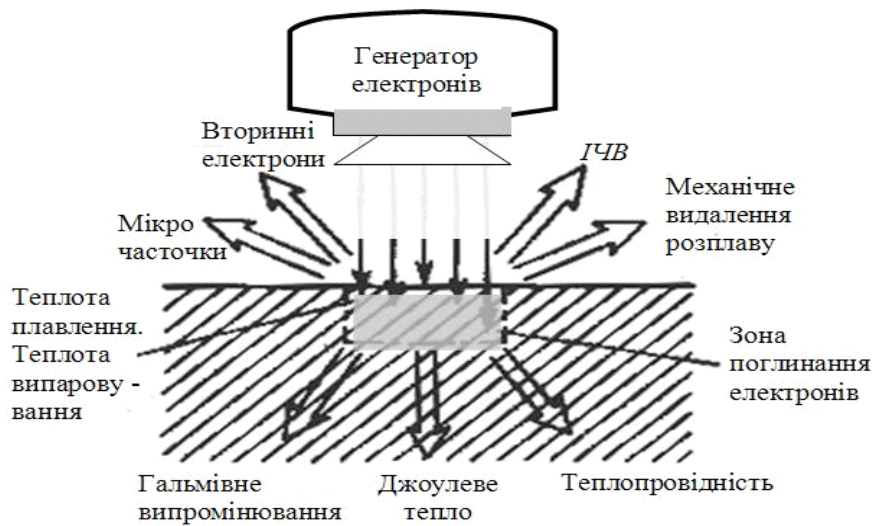


Рис. 1.5 Схема передачі енергії електронів в тверді тіла [176]

Деякі з них надзвичайно ефективні, бо дозволяють миттєво підводити величезні теплові потужності на мінімальну площу матеріалу, як наведено на рис. 1.6.

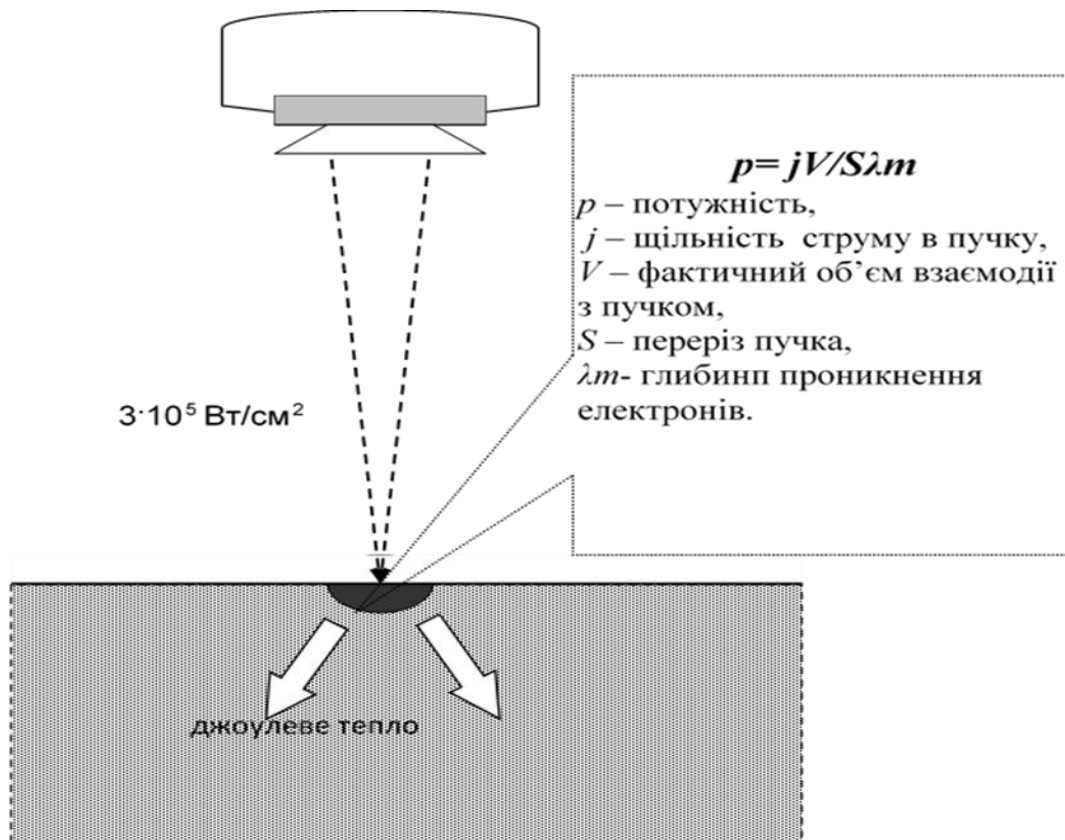


Рис. 1.6 Схема сфокусованої передачі енергії електронів в тверде тіло [176]

Площу «п'ятна» електронів на матеріалі (зону електронно-променевої обробки) можна змінювати в широких межах, регулюючи підведену потужність (струм пучка), а значить, і температурні режими обробки, і отримувати максимально потрібні технологічні процеси. Такі можливості не надають ніякі інші технології.

Вказаний перелік ефектів обумовив використання іонізуючих випромінювань і в металургії для плавки металів, для поверхневого загартування металів, різання надміцних сплавів та точкової зварки, у мікроелектроніці, в гірничій промисловості для руйнування твердих скельних порід та ін.

Вражаючими є результати харківських вчених щодо використання мегавольтних електронів для випробувань і сертифікації деталей машин [223].

### **1.1 Досвід розробок і розвиток техніки для радіаційних технологій на основі одного джерела іонізуючих випромінювань**

Висока ефективність радіаційно-стимульованих процесів в матеріалах сприяла активній розробці технічних засобів для практичного використання їх в реальному виробництві. Розвиток цього напрямку отримав назву радіаційного машинобудування, інколи – радіаційного приладобудування. Їх конструювали з використанням різних джерел іонізуючого випромінювання. На перших етапах розвитку цього напрямку переважали ізотопні генератори іонізуючих випромінювань. І відповідно, розроблялась така техніка здебільшого для завдань стерилізації органічних матеріалів (харчових продуктів, інфікованих стоків, комунальних відходів), цілеспрямованого впливу на біохімічні та фізіологічні процеси в живій і неживій матерії (стимуляція росту зернових, дезінсекції та подовження строків зберігання шляхом гальмування фізіологічних процесів в сільськогосподарській продукції (картоплі, цибулі, різних фруктів). Розробка проводилась в усіх розвинутих країнах світу [33, 41, 53-55, 59, 66, 69, 84, 108, 300]. Деякі зразки такої техніки наведені нижче (рис. 1.7-рис. 1.10).

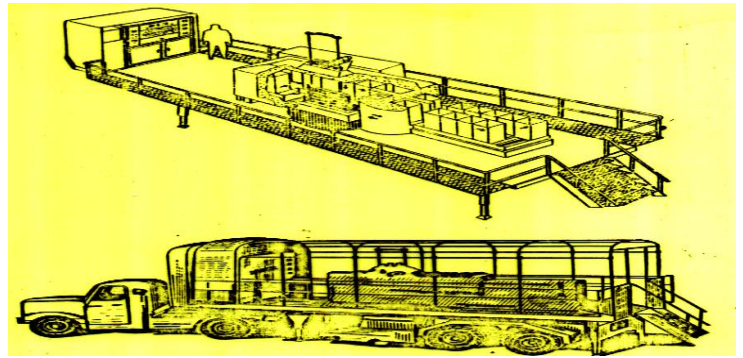
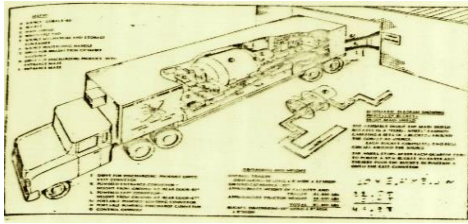


Рис. 1.7 Мобільна технологічна установка для використання іонізуючого випромінювання  $^{60}\text{Co}$  для обробки харчових продуктів (Канада, 1956-60рр).

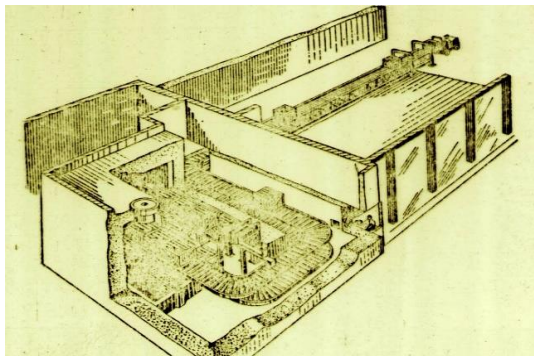


Рис. 1.8 Стационарна технологічна установка радіаційної обробки матеріалів на базі електрофізичного джерела радіації (електронного прискорювача) (60 рр., МАГАТЕ)

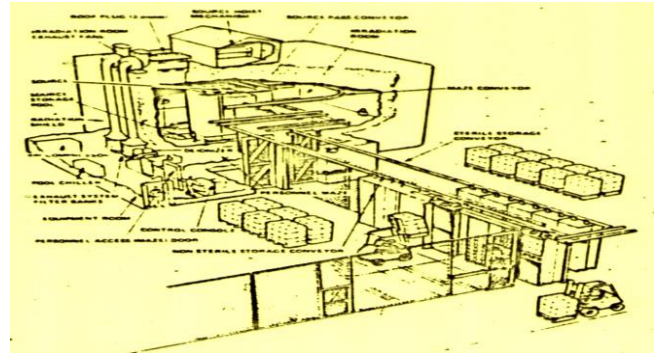
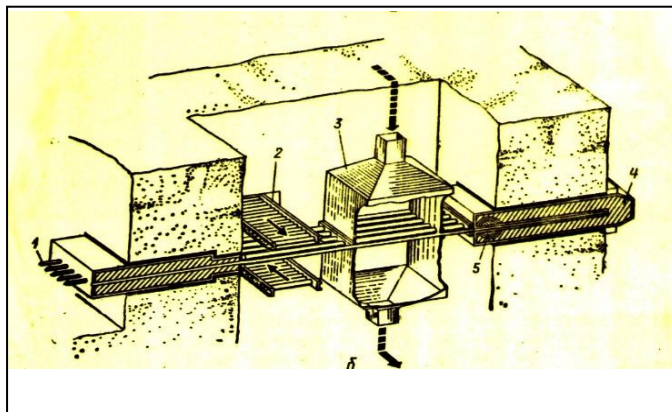
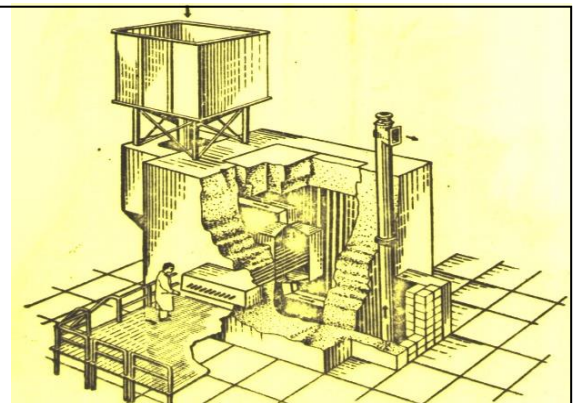


Рис. 1.9 Потужна універсальна технологічна установка для обробки іонізуючим випромінюванням  $^{60}\text{Co}$  медичного обладнання, харчових продуктів тощо (60 рр., Нідерланди)



Схема



Конструкція

Рис. 1.10 Стационарна технологічна установка з ізотопним джерелом  $^{60}\text{Co}$  для дезінсекції зернових (МАГАТЕ, 70 рр.)

Цей період характеризується бурхливим прогресом радіаційних технологій в усіх країнах світу. Найбільш корисні ефекти отримували країни з мінімальним

рівнем економічного розвитку, бо радіаційні технології різко піднімали ефективність виробництва та дозволяли за короткий період вирішувати актуальні виробничі завдання.

*Технологічні радіаційні установки СРСР* (рис. 1.11- 1.13). Впровадження радіаційних технологій в СРСР здійснювалось централізовано під керівництвом спеціально створеного науково-технологічного проектного інституту (ВНИРТ).

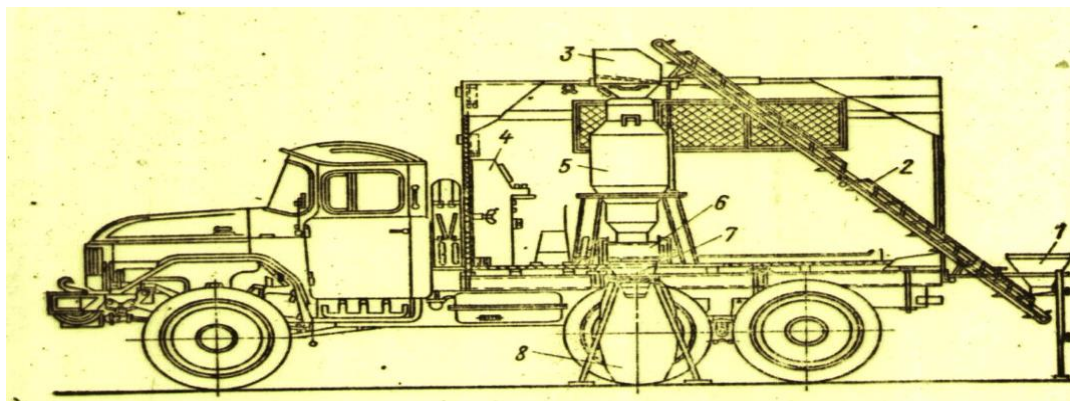


Рис. 1.11 Мобільна технологічна установка «КОЛОС» передпосівного опромінювання зернових гама-випромінювання  $^{60}\text{Co}$

Ефективність такого підходу до впровадження іонізуючих випромінювань в реальне виробництво виявилась високою.

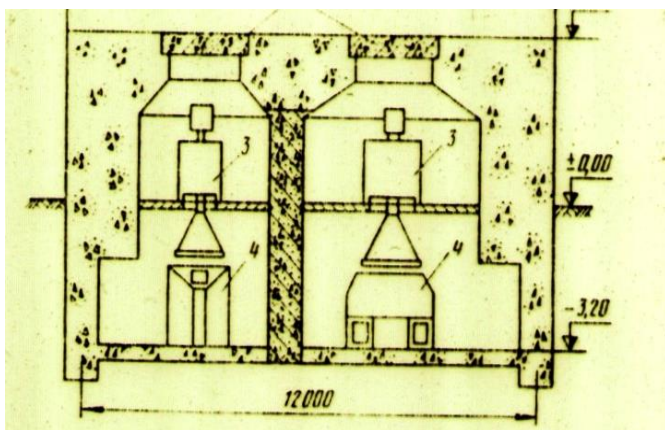


Рис. 1.12 Технологічний радіаційний комплекс «Боровляни» Білорусія, 80 рр.

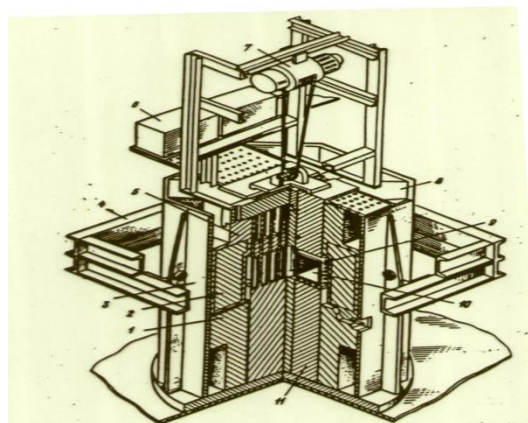


Рис. 1.13. Мобільна установка технологічного обробки риби іонізуючим випромінюванням  $^{60}\text{Co}$  морського базування на рибовидобувних судах

Ця організація об'єднувала наукові досягнення провідних ядерних центрів – СВ АН СРСР (Новосибірськ), ТОРІЙ (Москва), НДІЕФА (Санкт-Петербург) та провідних галузевих наукових закладів МОЗ, ВНДІРО, НДІ АСХН СРСР та ін. [108, 301]. Такий комплексний підхід забезпечив реалізацію численних проектів і забезпечив великий економічний ефект і оперативне вирішення нагальних проблем суспільства (наприклад, програма покращення та захисту зернових сільськогосподарських культур та ін.).

*Тенденції розвитку технічної бази.* З вищенаведених даних видно, що в 50-70 рр. практично в усьому світі технології використання іонізуючих випромінювань базувались переважно на ізотопних джерелах радіації ( $^{60}\text{Co}$ ). Аналіз цієї особливості показав, що на той час саме радіоактивні речовини були найбільш доступними джерелами іонізуючих випромінювань. Ізотопи були продуктом переробки відпрацьованого палива АЕС і мали порівняно невелику вартість. Безпосередньо на виробничому майданчику такі джерела не вимагали вкладення енергії.

Ситуація поступово змінювалася з удосконаленням електрофізичної техніки – електричних машин, що генерують іонізуючі випромінювання за рахунок споживання електричної енергії. На рис. 1.14 наведено графік динаміки радіаційної техніки з різними джерелами випромінювання [152].

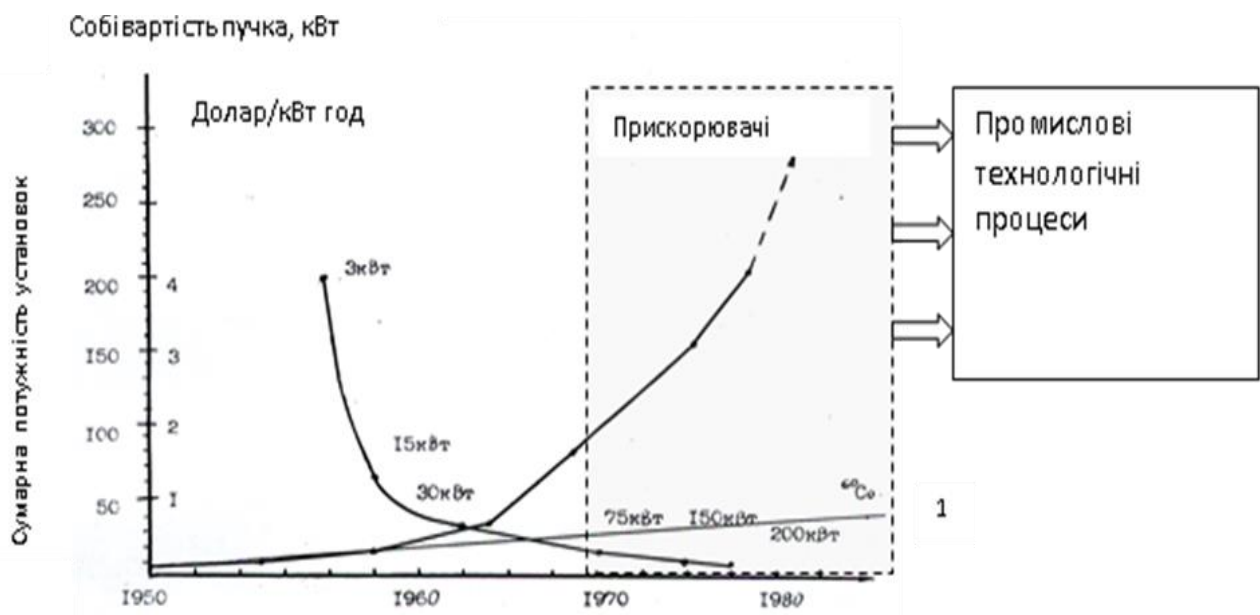


Рис. 1. 14 Порівняльна динаміка радіаційних установок з ізотопними ( $^{60}\text{Co}$ ) і електрофізичними генераторами випромінювання

Тенденція до переважного застосування електрофізичних генераторів іонізуючих випромінювань починається з 70-х років [16, 17, 34, 61]. Дослідження причин показали, що поширення прискорювачів визначається вдосконаленням їхньої конструкції та зростанням технічних показників та промислової ефективності. Характерно, що при збільшенні одиничної потужності прискорювача з 3 до 200 кВт собівартість пучка зменшилась з 4 \$ за кВт·год до 0,1 \$ за кВт·год. На сучасних установках з одиничною радіаційною потужністю близько 1 МВт, собівартість пучка ще в 10 разів менша.

До їхнього поширення призвело зростання соціального неприйняття радіоактивних ізотопів (особливо після низки глобальних аварій на ядерних об'єктах). Аналіз найважливішого критерію для промислового використання показує, що темпи розвитку установок (рис. 1.14) мають протилежні характеристики – електрофізичні прогресують, а ізотопні поступово втрачають свої позиції [59, 61, 66, 69, 87, 108, 124, 186, 235, 246, 295]. Тут доречно врахувати додаткові обмеження і через енергію гама-квантів, яка знаходиться в межах 0,9-1,2 МеВ, а відповідно і обмежену глибину радіаційної обробки.

Останнім прикладом використання ізотопних джерел іонізуючих випромінювань є проект універсальної технологічної установки промислового опромінювання на ізотопах Європію [128, 223] з енергією 5 МеВ, що впритул наближає до межі, регламентованої МАГАТЕ для радіаційних технологій з гама-квантами. За несприятливих збігів обставин, що привели до порушення зв'язків між колективами-виконавцями, цей оригінальний проект не було здійснено.

Починаючи з 70-х років основним технічним засобом здійснення технологій з використанням іонізуючих випромінювань стали прискорювачі заряджених частинок. Ринок засобів для радіаційних технологій заповнений різними за параметрами прискорювачами електронів на енергії від 0,4 до 10 МеВ регламентованої міжнародними нормативними документами (МАГАТЕ) для мирного використання атомної енергії.



## 1.2 Промислове використання іонізуючих випромінювань в Україні

У вітчизняній практиці використовують технологічні прискорювачі ІЛУ (МДП РАДМА), ЕЛУ та «Електроніка» різних модифікацій [162]. Значну частку установок генерації мегавольтних електронів для фундаментальної науки та досліджень з радіаційних технологій складають оригінальні конструкції прискорювальних установок розроблених у ХФТІ (м.Харків).

На цей час в Україні діє декілька промислових осередків, що використовують іонізуючі випромінювання для стерилізації медичних засобів (таблиця 1.1) та радіаційно-хімічних епізодичних завдань.

Таблиця 1.1

Діючі установки радіаційної промислової стерилізації в Україні

| Знаходження                         | Рік запуску | Тип ДІВ                                   | Енергія, МеВ | Р, кВт | Споживання електроенергії Р, кВт/ККД, % | Об'єм, т/год (макс) | Завантаження на 2020 р. |
|-------------------------------------|-------------|---|--------------|--------|---|---------------------|-------------------------|
| Белгород-Дністровський, "Гемопласт" | 1975        | Co <sup>60</sup>                          | 1            | -      | 1кВт/100%                               | 1-3                 | 50                      |
| Київ, РАДМА ІФХ НАНУ                | 1986        | Резонансний прискорювач ІЛУ-6             | 2            | 20     | 1кВт/25%                                | 10                  | 65                      |
| Харків, ХФТІ НАНУ                   | 2005-2007   | Лінійний прискорювач власного виробництва | 10           | 10     | 150кВт/15%                              | 1                   | 100                     |

У вітчизняній практиці можна відзначити досить успішний розвиток технологічного напрямку використання іонізуючих випромінювань лише для знешкодження патогенної мікрофлори в медицині (стерилізація медичних виробів і засобів). Ще наприкінці 2003 року, частина з вітчизняних радіаційних установок знаходилась на етапі будівництва чи освоєння (таблиця 1.2, підтверджена працездатність виділених установок)

Є інформація про залучення до стерилізації електрофізичних джерел високоенергетичних нейтронів для стерилізації органічних та легких матеріалів. Електрофізичний генератор нейтронів ґрунтується на прискорювачі дейтронів

невисокої енергії (150-250 кеВ) та реакції їх з тритієм, який вноситься в титанову матрицю. Нейтронні генератори являються доволі екзотичними.

Таблиця 1.2

Техніка генерації електронів в Україні на 2003 рік

| №         | Прискорювач                              | Енергія, МеВ  | Струм пучка, А   | Область застосування             | Місце знаходження |
|-----------|--|---------------|------------------|----------------------------------|-------------------|
| <b>1</b>  | <b>ЕЛУ-4</b>                             | <b>3-4</b>    | <b>До 1</b>      | <b>Універсальний</b>             | <b>Київ</b>       |
| 2         | ЕЛУ-4                                    | 3-4           | До 1             | Універсальний                    | Київ              |
| 3         | РУЕ-1,5                                  | 0,5-1,5       | 10 <sup>-5</sup> | Розробка технологій              | Київ              |
| <b>4</b>  | <b>Електроніка</b>                       | <b>3-5</b>    | <b>До 1</b>      | <b>Універсальний</b>             | <b>Київ</b>       |
| 5         | ЄОЛ                                      | 0,5           | До 7             | Полімери                         | Київ              |
| <b>6</b>  | <b>ИЛУ-6</b>                             | <b>2</b>      | <b>12</b>        | <b>Медицина, хімія</b>           | <b>Київ</b>       |
| 7         | У-04-5                                   | 0,4           | 5                | Хімія                            | Київ              |
| 8         | ЕЛВ-2                                    | 14            | 20               | Дезінсекція зернових             | Одеса             |
| 9         | ЕЛУ-4                                    | 3-4           | 1                | Універсальний                    | Херсон            |
| 10        | ЕЛУ-6                                    | 5-7           | 0,7              | Універсальний                    | Харків            |
| <b>11</b> | <b>Власного виробництва</b>              | <b>10</b>     | <b>1</b>         | <b>Стерилізація (готовність)</b> | <b>Харків</b>     |
| <b>12</b> | <b>Різні зразки власного виробництва</b> | <b>0,1-20</b> | <b>Імпульс</b>   | <b>Наукові експерименти</b>      | <b>Харків</b>     |

Процес стерилізації на них ефективний і реальний, перевірений на нейтронному генераторі НГП-11 в ІЯД НАН України ще в кінці 2000-х років. Біологічна ефективність нейтронів перевищує  $\gamma$ -промені в понад 20 разів.

*Прогрес електрофізичних технічних засобів генерації іонізуючих випромінювань для радіаційних технологій.* Останнім часом, в порівнянні з 2000 роками, відзначено різке удосконалення конструкцій прискорювачів. Сучасний ринок таких засобів налічує велику кількість унікальних за своєю потужністю прискорювальних установок [99, 208], найбільш відомі наведено в таблиці 1.3. Характерною особливістю сучасного етапу їхнього розвитку є те, що більшість з них надходить не у традиційному вигляді прискорювача з його системами забезпечення, а у вигляді вже готових технологічних ліній, по аналогії з першими випусками спеціалізованих установок ІЯФ СВ АН РФ для опромінення кабелів чи дезінсекції зерна [55].

## Сучасний ринок потужної радіаційної техніки

| Установка             | Ціна,<br>\$·10 <sup>6</sup> | Параметри<br>пучка<br>(енергія,<br>потужність<br>) | Глибина обробки     |   | Продуктивність<br>при дозі 1 кГр, кг/год |                             |
|-----------------------|-----------------------------|--|---------------------|---|--|-----------------------------|
|                       |                             |  | Електрони           | Гальмівне<br>випромінювання,<br>1 сторона | Електрони                                | Гальмівне<br>випромінювання |
| ИЛУ-10                | 1.2                         | 5 MeV<br>50 кВт                                    | 4 г/см <sup>2</sup> | 30 г/см <sup>2</sup>                      | 90 000                                   | 4 500                       |
| ИЛУ-12                | 1.6                         | 5 MeV<br>60 кВт                                    | 6 г/см <sup>2</sup> | 30 г/см <sup>2</sup>                      | 108 000                                  | 8 000                       |
| ИЛУ-14                | 2.1                         | 7,5-10MeV<br>100 кВт                               | 8 г/см <sup>2</sup> | 30 г/см <sup>2</sup>                      | 180 000                                  | 13 500                      |
| TT-300 IBA<br>Belgium | 6.1                         | 10 MeV<br>150 кВт                                  |                     |   |  |                             |
| RDI USA               | 4.9                         | 5 MeV<br>250 кВт                                   |                     |   |  |                             |
| NHV Japan             | 5.0                         | 5 MeV<br>150 кВт                                   |                     |   |  |                             |
| Vivirad<br>France     | 4.4                         | 5 MeV<br>1000 кВт                                  |                     |   |  |                             |

В 2013 році така лінія була введена в експлуатацію в Республіці Казахстан. Це було спрямовано на прискорене впровадження іонізуючих випромінювань в реальний сектор економіки. З суміжних напрямків лише ОІЯД АН РФ здійснив розробку і випускає на ринок готові радіаційні установки на базі циклотрона важких іонів (ДЦ60) для виробництва плівкових мікрофільтрувальних матеріалів. Ці установки відрізняються високою одиничною ціною і високою вартістю експлуатації, тому економічно вигідні лише для випуску великих об'ємів екзотичної фільтрувальної продукції.

Однак більшість випущених останнім часом установок орієнтовані практично на стерилізацію та утилізацію відходів. А їх ефективність оцінювалась лише за можливостями стерилізації. Дані про такі оцінки, що були наведені в матеріалах і бюлетенях МАГАТЕ, показані в Таблиці 1.4.

Ефективність підприємств промислової радіаційної стерилізації з прискорювачами різних виробників (Виробнича завантаженість – 60 %, ресурс – 7500 год/рік)

| Тип прискорювача                        | ТТ-300     | ИЛУ-10    | Vivirad   |
|---|------------|-----------|-----------|
| Максимальна продуктивність, т/рік       | 408 800    | 91 750    | 912 500   |
| Енергія, МеВ                            | 10         | 5         | 5         |
| Доза, кГр                               | 12         | 12        | 12        |
| Витрати на спорудження підприємства, \$ | 25 500 000 | 4 364 000 | 8 800 000 |
| Витрати на експлуатацію, \$             | 3 662 800  | 919 500   | 2 000 000 |

Відомі нечисленні публікації про випробування прискорювачів фірми ТОРІЙ для цільових завдань важкої промисловості, але вони поки що не були підтверджені. В останніх повідомленнях була інформація про реконфігурацію нових прискорювачів (потужність пучка більше 10 кВт) цієї фірми в технологічні установки цільового чи загального призначення.

В Україні ІЯД НАН України традиційно проводить регулярні дослідження і розробки, спрямовані на конструювання нових технічних засобів для використання іонізуючих випромінювань у промислове виробництво.

В 70-х роках ІЯД та СКТБзДВ розроблено та виготовлено оригінальну конструкцію прискорювача протонів тандемного типу для вирішення екологічних задач.

Пізніше в 80-90-х роках проведено об'ємні дослідження і розроблено оригінальну конструкцію циклотрона ЦПР-144 на енергію 50 МеВ з великим струмом пучка для напрацювання діагностичних і терапевтичних ізотопів медичного призначення (радіофармпрепаратів–РФП)) та досліджено і запатентовано низку оригінальних технологій їх виробництва.

Традицію було продовжено в 90-2000-х рр. – створено науково-технологічну установку з прискорювачем електронів великої потужності. В процесі її експлуатації проведено численні розробки унікальної техніки для доукомплектування установки новими технічними засобами для розширення обсягів досліджень в різних галузях виробництва (кабелі, фіброматеріали, функціональні дослідження тощо), в

результаті чого утворено багатоцільовий технічний комплекс для досліджень радіаційних технологій.

Загалом можна констатувати досить активні роботи вітчизняної та міжнародної наукової спільноти щодо промислового використання іонізуючих випромінювань для створення новітніх (інноваційних) технологій виробництва. Але при цьому виникає питання, чому з певного часу відбулося гальмування подальшого розвитку цього напрямку. На 2020 рік відсутня інформація про розширення переліку промислових процесів (як і виробничих ліній), де використовують іонізуючі випромінювання як технологічний інструмент.

### **1.3 Аналіз проблем розвитку радіаційних технологій**

Високий темп розвитку технологій з використанням іонізуючих випромінювань, характерний для початку ери мирного використання атомної енергії підтримувався до 80-х років. За цей час МАГАТЕ – ФАО-ВООЗ ініціювало всеохоплюючі програми підвищення життєвого рівня населення. Розроблялись технології збільшення об'ємів виробництва та споживання харчових продуктів. Прикладом є міжнародна Програма МАГАТЕ створення високобілкових сортів зернових. Вагомі результати були отримані в ІЯД НАН України під керівництвом професора О.Є Меленевського та було виведено кілька високобілкових і урожайних сортів пшениці й інших зернових (рис. 1.15). В обсязі цієї програми О.Меленевським та співробітниками проведено ґрунтовні комплексні дослідження усіх ядерно-фізичних, біохімічних, ботанічних, агрохімічних і економічних проблем. Проблему отримання нових високобілкових сортів зернових було вирішено шляхом розробки унікального для сільського господарства методу неруйнівного контролю за вмістом базових маркерів харчової якості зерна з використанням реакцій взаємодії мегавольтних дейтронів з атомами кисню-азоту, основного компоненту білку. Ця методика не пошкоджувала властивостей досліджуваного зерна та дозволяла відокремити найбільш генетично цінні високобілкові зернинки у великих масах перед його висіванням.



Рис. 1.15 Радіаційна технологія проф. О.Є. Меленевського прискореної селекції високобілкових сортів зернових методами ядерного неруйнівного контролю

Аналогічні дослідження, але вже за принципами радіаційного мутагенезу, проводилися в інших країнах світу в ядерних дослідницьких центрах. Наприклад, аналогічні роботи, про що йдеться в матеріалах численних конференцій МАГАТЕ, проводилися в Індії. Вони дозволили запобігти масовому голоду населення шляхом виведення радіаційним мутагенезом нових високоврожайних сортів сорго. Бурхливо розвивались метрологічні напрямки використання радіоактивних ізотопів для вирішення проблем забезпечення питною водою населення в засушливих районах земної кулі. Активно розвивались напрямки використання іонізуючих випромінювань до синтезу нових матеріалів, аж до появи науково-технічного напрямку – радіаційної хімії. Надзвичайно активно розвивались напрямки використання іонізуючих випромінювань для вирішення проблем знешкодження мікроорганізмів в харчових продуктах, медичних засобах, комунальних і побутових відходах. А здійснювалось це в обсязі великих міжнаціональних і міжгалузевих Програм МАГАТЕ та національних проектів [33].

Характерно, що падіння темпів досліджень і прогресу радіаційних технологій корелює з низкою економічних і соціальних проблем, які в результаті призводять до втрати наукових і технічних зв'язків науковців різних країн та галузей. Можна зробити припущення, що це привело до втрати комплексності науково-дослідних робіт і, відповідно, до зниження якості та цінності отриманих результатів.

Необхідно враховувати соціально-економічні проблеми поширення радіаційних методів до економічного розвитку. Вимагає окремого дослідження причина зупинки унікальних технологічних ліній знешкодження токсичних відходів текстильного виробництва в Кореї (рис. 1. 16) [84].

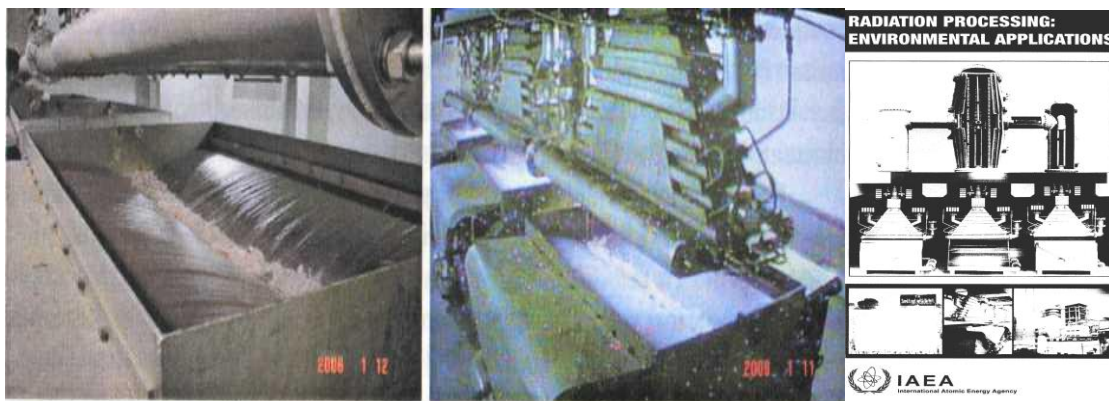


Рис. 1. 16 Найпотужніша в світі промислова лінія радіаційного знешкодження токсичних і інфікованих промислових стоків

З інтерв'ю директора фірми-виробника (ІЯФ СВ АН РФ) цієї надпотужної лінії повної очистки та знезараження стоків текстильного виробництва, флагмана сучасного напрямку знешкодження рідких токсичних і інфікованих стоків, впливає, що лінія була зупинена вже за декілька років експлуатації. На жаль, не було спеціального аналізу причин: технічних чи соціально-економічних. Очевидно, що без урахування цих моментів при розробці інноваційних методів використання ядерної енергії подальший розвиток радіаційних технологій неможливий.

Очевидними є методичні причини. З опублікованих матеріалів можна зробити висновок, що за останні 20 років не запропоновано принципово нових напрямків промислового використання іонізуючих випромінювань. Зростання обсягів використання радіації досягається збільшенням кількості технологічних, а часто і технічно-однотипних установок чи ліній, які ґрунтуються на давно відомих

принципах, а також за рахунок збільшення продуктивності досконаліших технічних засобів для реалізації традиційних принципів технологічного використання ядерної енергії.

#### **1.4 Висновки**

1. Іонізуючі випромінювання є ваговою складовою економічного розвитку і вносять суттєвий вклад у виробництво товарів і послуг.

2. Розроблено широкий асортимент різних технічних засобів для реалізації технологій з використанням іонізуючої радіації – радіаційних технологій.

3. Вітчизняна економіка має досить великий перелік електрофізичної радіаційної техніки, придатної для активного розвитку та промислового використання радіаційних технологій.

4. Вітчизняна ядерна наука характеризується високими науковими досягненнями, які можуть бути використані для подальшого прогресу радіаційних технологій і створення інноваційних методів корисного промислового використання енергії іонізуючих випромінювань.

5. У світовій економіці відзначається зниження темпів розвитку методів технологічного використання ядерної енергії. Основна причина – руйнування попередніх принципів комплексності наукових, методичних і технічних робіт при створенні радіаційних технологій.

*Завданнями досліджень* є науково-технічні проблеми, які вимагають негайного вирішення для розвитку інноваційних радіаційних технологій:

1. Удосконалення/створення технічних засобів для експериментальних досліджень і випробувань з урахуванням попередніх досягнень та досвіду прикладної ядерної науки.

2. Аналіз матеріалів досягнень провідних ядерних центрів щодо практичного використання іонізуючих випромінювань та встановлення перспективних напрямків фундаментальних та прикладних досліджень.



3. Пошуки нових методів використання іонізуючих випромінювань для модифікації матеріалів і підвищення якості промислових виробів.

4. Розробка технічних засобів здійснення експериментів та адаптація існуючої радіаційної техніки під нові перспективні дослідницькі та проектні роботи.

5. Розробка інноваційних технологій виробництва з використанням іонізуючих випромінювань та шляхів їх практичного впровадження у промисловість.

6. Розробка проектів новітніх промислових радіаційних технологій для базових галузей економічного розвитку.

**Методика вирішення проблеми.** Аналіз досвіду використання ядерної енергії в промисловому виробництві показав високу ефективність технологічних процесів з використанням іонізуючих випромінювань. Актуальним і виправданим є розробка шляхів подальшого розвитку таких технологій на сучасному рівні технічних можливостей. Визначальною є можливість створення експериментальних установок для генерації іонізуючих випромінювань з необхідними параметрами.

З наведеного переліку проблем та з урахуванням новизни необхідних досліджень та розробок, першочерговим заходом є формулювання концептуального підходу до їх вирішення.

З цією метою було розроблено єдину комплексну методику визначення завдань досліджень і технічних вимог з урахуванням усіх етапів подальших розробок інноваційних радіаційних технологій для різних галузей економіки. Схема методики наведена на рис. 1.17. Методика надає можливості отримувати інформацію для усіх ланок проектування інноваційних радіаційних технологій, як на етапі визначення перспективного напрямку, так і на етапах конструювання технічних засобів нового виробництва. Така методика забезпечує досягнення мети роботи – отримання інформації, необхідної для проектування радіаційної промислової техніки, а насамперед встановлення переліку відомих і добре досліджених ядерно-фізичних ефектів і методів їх використання для створення промислових виробничих процесів. За цією методикою спочатку передбачається

дослідження природи процесів модифікації матеріалу, а далі визначення методики їх використання та вимоги до технічних засобів реалізації.

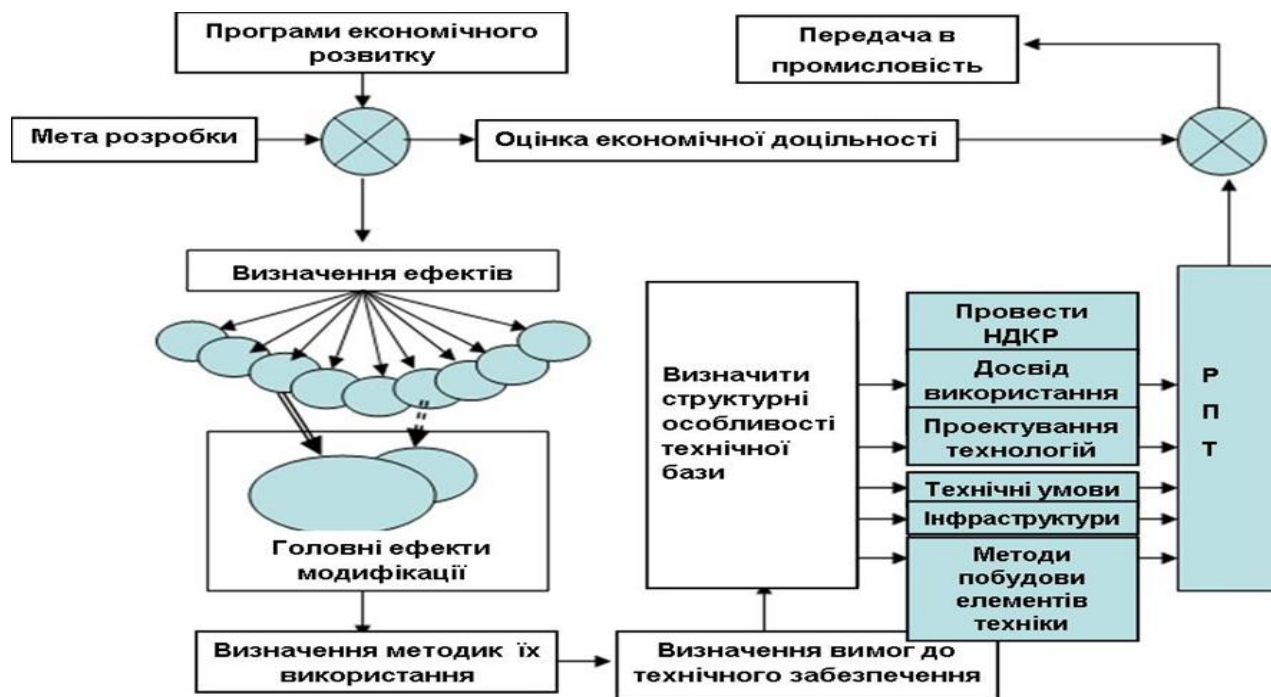


Рис. 1.17 Методика визначення технічних завдань на розробки інноваційних технологій використання іонізуючих випромінювань

Основне призначення радіаційних технологій – це модифікація сировини з метою отримання кінцевого продукту з заданими властивостями. З урахуванням цього розроблено методику проектування нових радіаційних технологічних процесів (рис. 1.18).

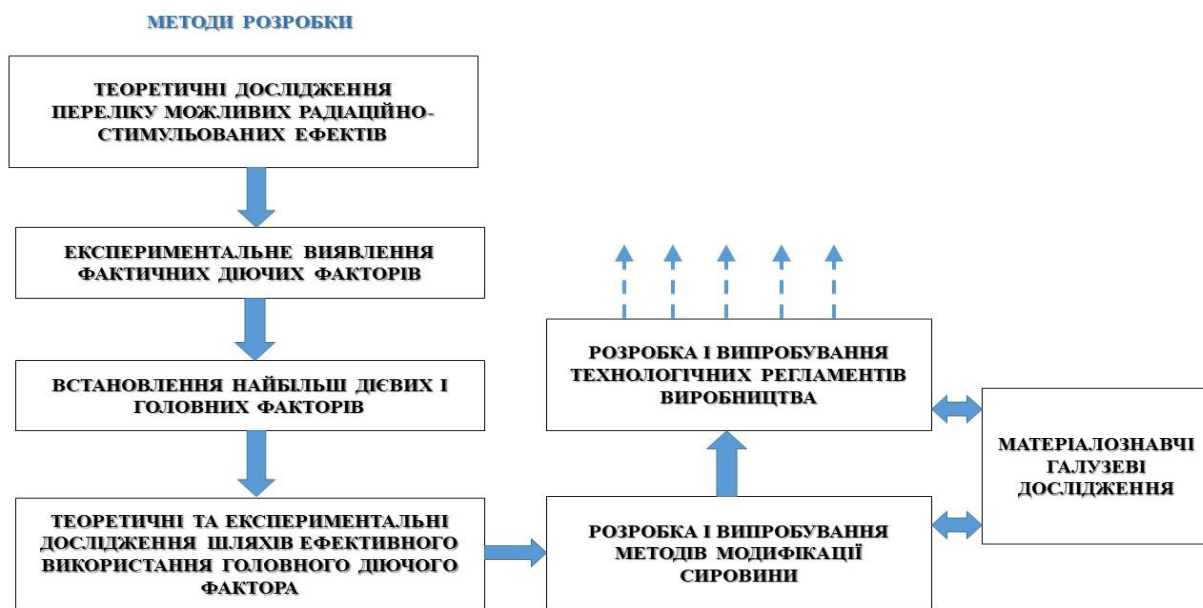


Рис. 1.18 Схема методики розробки технологічних процесів

Методика узгоджує дослідження радіаційних факторів модифікації, матеріалів з розробкою проектів технологічних регламентів. З отриманих результатів виділяються найдієвіші етапи і визначається оптимальна послідовність технологічних операцій та результати усіх технологічних етапів. Якщо дослідження встановлюють відповідність нових матеріалів заданим вимогам, то розробляється технічне завдання на проектування техніки та дослідження ефективності технології в промисловості.

Аналіз сучасного стану показав, що перспективними для розробки є використання іонізуючих випромінювань в наступних радіаційних технологічних процесах:

- дезінфекція харчових продуктів;
- енергоощадна та малозатратна переробка сировини в харчові продукти;
- випробування функціональності та сертифікації обладнання, критичного для експлуатації АЕС;
- виробництво покращених матеріалів для промисловості;
- гідрофобізація пористих будівельних матеріалів;
- знезараження і переробка полімерних відходів та зношених виробів;
- виробництво нанопористих полімерних матеріалів;
- підвищення ефективності медичних матеріалів;
- радіаційне машинобудування.

Умовою подальшого використання є створення сучасної техніки для здійснення інноваційних радіаційних технологій для різних галузей виробництва.

## **РОЗДІЛ 2 ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДІВ ВИКОРИСТАННЯ ЕНЕРГІЇ ВИПРОМІНЮВАНЬ ДЛЯ ВИРІШЕННЯ ПРОБЛЕМ В РІЗНИХ ГАЛУЗЯХ**

### **2.1 Дослідження методів використання енергії випромінювань для вирішення екологічних проблем**

Сучасна цивілізація зі своїми нестримними бажаннями все нових послуг і матеріалів створила для себе надзвичайно загрозову перспективу щодо безпеки життя. Наприклад, світовий автопром щорічно виробляє мільйони одиниць все нової та нової автомобільної техніки та супутніх матеріалів для її експлуатації – мільйони тон мастильних матеріалів, агресивних рідин для охолодження, автогуми тощо [96].

Актуальною проблемою сьогодення є утилізація відпрацьованих промислових відходів (фіброматеріалів). Особливо це стосується штучно створених матеріалів хімічної промисловості, які не мають природних механізмів деструкції. Термічні методи утилізації цих матеріалів економічно неефективні та становлять загрозу для навколишнього середовища та здоров'я людини.

Загально визнаним і найбільш економічно виправданим шляхом утилізації відпрацьованих матеріалів є їх вторинна переробка та повторне використання. В Україні розгорнута міжнародна програма по дослідженню можливостей і розробці промислових технологій утилізації та повторного використання матеріалів автомобільного корду [255, 258].

Особливістю програми є розробка та створення нових матеріалів – зміцненого асфальтобетонного покриття з мікроармуванням полімерними фіброматеріалами з відходів автомобільного корду.

За специфікою функціонального призначення автокорда, для його виготовлення використовуються високоміцні, стійкі до зносу фіброматеріали, зокрема – поліамідне волокно (ПА-волокно). Підвищена стійкість до впливу різних хімічних сполук, а також гігроскопічність цього матеріалу не дозволяють «безпосередньо» створювати на його основі міцні композитні з'єднання. Попередні випробування підтвердили безперспективність такого підходу.

Проведені дослідження показали, що посилити адгезивні властивості ПА-волокна можна шляхом його модифікації. Суть даного методу полягає в створенні на поверхні ПА-волокна вільних радикалів (поверхневої активації) і подальшого прищеплення до нього певних мономерів з високими адгезивними властивостями. Утворене з'єднання буде володіти всіма необхідними для мікроармування якостями.

Було показано, що з огляду на високу хімічну стійкість ПА-волокна, одним з перспективних і ефективних шляхів реалізації описаного методу може бути радіаційна модифікація [251].

Економічний прогрес цивілізації супроводжується збільшенням обсягів виробництва і споживання різних виробів з гуми. Наприклад, у 2000 році обсяг тільки зношеної автогуми перевищив 7 млн. тон. На даний час спостерігається постійна тенденція до росту. Зношені шини є джерелом тривалого забруднення навколишнього середовища: вони не піддаються біологічному розкладанню, вогнебезпечні, а у випадку загоряння їх досить складно погасити, вони є ідеальним місцем розмноження гризунів, комах і служать джерелом інфекційних захворювань.

Усе це надзвичайно токсичні матеріали, які не сприяють здоровому і безпечному життю. Досить взяти лише один сегмент – автогуму [255]. Об'єми відпрацьованої автогуми сягають мільйонів тон практично в усіх регіонах Земної кулі (хіба що за виключенням Африки). В Європі обсяг їх переробки методом подрібнення не перевищує 10%. Велика частина зібраних шин (20%) використовується як паливо. З огляду на принципово низьку ефективність теплових енергогенеруючих установок неважко помітити, що спалювання є неефективним способом утилізації гуми.

Більш перспективним напрямком є отримання дефіцитної сировини для виробництва нових гумових виробів із зношеної гуми та відходів її виробництва. У всьому світі створення ефективних технологій переробки відходів і зношеної гуми вважається привабливою і перспективною задачею. Такі технології завжди актуальні, оскільки одночасно вирішують проблему захисту навколишнього середовища.

Економічними стимулами розвитку цих методів в більшості країн є їх сировинна залежність і необхідність зниження собівартості виробленої продукції. Для України – це пошук шляхів повернення в господарський оборот бутилкаучуку - основного (імпортованого) компонента промислових і побутових гумових виробів.

З існуючих відомих методів регенерації зараз найбільш вигідним вважається радіаційний метод. Він заснований на руйнуванні стабільних хімічних зв'язків в полімерному матеріалі за рахунок пікохвильового випромінювання та стимулювання хімічних реакцій природного відновлення. Використовуючи радіацію можна реалізувати технічно надзвичайно просту технологію регенерації бутилкаучуку шляхом простого опромінення на спеціальних установках без будь-яких хімічних реагентів або механічної обробки.

Головною проблемою промислової реалізації технології регенерату бутилкаучуку з відходів виробництва є створення відповідних технологічних установок. Вирішенням проблеми розвитку напрямку променевої регенерації стала потужна універсальна радіаційна установка [47, 91, 96], створена на початку 2000х років в ІЯД НАН України з урахуванням всіх сучасних технічних і економічних вимог, що дає змогу виконувати великий обсяг науково-дослідних робіт, в тому числі в частині оптимізації технологічного процесу регенерації.

В результаті досліджень з'явилася повна поінформованість про дозові вимоги до промислового процесу. Стало можливим точно визначати оптимальні характеристики джерела випромінювань і всіх необхідних параметрів технологічного процесу.

Для створення промислової технології по мікроармуванню асфальтобетонного покриття ПА-волокном з відходів автомобільного корду були ретельно вивчені існуючі технологічні схеми виробництва асфальтобетонного покриття та утилізації відходів автомобільних шин. Розробка технологічних етапів і відпрацювання методик радіаційної модифікації ПА-волокна проводилася на експериментальній радіаційній установці ІЯД НАН України. Деякі технічні параметри цієї установки наведені в таблиці 2.1

## Технічні параметри установки

| № п/п | Об'єкти  | Технічні параметри             | Можливості установки                                      |
|-------|--|--------------------------------|---|
| 1     | Об'єм реакційної камери                                | $\approx 10 \text{ м}^3$       | ---   |
| 2     | Потужність радіаційної дози                            | до $1 \cdot 10^3 \text{ Гр/ч}$ | від $0,1 \text{ Гр/ч}$ до $14,4 \cdot 10^6 \text{ Гр/ч}$  |
| 3     | Величина фронтального перерізу опромінюваного простору | до $1 \text{ м}^2$             | до $3 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$ на виході з прискорювача |
| 4     | Час опромінення  | 100 – 1000 год                 | до 8 годин безперервної роботи                            |

При сучасній переробці відпрацьованої автогуми залишаються тисячі тон надзвичайно канцерогенних відходів – фіброматеріали з автокорду. Ці відходи являють собою дрібні волокна з високостабільних і надміцних полімерів та інших дрібних залишків від розробки гуми. Рівні небезпеки відходів фіброматеріалів різні – вони небезпечні для здоров'я при вдиханні чи попаданні на слизові оболонки, пірофорні – здатні до самозапалювання, є територією, де охоче розселяються різноманітні мікроорганізми, в тому числі патогенної групи, їх важко агрегатувати з іншими матеріалами через відсутність хімічної активності їх поверхні. Спалювати відходи фіброматеріалів небезпечно через виділення токсичних продуктів, а поховання в ґрунті мало що дає, бо в природі немає механізму біотрансформації їх у гумус. Проблемою утилізації відходів фіброматеріалів займаються численні наукові заклади в різних галузях. Існують національні та міжнародні програми їх вирішення [96, 200].

Ця дрібнозерниста пухка пірофорна суміш утворює дрібний пил (рис. 2.1) і легко розноситься повітряними потоками. За рівнем небезпеки вона відноситься до того ж класу, що і азбест. На середньому фото рис. 2.1 відображено процес опромінення пакетів з цим пилом потоками електронів низької енергії. Справа – результат – замість пухкої суміші отримуємо клейку і пластичну суміш, придатну для введення до складу будівельних матеріалів, наприклад асфальту. А саму суміш можна пресувати та виробляти з неї дешеву плівку для гідроізоляції в будівництві.

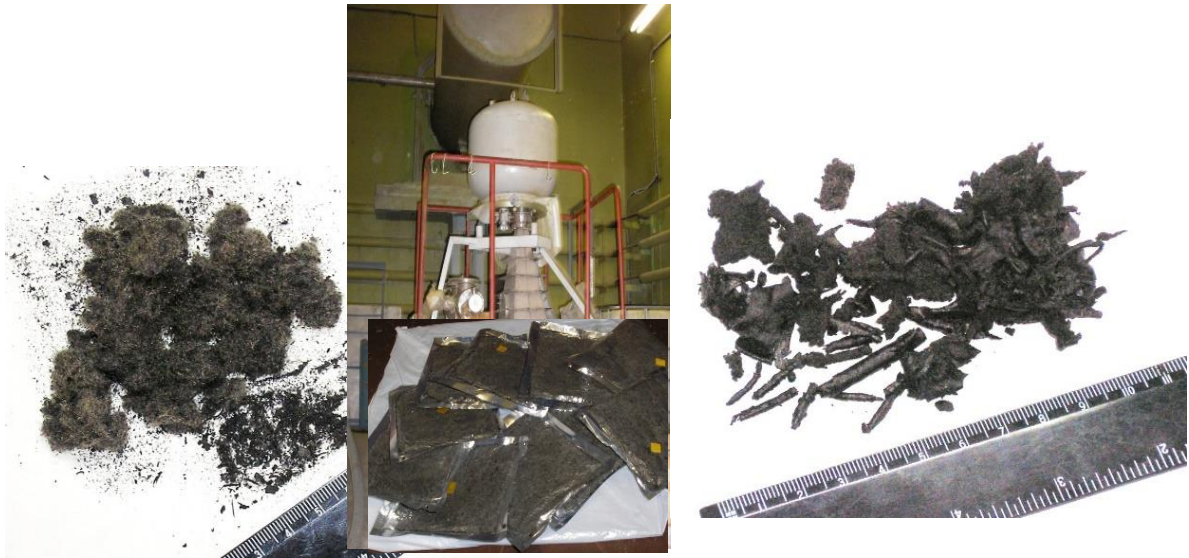


Рис. 2.1 Результат використання модернізованої установки в нових радіаційних технологіях знешкодження пухкої і легко займистої пірофорної канцерогенної суміші фіброматеріалів від переробки зношеної автогуми (зліва) у в'язку і пластичну масу для гідроізоляції чи покрівельного матеріалу (справа)

Добре помітно, що опромінення є дуже ефективним методом регенерації бутилкаучуку в відпрацьованих гумах [251]. Після променевої обробки мегавольтними електронами стара автогума перетворюється в пластичну масу, придатну для повторного використання. Перспективність променевої регенерації визначається високою актуальністю нових високотехнологічних процесів виробництва гумових виробів з дешевої сировини. Взято до уваги, що практичні результати від таких розробок можуть бути отримані тільки за умови створення відповідної технічної бази для здійснення процесів регенерації.

Це найбільш принципове питання, тому що технологічні схеми і техніка для подальших хіміко-технологічних етапів добре відомі та мало чим відрізняються від звичайної техніки для хімічного виробництва гумових виробів.

При вирішенні цих питань і нова технологія, і отриманий регенерат можуть бути використані на типових виробництвах гумових виробів.



## **2.2 Дослідження вимог до технічного удосконалення експериментальної ядерно-фізичної техніки ІЯД та шляхів її залучення до вирішення сучасних потреб промислових технологій**

*Розробка дослідницьких комплексів.* В розділі узагальнено результати досліджень шляхів створення нової і удосконалення діючої радіаційної техніки. Було поставлено завдання створити технічну базу для досліджень з нових напрямків промислового використання іонізуючих випромінювань. З цією метою необхідно вирішувати актуальну технічну задачу, бо ядерно-фізична радіаційна техніка є екзотичною і відноситься до числа складних унікальних за структурою технічних об'єктів з високою одиничною вартістю.

Вирішення цього завдання було здійснено за результатами попередніх досліджень вимог до технічного удосконалення експериментальної ядерно-фізичної техніки ІЯД для адаптації до сучасних потреб промислових технологій.

*Проблеми досліджень і розвитку радіаційних технологій в ІЯД НАН України.* Для нових досліджень необхідно, щоб наявна техніка для експериментів в ІЯД НАНУ надавала експериментаторам нові технічні можливості. Створена на засадах, характерних для попереднього періоду розвитку ядерної науки, вона не завжди відповідає сучасним вимогам дослідників. В даний час актуальним напрямком прогресу прикладної ядерної науки є всебічна модернізація існуючої техніки та створення нової технічної бази для ядерно-фізичних експериментів. З цією метою в перспективі передбачено залучати не тільки радіаційну установку з електронним прискорювачем, але й інші базові експериментальні установки ІЯД НАНУ для досліджень можливостей їх використання в різних галузях економічного розвитку.

Практично всі установки є унікальними складними приладами для ядерно-фізичних досліджень і становлять вагомую частку Національного надбання України. Унікальність і висока номінальна вартість такої техніки завжди передбачали пошуки шляхів підвищення ефективності їх використання. На даному етапі на перший план виходять вимоги впровадження методів прикладної ядерної фізики до промислових

технологій і залученням іонізуючих випромінювань для прискорення темпів економічного розвитку.

Перелік експериментальних дослідницьких установок ІЯД НАН України наведено на рис. 2.2.



Рис. 2.2 Експериментальна техніка інституту ядерних досліджень НАН України

В таблиці 2.2 узагальнено напрямки виробництва, в яких ця унікальна і дорога ядерно-фізична техніка має перспективу використання. Така класифікація здійснюється за методикою, наведеною на рис. 1.17, і охоплює найпоширеніші напрямки промислового використання іонізуючих випромінювань з переліку експериментально-досліджених попередньо в секторі радіаційних технологій інституту впродовж останніх 20-ти років. Останнім часом з'явилися публікації про можливість застосування потужних потоків іонізуючих випромінювань для потреб важкої індустрії, неруйнівного контролю, інтроскопії тощо.

## Технологічні можливості експериментальних установок ІЯД НАН України

| Перспективні напрямки                        | У-120 | У-240 | ЕГП | ЕП-0.5 | РТУ | ВВР | ТГ-1 | НГ |
|--|-------|-------|-----|--------|-----|-----|------|----|
| Ядерна медицина                              |       |       |     |        |     |     |      |    |
| Медичні ізотопи                              |       |       |     |        |     |     |      |    |
| Застосування радіолігатів                    |       |       |     |        |     |     |      |    |
| Радіаційна модифікація ФЗ                    |       |       |     |        |     |     |      |    |
| Селекція зернових                            |       |       |     |        |     |     |      |    |
| Радіаційна стимуляція                        |       |       |     |        |     |     |      |    |
| Радіаційні технології для індустрії          |       |       |     |        |     |     |      |    |
| Захист с/г культур                           |       |       |     |        |     |     |      |    |
| Утилізація промислових відходів              |       |       |     |        |     |     |      |    |
| Моніторинг екології                          |       |       |     |        |     |     |      |    |
| Стерилізація комунальних і медичних відходів |       |       |     |        |     |     |      |    |
| Трекові мембрани                             |       |       |     |        |     |     |      |    |
| Разові замовлення                            |       |       |     |        |     |     |      |    |

З даної таблиці видно, що найширші перспективи технологічного використання має радіаційна установка (РТУ) з прискорювачем електронів. Широку перспективу має також і прискорювач електронів 0,5 МеВ (ЕП-05). Вибір об'єкта досліджень і модернізації здійснювався за показниками реального технічного стану. Прискорювач електронів 0,5 МеВ знаходиться в стані монтажу.

В даний час найбільш підготовленим для розгортання робіт з промисловим використанням установок інституту є прискорювач електронів середньої енергії 4 МеВ, що за своїми основними характеристиками надає принципові можливості подальшого розвитку і адаптації до нових прикладних ядерно-фізичних досліджень. Він потенційно може бути модернізований у дослідницький пристрій з регулюванням кінетичної енергії понад 50% та забезпечувати перспективу збільшення інтенсивності виведеного пучка майже на 30 % (до 1,5 А/імп). Останній вибрано як основний об'єкт досліджень для вирішення проблем розвитку технічної бази та пошуку перспективних шляхів практичного використання іонізуючих випромінювань.

*Об'єкт дослідження.* Радіаційна науково-технологічна установка (РТУ) з прискорювачем електронів ІЯД НАН України створювалась на основі потужного

промислового прискорювача електронів до енергії 4-5 MeV з потужністю пучка до 5 кВт. Вона була побудована за типовою структурою установки наукового призначення, як це показано на рис. 2.3.

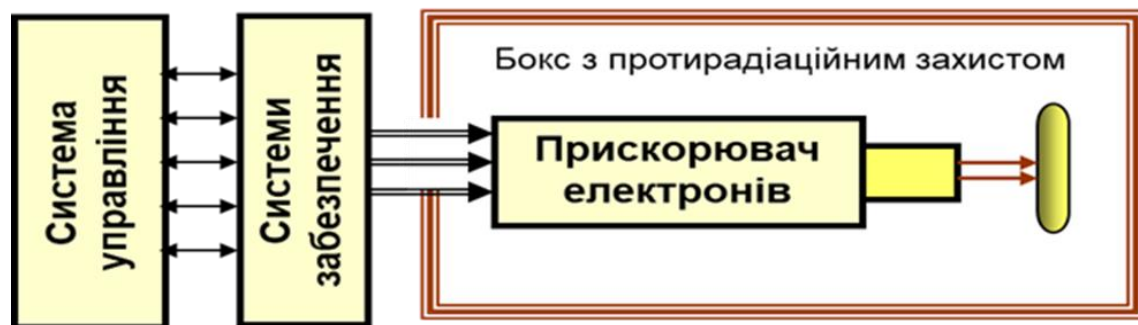


Рис. 2.3 Структура науково-дослідної установки на базі прискорювача 4 MeV

Установку було споруджено в 2003 році в ІЯД з метою дослідження ефективності застосування іонізуючих випромінювань для стерилізації харчових продуктів для визначення можливостей подовження строків їх зберігання та безпеки споживання. Отримані наукові результати є оптимістичними. Однак для їх практичного використання виявилось необхідним удосконалити структуру наукової установки з метою розробки і випробування методів прикладного використання та розробки технології промислового виробництва нових видів харчових продуктів. Виявили необхідність наближення структури установки до структури типового виробництва, з можливістю відпрацювання усіх проблем промислового використання іонізуючих випромінювань для харчового виробництва. Насамперед, було облаштовано транспортний засіб для конвеєрного подавання на опромінення дослідних зразків і готових харчових продуктів промислового виробництва, а також створено засоби контролю якості радіаційного технологічного процесу (технологічної дозиметрії). В результаті було утворено структуру дослідницької технологічної установки [96], схема якої наведена на рис. 2.4.

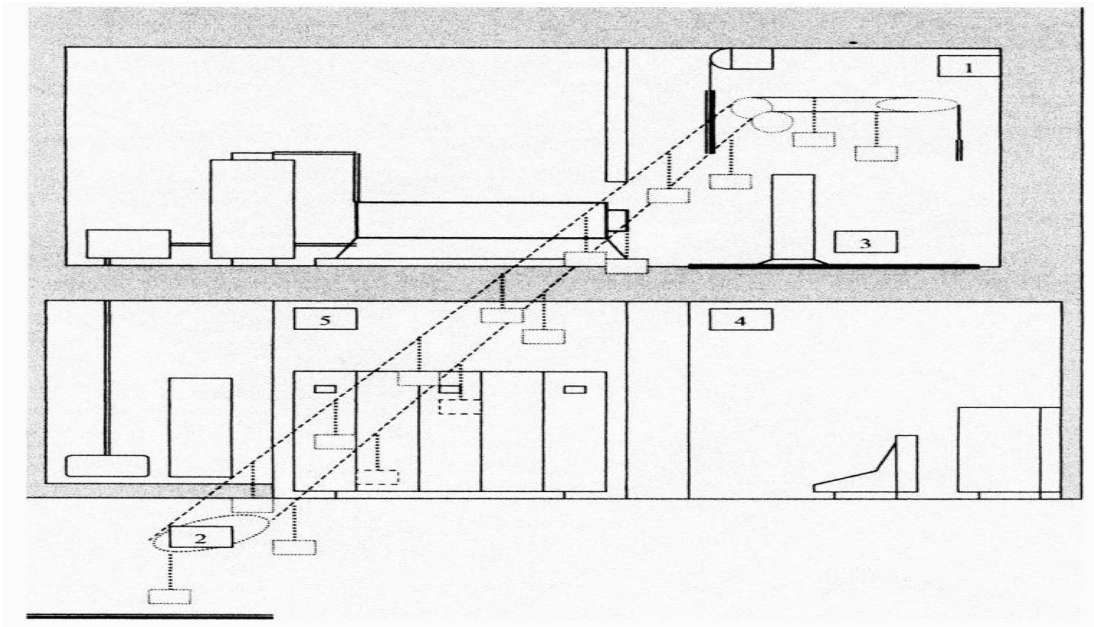


Рис. 2.4 Адаптація прискорювача під прикладні дослідження радіаційних технологій харчових продуктів [208]

Програма цих досліджень була успішно виконана і завершилась випуском готової продукції за конвеєрним методом виробництва [96, 253] та розробкою і сертифікацією в МОЗ України технологічної документації. впродовж подальшої експлуатації установки було показано, що радіація може використовуватися як засіб високоефективного виробництва не тільки харчових продуктів, але і для вирішення проблем у інших галузях економіки. З метою розширення обсягів прикладних досліджень щодо використання ядерної енергії та іонізуючих випромінювань модернізацію було продовжено для адаптації установки під інші використання [167, 271] і доповнено створеними для цього численними новими технічними засобами. В результаті було створено оригінальну структуру експериментальної науково-дослідної радіаційної установки з розширеними можливостями прикладних і наукових досліджень (рис. 2.5).

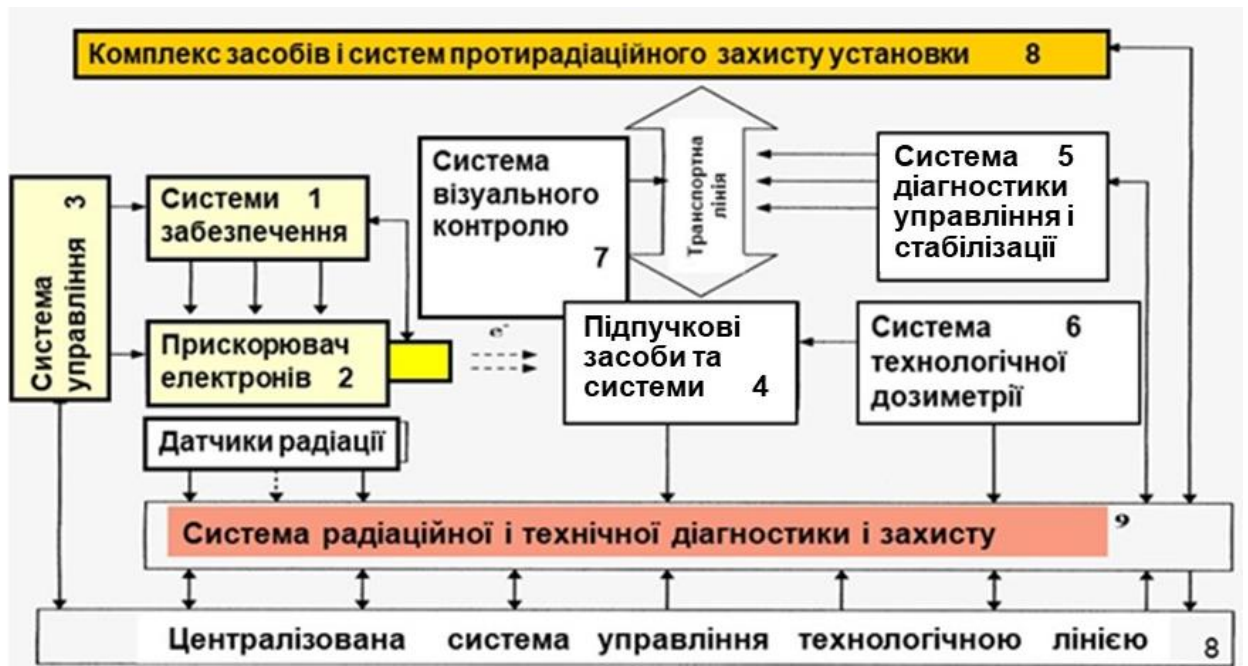


Рис. 2.5 Структура науково-технологічної установки на базі прискорювача електронів для досліджень та розробки нових методів промислового використання енергії іонізуючих випромінювань

Для такої установки, з огляду на вкладення в її модернізацію значних ресурсів, важливою є проблема максимально ефективного використання наданих можливостей, з урахуванням необхідності залучення до досліджень методів і фахівців суміжних галузей. Цьому сприяє оригінальна складна структура базової установки, яка надає можливості подальшого удосконалення техніки установки, методів і засобів метрології іонізуючих випромінювань. Важливо реалізувати ці можливості для адаптації установки під конкретні технологічні дослідження та знайти варіанти створення багатоцільового експериментального комплексу радіаційних досліджень з різними видами іонізуючих випромінювань. Досягнення таких результатів було метою даного напрямку досліджень.

*Дослідження сучасних нових вимог до радіаційної техніки.* Теоретично досліджені принципи технічного вдосконалення комплексу електротехнічного й електронного обладнання для створення сприятливих умов розробки інноваційних методів використання іонізуючих випромінювань. За раніше наведеною методикою досліджені літературні джерела [13, 14, 32, 33, 42, 52, 56, 74, 85, 142], в тому числі з суміжних галузей науки та техніки, які доводиться використовувати при

конструюванні вузлів радіаційної техніки та установок в цілому. Їх узагальнені результати наведено на рис. 2.6.

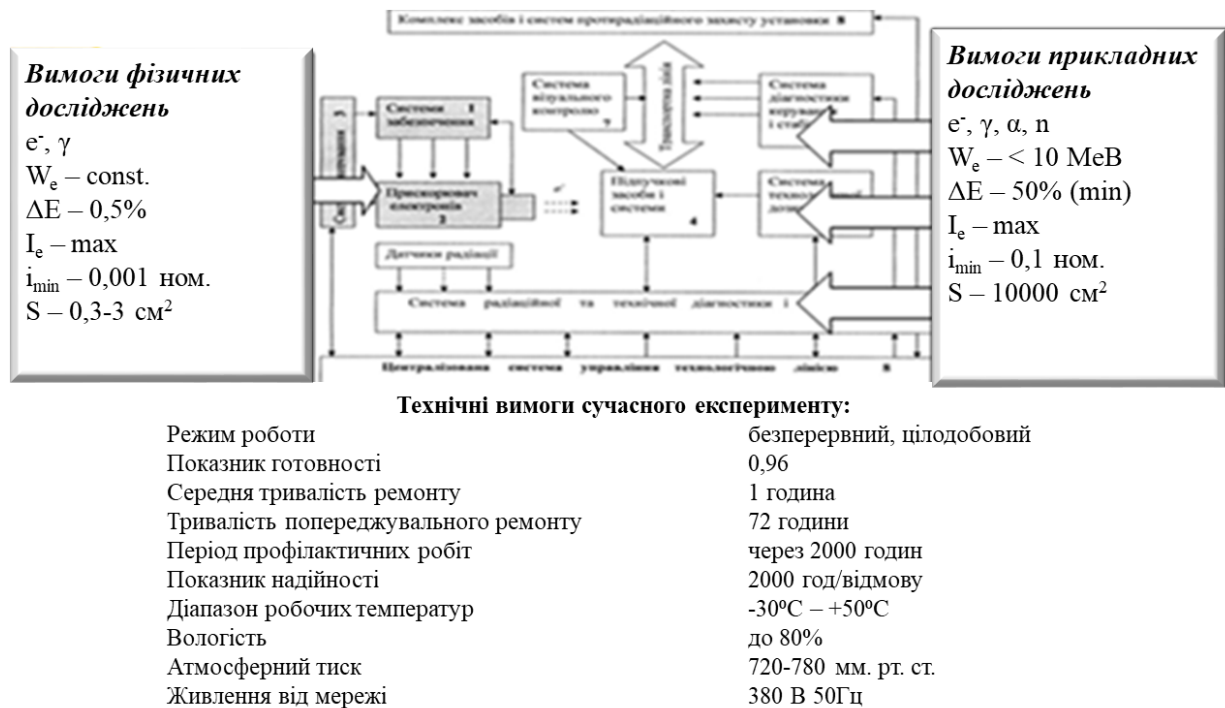


Рис. 2.6 Технічні вимоги до експериментальної бази досліджень з радіаційних технологій

Визначено перелік фізичних параметрів, які необхідно забезпечити експериментаторам на сучасному етапі розвитку прикладних ядерних та радіаційних досліджень і радіаційних технологій, та оптимальні шляхи подальшого удосконалення радіаційної установки з прискорювачем електронів 4 MeV з урахуванням попереднього досвіду розробки й експлуатації.

Доведено, що насамперед необхідно наблизити структуру установки до структури реального виробництва і вводити в її склад засоби моделювання характерних технологічних функцій (операцій) виробництва.

*Дослідження і розробки технічних засобів для адаптації установки під сучасні прикладні дослідження.* Основна проблема – відсутність спеціалізованої радіаційної техніки, насамперед для науково-дослідних робіт, як прикладу для проектування. Адже в галузі виробництва матеріалів діють жорсткі конструкційні та метрологічні вимоги до методів розробок, досліджень і випробувань (державні і галузеві стандарти).

На даному етапі важливим для розвитку напрямком є створення спеціалізованої радіаційної техніки, здатної забезпечити проведення цих обов'язкових нормативних заходів при розробці нових конструкційних матеріалів з бетону.

Досліджувалися шляхи використання ядерної енергії в новітніх технологіях покращених будівельних матеріалів та адаптація існуючої ядерно-фізичної експериментальної техніки до таких робіт.

Адаптація техніки спрямована на розширення можливостей розробки новітніх методів використання іонізуючих випромінювань в промисловості. Вивчення проблеми адаптації технічної бази в ІЯД показав, що в цілому вона відповідає більшості принципів вимог таких досліджень в частині реалізованої метрології радіаційних полів та експлуатаційних характеристик щодо робочих діапазонів поглинутих доз.

Необхідно модернізувати вузли подавання та опромінення дослідних зразків індустріальних виробів, наприклад, бетонів. Насамперед через невідповідність габаритів входних лабіринтів до вимог бетонної галузі та вагових показників дослідних зразків. Існуючий конвеєр був розрахований на подавання зразків масою до 2,5 кг, розмірами не більше 500x600 мм і товщиною до 40 мм. Необхідно було врегулювати невідповідність вантажопідйомності транспортного засобу, вузлів під'єднання до нього важких касет з стандартизованих досліджуваних бетонних виробів.

При цьому неодмінно виникають проблеми стабільності руху конвеєра, діапазону регулювання його швидкості та її стабільності в усіх режимах. Останнє є запорукою отримання заданих метрологічних показників в дослідженнях, бо швидкість і стабільність переміщення зразків через зону опромінювання визначають величину та стабільність відпускання дози опромінення, так само як і стабільність пучка електронів і його інтенсивність. Ці показники пов'язані між собою технологічними розрахунками та вимагають узгодження при модернізації транспортера.



Певні проблеми виявлено з енергетичною невідповідністю. На радіаційній установці ІЯД зразки опромінюються електронами з середньою енергією 4-5 МеВ. Що не відповідає вимогам, наведеним на рис. 2.6. Зазначимо, що попереднє покоління радіаційної техніки для опромінення бетону базувалося на використанні гама-випромінювання  $^{60}\text{Co}$ , що дозволяло успішно здійснювати радіаційну обробку досить габаритних зразків.

Можливості радіаційної установки ІЯД обмежені глибиною обробки матеріалу шаром всього 10-12 мм. Тому необхідно розробити інші методи радіаційної обробки і, відповідно, знайти шляхи удосконалення технологій нових бетонів, наприклад, створення композитних конструкційних матеріалів.

*Мета і завдання розробки.* Метою розробки є створення можливостей освоєння різних напрямків промислового використання ядерної енергії і вирішення проблеми впровадження радіаційних технологій до індустрії промислових матеріалів на радіаційній установці ІЯД. В цих галузях необхідно створити можливість опромінювати не тільки габаритні, але й важкі матеріали.

Було поставлено завдання удосконалити конвеєр радіаційної установки для можливості залучити її до напрямку досліджень-розробки інноваційних методів виробництва покращених індустріальних матеріалів і виробів. Одночасно покращити рівень досліджень і привести метрологічні можливості установки у відповідність до галузевих стандартів виробництва.

Промислова технологічна установка характеризується якістю й ефективністю її специфічного вузла – транспортною лінією, за допомогою якої матеріали (вироби) поступають і видаляються з реакційної камери. За визначенням метрологічних вимог до нових технологій, цей вузол суттєво впливає на технологічні можливості установки і якість її продукції. Через високі технічні та метрологічні вимоги така лінія є складним технічним об'єктом.

З цією метою структура транспортера доповнювалася низкою додаткових спеціально розроблених технічних засобів, які розраховані на отримання вищенаведених показників і виконання сучасних вимог прикладних досліджень. Сюди включено засоби контролю швидкості транспортеру, засоби контролю

положення опромінюваних зразків, засоби відео нагляду, засоби індикації та керування, в тому числі і автоматичного керування за показниками відпущеної дози. В результаті на радіаційній установці було сформовано структуру транспортної лінії, що відповідає більшості вимог в дослідженнях з індустрійними матеріалами.

На рис. 2.7 наведена схема транспортної лінії, розроблена згідно поставлених раніше технічних і метрологічних вимог. Основою лінії є транспортер з приводами його руху.

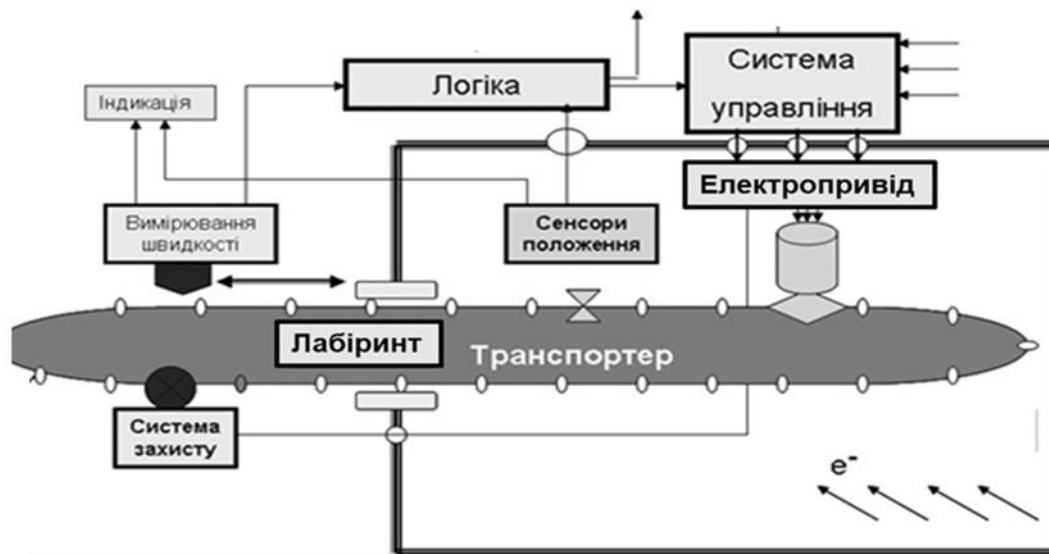


Рис. 2.7 Модернізація транспортера

В результаті було створено сучасну техніку для досліджень і розробки промислових радіаційних технологій з наступними технічними характеристиками: продуктивність – до 2 тон на годину; швидкість – до 1 метра на хвилину, стабільність руху – до 3% та точність позиціонування – до 0,3 см.

Для його роботи в складі радіаційної техніки передбачено системи технічного забезпечення (захист, контроль переміщення, різноманітні індикатори стану, логіку керування, систему засобів управління й інтерфейс зв'язку з пультом установки). Враховуючи, що частина цієї транспортної системи знаходиться та працює в зонах високої радіації (рис. 2.8), переміщення зразків відбувається по складних траєкторіях і стабільно, згідно метрологічних вимог дорадіаційного процесу, її проектування є варіантом вирішення непрості технічної задачі.

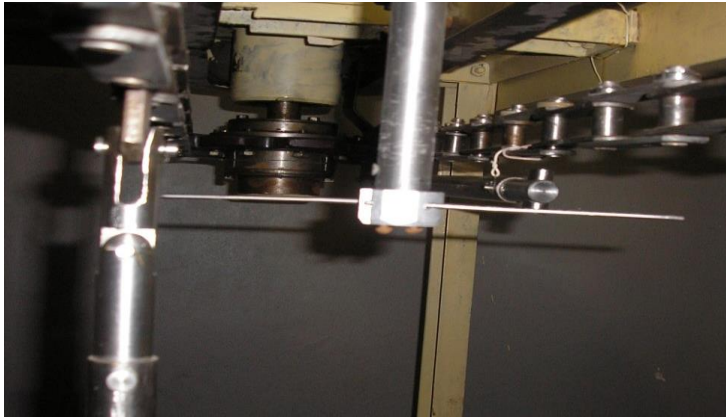


Рис. 2.8 Конструкція датчика для контролю положення зразків в зоні опромінювання

В результаті отримали модернізовану транспортну лінію подавання зразків на радіаційну обробку (рис. 2.9).



Рис. 2.9 Розроблена та реалізована багатфункціональна транспортна лінія подавання на опромінення габаритних зразків великої ваги [96]

За своїми показниками ця лінія відноситься до технічних засобів підвищеної точності та забезпечує функціонування в зонах з високим рівнем іонізуючої радіації. Досвід експлуатації свідчить, що за отриманими параметрами вона відповідає вимогам до радіаційних технічних засобів прикладних досліджень, які були поставлені в завданні.

## 2.3 Удосконалення системи технологічної дозиметрії радіаційної установки

Метою модернізації системи радіаційних вимірювань було виконання метрологічних вимог в дослідженнях та при розробці нових радіаційних технологій і проведенні ядерно-фізичних досліджень на промисловому технологічному прискорювачі електронів з пучком великої потужності.

В базовій комплектації радіаційна установка забезпечує повний перелік контрольованих параметрів радіаційного процесу для технологій з легкими і малогабаритними зразками харчових продуктів. При переході до обробки важких і щільних твердих матеріалів виникає проблема вимірювання реального розподілу поглинутої доз в матеріалах і виробках, формування та калібрування змішаних (гама-електронних) радіаційних полів великого перерізу, особливо важливих для здійснення комплексних функціональних випробувань критичного обладнання АЕС. Для вирішення цієї проблеми штатну систему технологічної дозиметрії необхідно доповнити додатковими засобами радіаційних вимірювань.

Для досягнення мети розроблено низку технічних рішень та необхідних засобів. Завданням цього етапу було удосконалення штатної системи технологічної дозиметрії радіаційної установки (СТД РТУ).

Діюча на установці система технологічної дозиметрії створювалась поступово впродовж терміну експлуатації цієї науково-дослідної техніки при вирішенні різних завдань досліджень з використанням мегавольтних електронів. Її склад наведено на рис. 2.10. Основним датчиком параметрів виведеного пучка є циліндр Фарадея (1), розроблений для вимірювань пучків електронів до 10 МеВ і кутом зору близько 3 градусів [168]. Оперативним датчиком постійного вимірювання інтенсивності виведеного пучка та його структури є «прозорий» датчик (2), розроблений для контролю пучка вже в атмосфері [138]. Контроль за розподілом радіаційних полів відбитого та зворотно-розсіяного гальмівного випромінювання здійснюється за допомогою рухомого мобільного радіометра (3) [94].

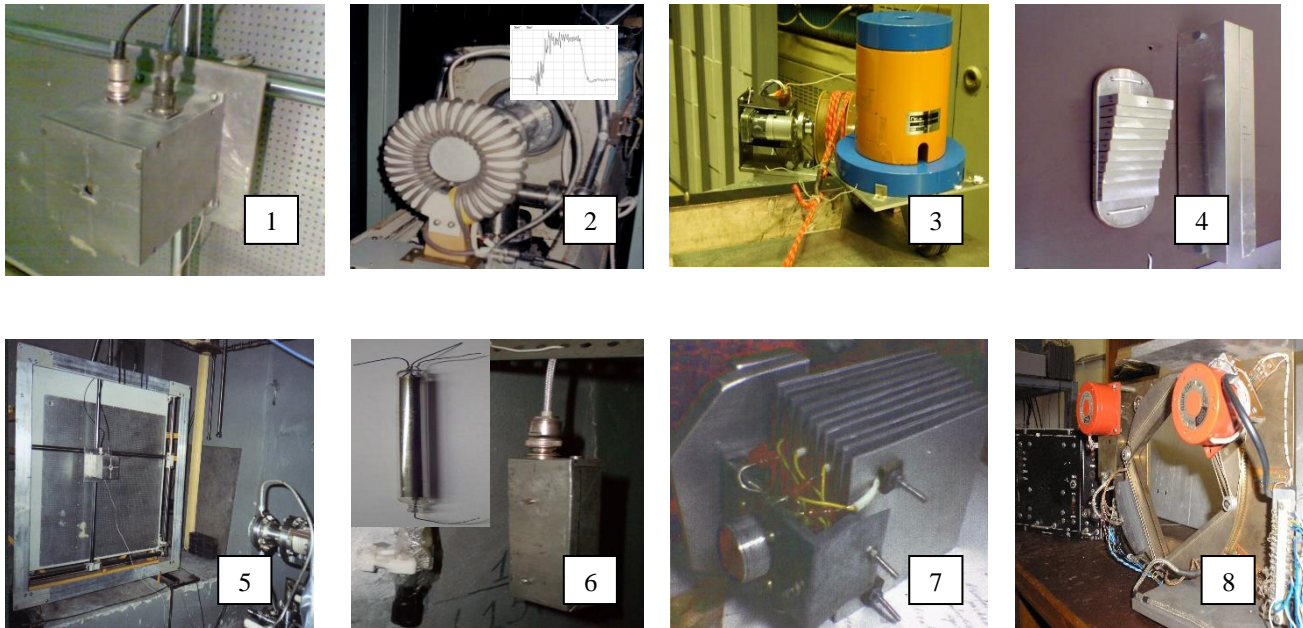


Рис. 2.10 Склад штатної системи технологічної дозиметрії РТУ

Калібрування радіаційних полів по енергії та контроль енергетичного спектру здійснюється датчиками (4) з повним поглинанням пучка [169].

Основним датчиком параметрів виведеного пучка є циліндр Фарадея (1), розроблений для вимірювань пучків електронів до 10 MeV і кутом зору близько 3 градусів [168]. Оперативним датчиком постійного вимірювання інтенсивності виведеного пучка та його структури є «прозорий» датчик (2), розроблений для контролю пучка вже в атмосфері [138].

Контроль за розподілом радіаційних полів відбитого та зворотно-розсіяного гальмівного випромінювання здійснюється за допомогою рухомого мобільного радіометра (3) [94]. Калібрування радіаційних полів по енергії та контроль енергетичного спектру здійснюється датчиками (4) з повним поглинанням пучка [169].

Просторовий розподіл поля опромінювання здійснюється циліндром Фарадея або датчиком гальмівного випромінювання (6) [170, 209], який розміщується на електроприводному механізмі (вимірювальний планшет) (5), який переміщує датчики в 3-х координатах і надає можливість контролювати інтенсивність потоку електронів в будь-якій точці опромінюваного об'єму (близько 1 м<sup>3</sup>) [156].

До калібрувальних і оперативних засобів належить вимірювач спектру електронів в пучку (7), який з дискретністю 1 MeV надає операторові можливість постійно контролювати максимальну енергію й енергетичний спектр пучка електронів [96]. Для прецизійних вимірювань перерізу пучка виведених електронів у системі передбачено електромеханічний сканер (8), який при необхідності встановлюється на вході в експериментальну камеру та надає можливість практично не впливаючи на пучок контролювати переріз і стабільність виведеного пучка [133, 155]. В наведеному складі система технологічної дозиметрії надає можливість проведення будь-яких досліджень з опроміненням легких матеріалів та калібрування установки.

*Розробки технічних методів і технічних засобів удосконалення СТД РТУ.* Метрологія прикладних досліджень з твердими індустрійними матеріалами передбачає вимірювання фактичного розподілу поглинутої дози всередині опромінюваного матеріалу або виробу. З цією метою використано метод фантомів – еквівалентів досліджуваного виробу, з елементами пошарового контролю поглинутої дози (рис. 2.11). Такі датчики корисні при формуванні параметрів радіаційного процесу.

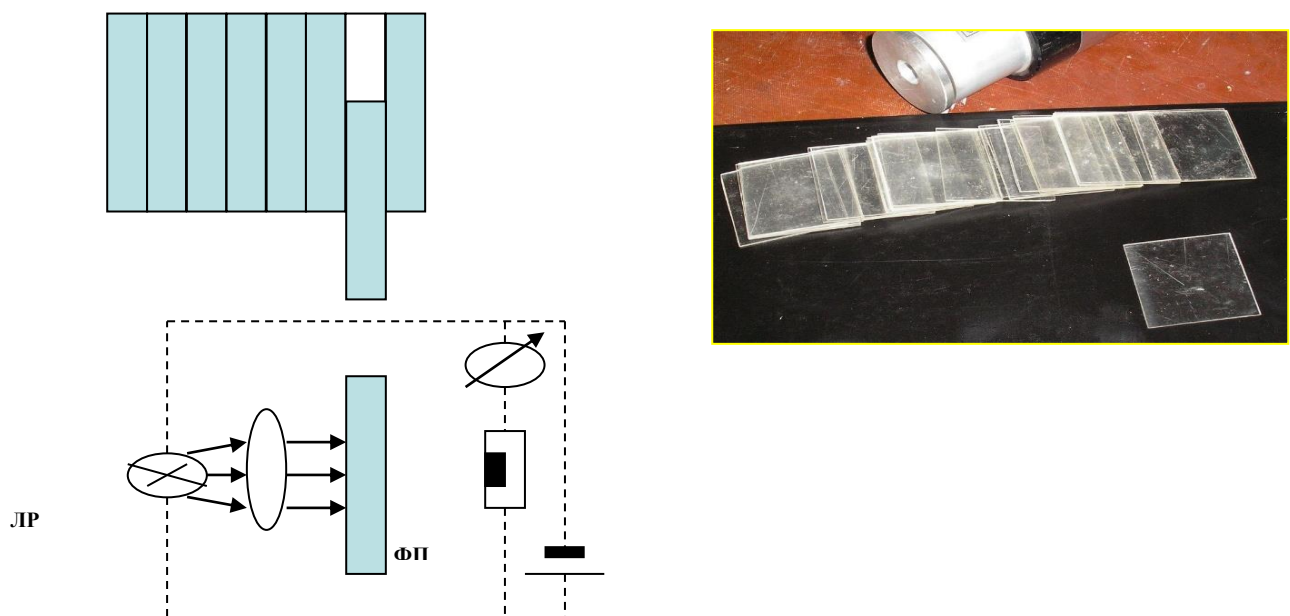


Рис. 2.11 Методика контролю за розподілом енергії та поглинутої дози за допомогою твердотільних прозорих пластинок (фото) [227,228]

На рис. 2.11 наведено розроблену для установки схему методики вимірювань енергії та розподілу поглинутої дози за допомогою твердотільних чутливих елементів з фотометричного скла [96, 162].

Такі методи доцільно використовувати лише в промислових радіаційних процесах, наприклад, при пікохвильовій або електронній обробці з технологічними дозами – більше 1 кГр, при яких ефекти твердофазової модифікації структури детекторів проявляються більш виразно [207].

За законами взаємодії іонізуючих випромінювань з твердим тілом відбувається деструкція матеріалу, яка виражається в зміні оптичних характеристики – прозорості або відбитому спектрі (колір опроміненого скла змінюється – рис. 2.12).

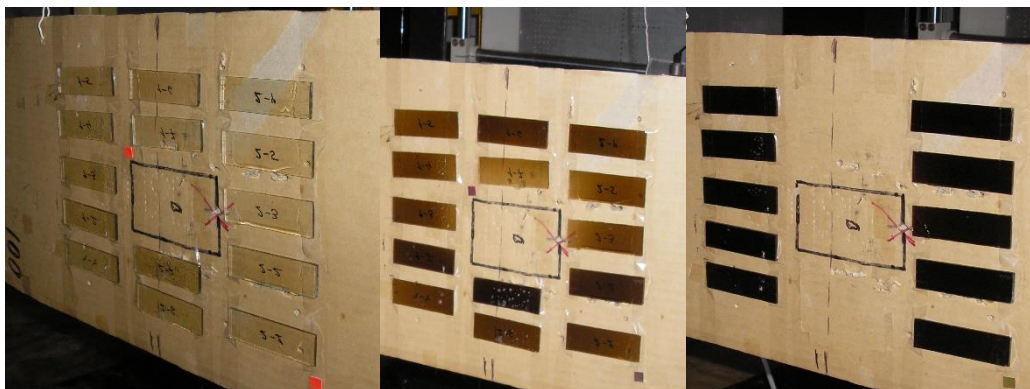


Рис. 2.12 Дослідження радіаційної чутливості дозиметрів з фотометричного скла

Для отримання коректної інформації ці показники спочатку вимірюються шляхом опромінення в стаціонарному радіаційному полі відомої інтенсивності і енергії. Після такого калібрування процес контролю за вказаними показниками здійснюється за схемою, наведеною на рис. 2.11. Тут вимірювачем є оптичний денсифотометр, де порівнюється зсув прозорості опроміненого скла з неопроміненим. Результат визначається вже з урахуванням параметрів калібрувального радіаційного поля.

Прозорість пластинок вимірюють по черзі та будують функцію поглинутої дози, визначають енергію при опроміненні мегавольтними електронами.

Для поточного використання в дослідженнях і технологічних випробуваннях як основного варіанту засобу калібрування радіаційних полів на установці ІЯД розроблено просту конструкцію багатоканального фантому, схема якого наведена на рис. 2.13. Точність таких вимірювань забезпечується вибором матеріалу наповнювача та його товщиною (дискретність вимірів). Найточнішими є датчики, де наповнювачем є той матеріал, що і в досліджуваному процесі, а детекторами виступають тонкі плівкові хімічні дозиметри. Зчитування інформації відбувається послідовно за допомогою спектрофотометрів-денситометрів. Якщо такі пластини наповнювача важко виготовити з досліджуваного матеріалу, його заміняють на еквівалент з близькими показниками, але доступний для обробки і виготовлення тонких пластин-наповнювачів.

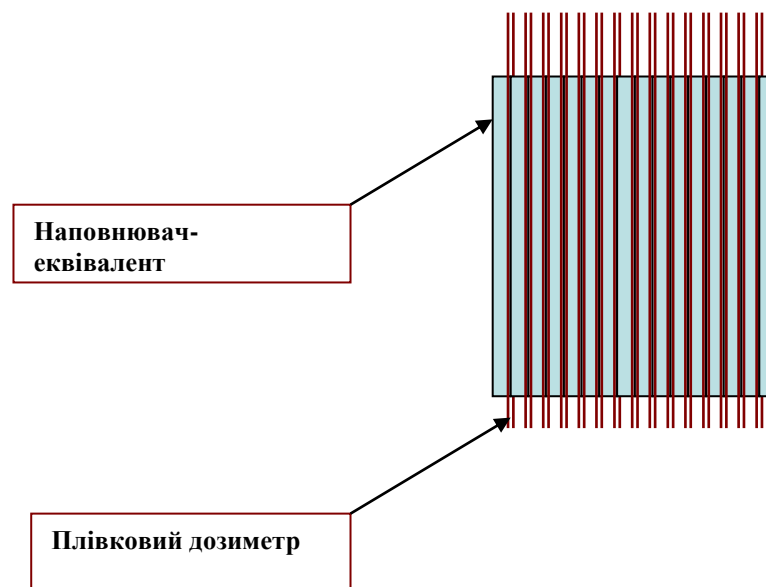


Рис. 2.13 Пакет-збірка для вимірювання енергії з високою точністю

Для технологічних випробувань розроблено методику використання тонких сертифікованих хімічних плівкових дозиметрів-свідків типу СФ-0,5, ЦВИД промислового виробництва. Методика розрахована на вимірювання в технологічних процесах, пов'язаних з опромінюванням мегавольтними електронами в пучках прискорених електронів. В реальних пучках заряджених частинок від прискорювача практично неможливо знайти навіть два електрони, які б рухалися паралельно. Їх рух визначається емітансом пучка і теоретично описується шістьма координатами



[48]. Тому при опроміненні складної конструкції датчика зі щільного матеріалу наявність тонкої щілини практично не впливає на отриманий результат. А результатом є потемніння плівкового дозиметра-свідка чи тонкого фотометричного скла. З результатів вимірювання денсифотометром інтенсивності потемніння на різних ділянках дозиметра-свідка маємо реальну картину розподілу поглинутої енергії іонізуючого випромінювання всередині досліджуваного зразка. Можливий варіант двостороннього опромінювання електронами 4 МеВ.

Розроблена методика надає можливості вимірювання розподілу поглинутої дози в будь-яких матеріалах. При обробці пакета виробів, до їхнього складу включають вищенаведений контрольний зразок.

*Результати.* Метою модернізації системи радіаційних вимірювань було виконання метрологічних вимог в дослідженнях та розробці нових радіаційних технологій і проведення ядерно-фізичних досліджень на промисловому технологічному прискорювачі електронів з пучком великої потужності.

Для удосконалення системи технологічної дозиметрії радіаційної установки розроблено методи й технічні засоби вимірювання параметрів радіаційного процесу.

В основу розробок покладено метод фантомів-дозиметрів з плівковими хімічно-чутливими елементами, атестованими для більшості радіаційно-хімічних технологій.

## **2.4 Розробка методів і засобів формування радіаційних полів**

Розширення обсягів використання іонізуючих випромінювань в галузі виробництва індустріальних матеріалів передбачає відповідне удосконалення методик отримання радіаційних полів великих об'ємів, достатніх для розміщення там і габаритних промислових виробів і пристроїв для радіаційної обробки [48, 93, 296, 298]. Метою і завданням цих робіт є подальше удосконалення радіаційної установки для здійснення кваліфікаційних випробувань обладнання АЕС [152, 154, 167, 266, 275]. Їх актуальність підкреслена в Національній програмі подовження термінів позапроектної експлуатації енергоблоків на АЕС України.

На базі радіаційної установки ІЯД технічно реалізовано спеціалізований стенд для таких випробувань, який не має аналогів. При випробуваннях передбачена імітація умов, що відповідають реальним, експлуатація обладнання в місці його розташування, та оригінальна методика прискорених випробувань [102, 227, 228, 266].

На радіаційній установці ІЯД ці проблеми вирішуються застосуванням оригінальних структур системи розсіюючих і відбиваючих екранів [152, 167, 228].

Подальший розвиток цього напрямку обумовлений новими вимогами, Насамперед, необхідністю вирішення проблеми технологічного використання фотонного випромінювання та іншими зарядженими частинками. Розробки здійснювались з урахуванням випробуваних і відомих методів конверсії енергії електронів в інші види іонізуючих випромінювань. Відомі методики [227, 228, 272] узагальнено схемою (рис. 2.14).

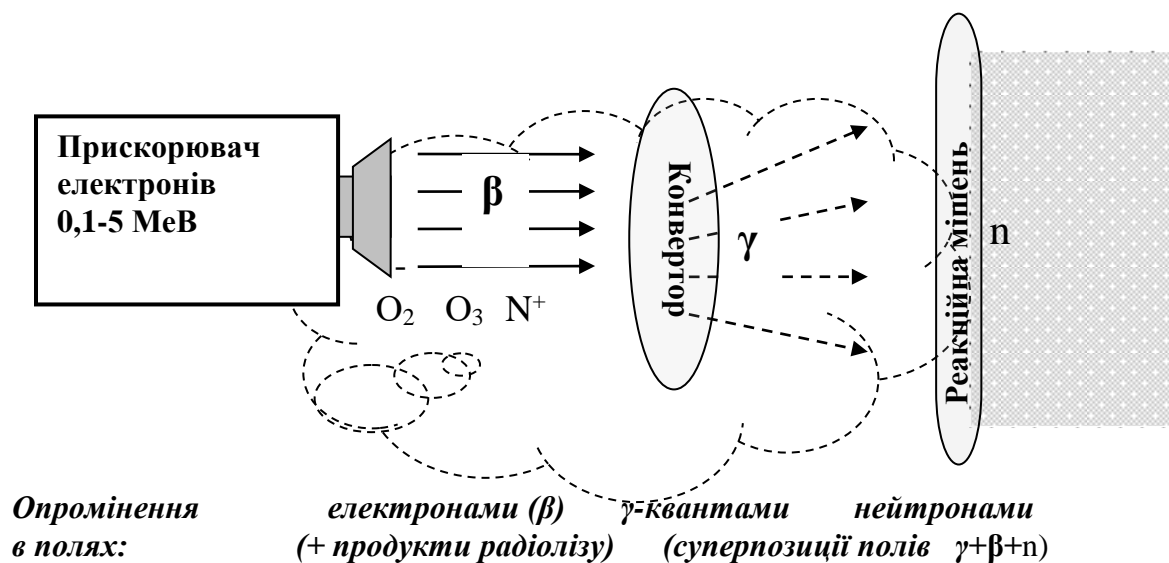
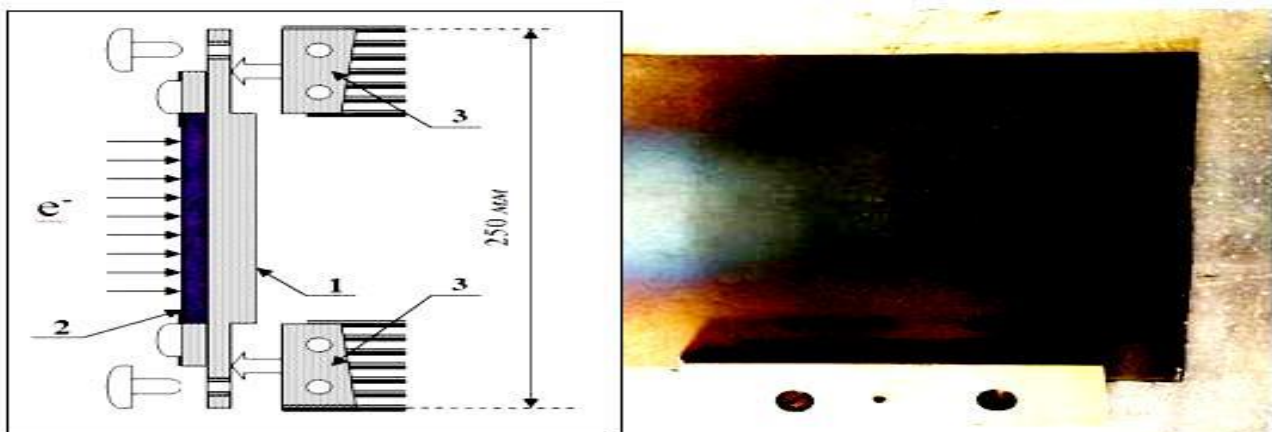


Рис. 2.14 Узагальнена схема варіантів конверсії електронного пучка у інші види іонізуючого випромінювання

Схема узагальнює широкі можливості технічної реалізації завдання для досягнення мети досліджень. Розробки конкретних варіантів вибирались виходячи з технічних і економічних міркувань. Отримання на даній радіаційній установці нейтронів є найбільш витратним етапом і має сумнівну економічну доцільність через необхідність додаткових витрат на спеціальний протирадіаційний біологічний

захист від нейтронів та можливості активації обладнання реакційної камери та гальмування інших досліджень через високий рівень наведеної радіоактивності. Тому доцільно обмежитися лише формуванням фотонних полів опромінювання гальмівними гама-квантами. Для їхнього отримання розроблено конструкції конверторів енергії електронного пучка в гальмівне електромагнітне випромінювання з різним ступенем ефективності (рис. 2.15). Конвертор є основою мішеневого вузла повного поглинання, на фото його показано зі сторони пучка. Його конструкція складається з гальмівної мішені (2), яку закріплено на несучій пластині (1) з алюмінію. Тепло, що виділяється на гальмівній мішені, відводиться за допомогою пластинчастих алюмінієвих радіаторів (3), які закріплюються на вільному не робочому просторі несучих пластин таким чином, щоб мінімально поглинути гама-кванти, що генеруються на гальмівній мішені.



1 – несуча пластина; 2 – гальмівна мішень; 3 - охолоджувач

Рис. 2.15 Конструкція конвертора повного поглинання енергії електронів 5 MeV [298]

Повітряне охолодження здатне достатньо ефективно відводити тепло лише до потужності пучка не вище 2 кВт навіть з примусовим обдувом. Для конвертації енергії пучка потужністю більше 2 кВт планується підключення додаткового контуру охолодження водою, для цього в тілі радіаторів передбачаються відповідні наскрізні отвори. Попередня оцінка показує, що з конвективним повітряним охолодженням і при площі ребер радіатора понад 300 см<sup>2</sup> кожен 1кВт поглинутого пучка буде піднімати температуру конвертора на 50<sup>0</sup>С. Очікується, що додаткове

інтенсивне обдування вентилятором охолодження випускного вікна прискорювача надасть можливість зниження температури конвертора на  $25^{\circ}\text{C}$ .

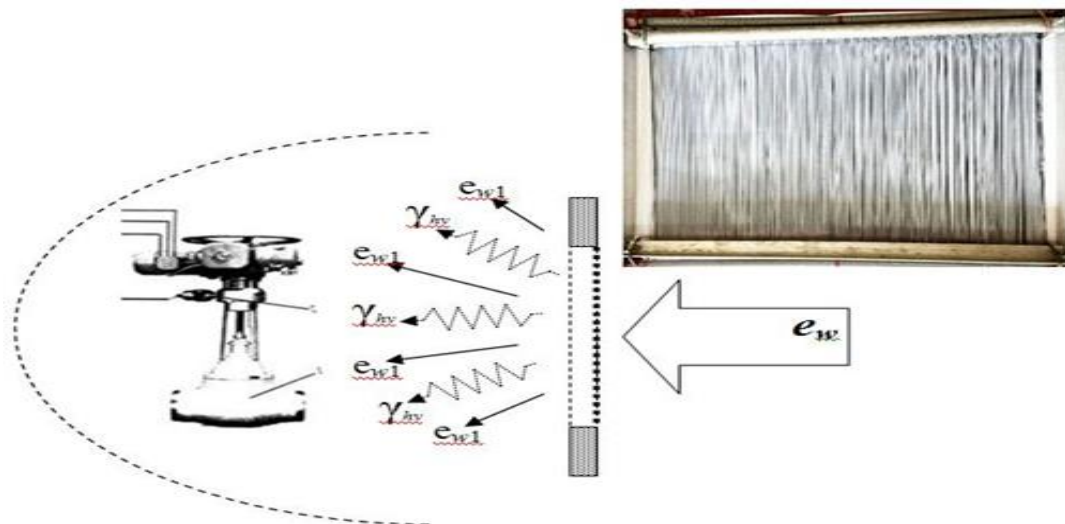


Рис. 2.16 Схема формування змішаних радіаційних полів напівпрозорою гальмівною мішенню. На фото – конструкція півпрозорої гальмівної мішені [298]

Матеріал для гальмівної мішені вибирався відповідно до відомих положень ( $k=W \cdot A/800$ , де  $k$  – коефіцієнт перетворення,  $W$  – кінетична енергія електрона,  $A$  – атомний номер матеріалу гальмівної мішені (рис. 2.16)) з метою отримання конверсії найбільшої ефективності та отримання фотонних полів максимально можливої інтенсивності від конверсії пучка електронів потужністю 5 кВт. В наведених конструкціях використано вольфрам товщиною 1,8 мм.

## 2.5 Дослідження ефективності формування радіаційних полів

Після глибокої модернізації системи формування полів опромінювання було здійснено вимірювання реального радіаційного поля, доступного для подальшого розширеного використання установки ІЯД. Насамперед, для визначення відповідності функцій нової системи формування вимогам опромінювання габаритних об'єктів з важких матеріалів. Це актуально для розробки інноваційних технологій використання іонізуючих випромінювань при виробництві новітніх матеріалів, для впровадження сучасних комплексних радіаційних методів функціональних випробувань [260, 266, 275], сертифікації й атестації обладнання

критичних об'єктів, насамперед, для адаптації установки під потреби кваліфікації обладнання АЕС. Важливо було впевнитися в можливості оптимізації параметрів радіаційного поля під конкретний розмір досліджуваного об'єкта [88, 206].

Методика досліджень опиралась на можливості модернізованої системи технологічної дозиметрії. Результати отримували шляхом сканування простору розмірами 100 см x 100 см x 100 см реакційної камери (1 м<sup>3</sup>) радіаційної установки датчиками електронів та гама-випромінювант ((1, 6) рис. 2.10), які розміщувались на рухомій каретці вимірювального електроприводного планшету ((5), рис. 2.10) з дискретністю 1 см.

Інформацію отримували у вигляді двовірних функціональних кривих і у вигляді об'ємного тривимірного зображення з еквіпотенціальних кривих.

Рис. 2.17 відображає результати вимірювання фотонного поля опромінювання з використання гальмівної мішені з повним поглинанням (рис. 2.3). Реальна картина суттєво відрізняється від розподілу поля опромінення електронами, бо розподіл гальмівного випромінювання характерний для точкових джерел електромагнітного випромінювання (тут - пікометрового діапазону електромагнітних хвиль).

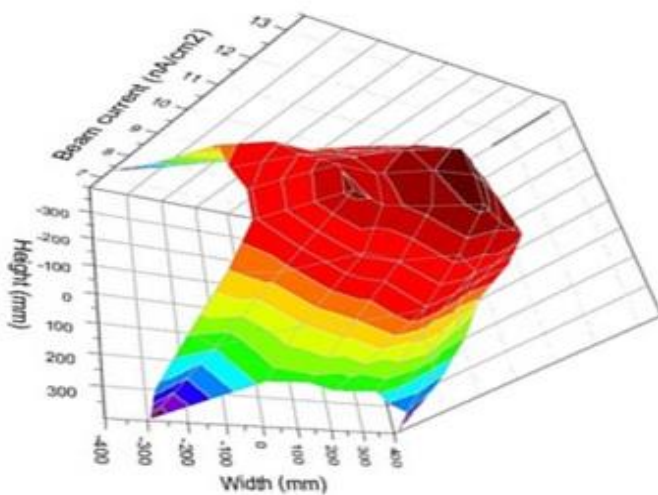


Рис. 2.17 Поле фотонів

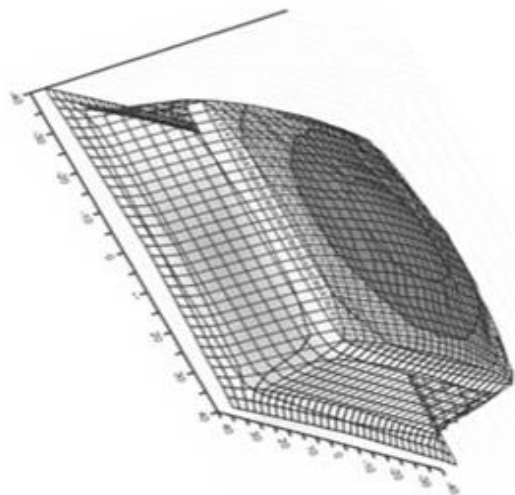


Рис. 2.18 Поле електронів

На рис. 2.18 наведено результати вимірювань розподілу поля опромінення електронами. Воно фактично повторює раніше отримані результати [168] і свідчить

про можливість опромінювати мегавольтними електронами зразків великої площі (понад 80 см x 80 см).

Через відносно невисоку енергію (4 MeV) діаграма направленості випромінювання потоків гама-квантів близька до кругової і при вимірюваннях на відстанях понад 1 м центральна область має найбільшу інтенсивність. І все таки, інтенсивність з нерівномірністю до 25% (нерівномірність) спостерігається в об'ємі 50 см x 50 см x 100 см, що свідчить про можливість технологічного опромінювання габаритних зразків гама-квантами з широким енергетичним спектром з максимумом в області 2 MeV, близькій до традиційного опромінювання на установках з  $^{60}\text{Co}$ . А отже, такі дослідження і випробування можна здійснювати і на електрофізичній установці з прискорювачем 3-5 MeV, що розширює область її застосування і виконання вимог, згідно рис. 2.6. Дослідження на електрофізичній радіаційній техніці зручніше, ніж на ізотопній, через можливість точного контролю інтенсивності радіації в усіх точках опромінюваного простору й отримання об'ємного зображення отриманого радіаційного поля.

Аналіз тривимірного зображення рис. 2.17 свідчить про незначне зміщення центру фотонного радіаційного поля та перекося його плоскої частини. За результатами вимірювань можна здійснити корекцію поля, якщо це буде необхідно для опромінення зразків чи габаритів конкретного обладнання. З огляду на високу керованість первинного джерела іонізуючих випромінювань (електронного пучка) на радіаційній установці за допомогою конвертора повного поглинання можна створювати поля гама-випромінювання великого перерізу з можливостями його гнучкого регулювання під конкретні завдання.

Принципово важливими є дослідження можливостей формування змішаних електронно-фотонних полів, які суттєво розширюють можливості використання установки для вирішення прикладних завдань і відкривають перспективу прогресу інноваційним технологіям в промисловому матеріалознавстві та функціональних випробуваннях критичного обладнання АЕС. З цією метою замість конвертора з повним поглинанням енергії електронів встановлювався напівпрозорий конвертор, наведений на рис. 2.16. Такі маніпуляції оперативно здійснюються за допомогою

механізованої платформи [155]. Дослідження здійснювались з регулюванням інтенсивності первинного пучка згідно стандартів на кваліфікацію обладнання АЕС, критичного для їх надійної експлуатації [206, 275].

Результати вимірювань просторового розподілу змішаного радіаційного поля наведено на рис. 2.19 у вигляді тривимірного зображення, отриманого комп'ютерною обробкою даних від модернізованої системи технологічної дозиметрії [168]. Дані отримані при скануванні об'єму реакційної камери установки розмірами 800 мм x 800 мм x 800 мм.

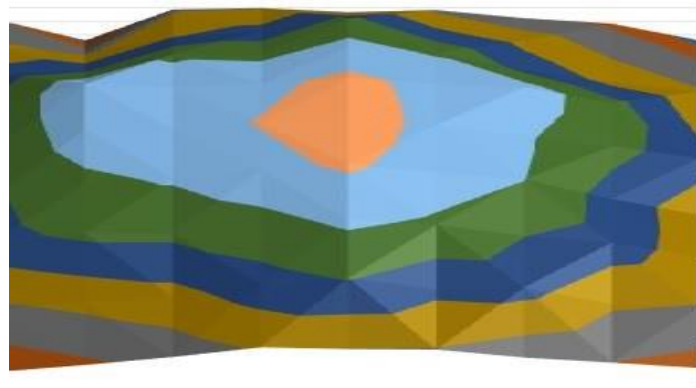


Рис. 2.19 Об'ємне зображення змішаного радіаційного поля з використанням напівпрозорого конвертора електронів

Випробування ефективності напівпрозорого конвертора на прискорювачі електронів радіаційної установки здійснювались при різній інтенсивності та співвідношеннях  $\beta$ - і  $\gamma$ -компоненти в діапазоні струму первинних електронів до  $I_{\text{д}}=0,4$  А з енергією 4 МеВ. Вони показали, що в межах струму пучка електронів від 0 до 0,22 А та його конверсії на вольфрамовій мішені з коефіцієнтом перекриття 0,5 формується змішане радіаційне поле з потужністю 4,5 кГр/год, що повністю відповідає нормативному рівню для кваліфікації обладнання АЕС.

Проведені дослідження свідчать, що за допомогою модернізованої системи можна формувати і вимірювати чисті та змішані радіаційні поля великих об'ємів. Відповідно, було виконано важливу вимогу випробувань критичного обладнання, здійснення досліджень в умовах, наближених до реальних об'єктів. При цьому забезпечена можливість відокремлення й оцінення вкладу в поглинуту дозу різних складових радіаційного поля – гама- та бета-випромінювання і, таким чином,

виконано вимогу формування радіаційного поля з анізотропністю, наближеною до поля атомного реактора.

Аналізуючи отримані результати та враховуючи, що пучок електронів є осесиметричним можемо зробити висновок, що максимальна нерівномірність струму пучка прискорених електронів, що падають по нормалі, в межах 800 мм не перевищує 25 %, в межах 500 мм ця нерівномірність – 12 %. При величині струму пучка прискорених електронів 0,5 від максимальної, в центрі поля забезпечується потужністю дози 93,6 кГр/год. Це з запасом забезпечує виконання нормативних рекомендацій по проведенню кваліфікаційних випробувань.

За такого струму пучка в центрі поля забезпечується потужність дози, що визначається за формулою:

$$P = 0.2 \cdot I_b = 0.2 \cdot 13 = 2.6 \text{ [кРад/с]} = 2.6 \cdot 3600 = 93.6 \text{ [кГр/год]}$$

Така потужність дози цілком забезпечує виконання нормативних рекомендацій по проведенню функціональних радіаційних випробувань і кваліфікування виробів на придатність використання на АЕС [154, 275]. Ця інформація є обов'язковою для коректних досліджень і кваліфікації обладнання АЕС (згідно рекомендацій МАГАТЕ) та попередніх наукових досліджень [206, 227].

З цього можна зробити висновок, що модернізовану радіаційну установку ІЯД НАН України з лінійним прискорювачем електронів 4 МеВ можна використовувати для функціональних радіаційних випробувань елементів ядерних енергоустановок, габаритні розміри яких не перевищують 800 мм. Прикладом такого обладнання може бути електропривід типу М76341, що використовується з арматурами систем аварійного газовідведення з першого контуру, захисту першого контуру від перевищення тиску та системи локалізуючих арматур [168, 296-299]. За таких умов нерівномірність опромінення становитиме менше 25%.



## 2.6 Вирішення супутніх технічних проблем

Значну увагу при проектуванні установки було приділено системі спеціальної вентиляції, яка одночасно повинна виконувати функції регулювання (стабілізації) температури в приміщеннях установки і виконання вимог радіаційної безпеки в частині ефективного видалення продуктів радіолізу повітря.

З переходом до опромінення важких матеріалів, об'єм шкідливих продуктів радіолізу зростає, що вимагає прийняття адекватних мір по компенсації цього ефекту. Така система реалізована за оригінальною структурою по багатоконтурній схемі. Вона включає головні приточний і витяжний вентилятори, а також додаткову систему автономних контурів спецвентиляції у всіх приміщеннях установки, як це наведено на рис. 2.20.

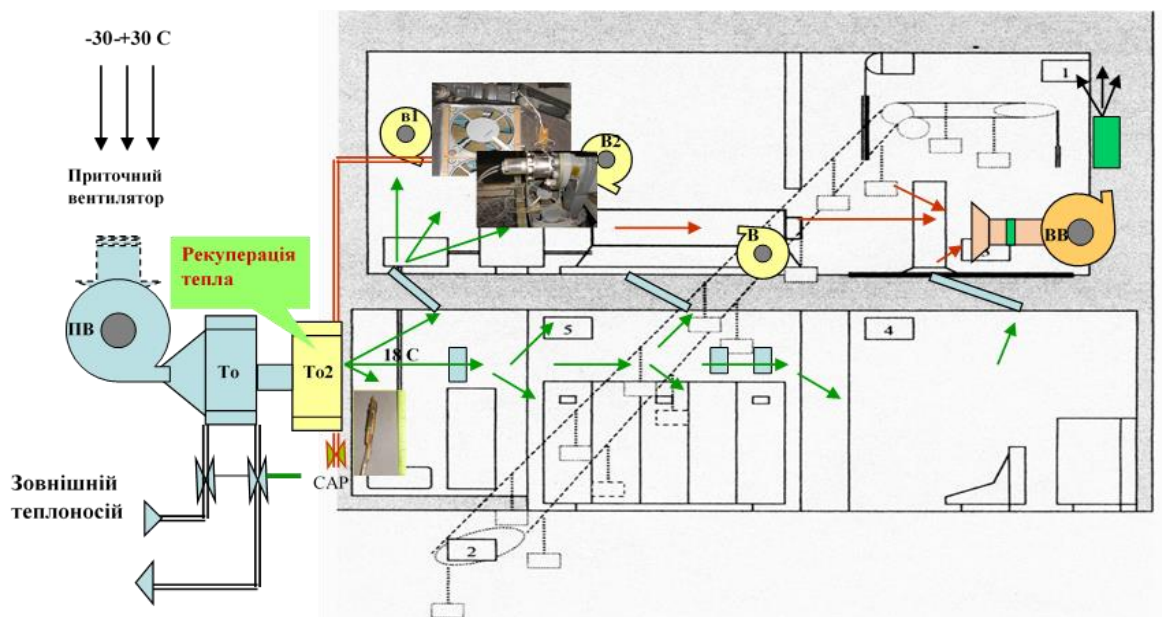


Рис. 2.20 Модернізована система спеціальної вентиляції приміщень установки ІЯД

Оригінальною особливістю модернізованої системи спеціальної вентиляції є рекуператор теплової енергії від працюючого обладнання для підтримки робочої температури в приміщеннях та розвинутій мережі повітропроводів, які утворюють систему протягів і забезпечують видалення продуктів радіолізу, захищаючи персонал установки навіть при відхиленнях в роботі головних вентиляторів.

## 2.7 Висновки

На радіаційній установці в ІЯД розроблено технічні засоби і створено універсальну методику випробувань і досліджень в радіаційних полях великих об'ємів. Її узагальнена схема показана на рис. 2.21.

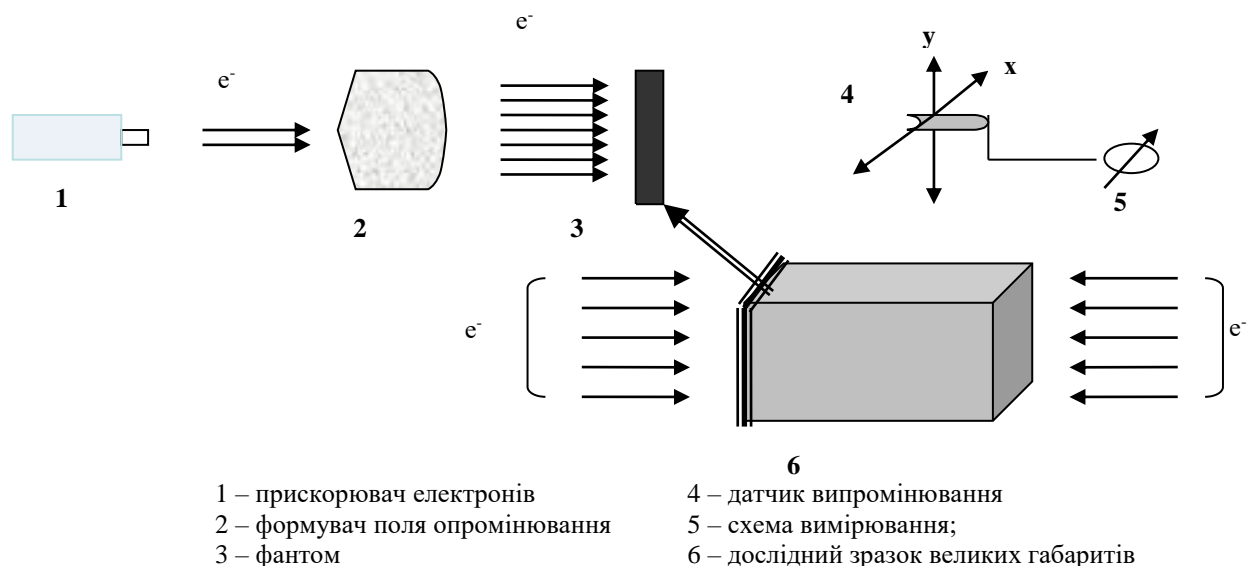


Рис. 2.21 Схема удосконаленої методики радіаційної обробки зразків великих габаритів

Первинним джерелом випромінювання є пучок електронів 4 МеВ від прискорювача великої потужності. Цей вузький пучок діаметром 2 см за допомогою системи формування поля опромінювання перетворюється в широкий потік радіації перерізом до 1 м<sup>2</sup> (електронів, гама-квантів, їх суперпозицій).

Для вимірювань параметрів радіаційних полів на установці модернізовано штатну систему і створено нове необхідне обладнання – набір різноманітних датчиків радіаційного поля та його компонентів. Модернізація здійснена практично в усіх елементах системи радіаційних вимірювань.

За допомогою прецизійного електромеханічного приводу цими датчиками (4) сканують об'єм реакційної камери і отримують інформацію про параметри радіаційного поля (5).

Досліджено топографію реального радіаційного поля в робочій області реакційної камери установки, в тому числі, і на відповідність функцій

модернізованої системи вимогам адаптації установки під потреби кваліфікації обладнання АЕС [152, 167].

Встановлено, що модернізація установки надала нові можливості отримання експериментальних даних, важливих для розробки науково-обґрунтованих технологій кваліфікації обладнання АЕС.

Встановлено можливості оптимізації параметрів радіаційного поля під конкретний розмір досліджуваних зразків та визначати межі габаритів обладнання для підбору номенклатури доступних для радіаційної обробки промислових виробів.

Отримані результати свідчать, що після удосконалення структури установки за допомогою модернізованої системи технологічної дозиметрії (СТД) можна вимірювати радіаційні поля великих перерізів і отримувати інформацію у вигляді двомірних функцій інтенсивності в площині сканування та у вигляді об'ємного зображення для детального аналізу розподілу інтенсивності отриманого радіаційного поля. Така інформація корисна для корекції поля до габаритів конкретних об'єктів радіаційних випробувань.

Отримана можливість здійснення досліджень і розробок, пов'язаних з використанням іонізуючої радіації як засобу визначення функціональної придатності та реального ресурсу служби технічних засобів з конструкційних матеріалів, наприклад, з бетону при його застосуванні для зберігання відходів ядерної енергетики, сховищ хімічних матеріалів та на інших об'єктах з екстремальними умовами експлуатації.

Розроблено методи промислової дозиметрії з використанням фантомів.

В результаті модернізації суттєво розширено метрологічні можливості системи технологічної дозиметрії, розширено перелік контрольованих параметрів радіаційного процесу:

- Струм, щільність струму та енергію виведеного пучка;
- Енергетичний спектр пучка;
- Конфігурацію пучка в просторі РК;
- Стабільність інтенсивності пучка;
- Інтенсивність гальмівного випромінювання в РК;
- Розподіл поля гальмівного випромінювання в РК;
- Поглинуту дозу та її розподіл;

- Форму імпульсу виведеного в атмосферу пучка;
- Розподіл радіаційного поля в боксі.

В результаті створено технічний комплекс для матеріалознавчих досліджень і розробок для залучення радіаційної техніки ІЯД до виробництва нових матеріалів індустрії з покращеними характеристиками.

Така установка суттєво розширює можливості ІЯД здійснення наукових досліджень і технологічних розробок в радіаційній фізиці, радіаційній хімії, радіаційному матеріалознавстві, радіаційних технологіях, атомній енергетиці, біофізиці та медицині.

## **РОЗДІЛ 3 РОЗРОБКА ДОСЛІДНИЦЬКИХ КОМПЛЕКСІВ**

### **3.1. Удосконалення структури радіаційного комплексу ІЯД НАН України**

#### **3.1.1 Удосконалення експериментальної бази радіаційних досліджень в діапазоні низьких енергій**

В процесі досліджень перспективних напрямків прогресу радіаційних технологій виявлена низка актуальних проблем, які вимагають дослідження і вирішення при використанні іонізуючої радіації невисокої енергії. Насамперед в тих науково-технологічних напрямках, де важливо знати механізми трансформації енергії випромінювання на границях зовнішнього середовища-матеріалу та в його приповерхневих шарах. Це широка галузь науки та техніки – напівпровідники, полімери, екзотичні сплави металів, а також найсучасніші композитні матеріали.

Актуальними є задачі залучення іонізуючих випромінювань низької енергії для вирішення експлуатаційних проблем ядерної енергетики. Тут поверхневі ефекти визначають надійність і строк служби обладнання в гермозонах атомних енергетичних реакторів. Їх вивчення дозволить суттєво підняти інформаційний рівень проведення кваліфікації обладнання, критичного для надійності АЕС, що спрямоване на визначення показника деградації його функцій під дією радіації, характерних для атомних реакторів. В попередніх дослідженнях було встановлено [102, 127, 200, 227, 260, 266, 277], що стійкість до низько-енергетичного випромінювання визначають можливості надійної роботи більшості електротехнічного обладнання.

В поточній конфігурації технічних засобів для експериментальних робіт в ІЯД відсутня можливість досліджень взаємодії радіації з матерією в діапазоні енергій 0,1-0.5 MeV і це є проблемою розвитку інноваційних радіаційних технологій. З урахуванням досвіду інших ядерних центрів, створення такого напрямку в ІЯД є актуальною задачею вітчизняної економіки.

Для таких досліджень використовувати діючий в ІЯД НАНУ прискорювач електронів з середньою енергією 4 МеВ неефективно, бо генерувати іонізуючі випромінювання в діапазоні до 0,4 МеВ на ньому неможливо [147,167].

На рис. 3.1 на верхньому графіку показано енергетичний спектр іонізуючого випромінювання, яке технічно можливо отримувати на прискорювачі електронів 4 МеВ

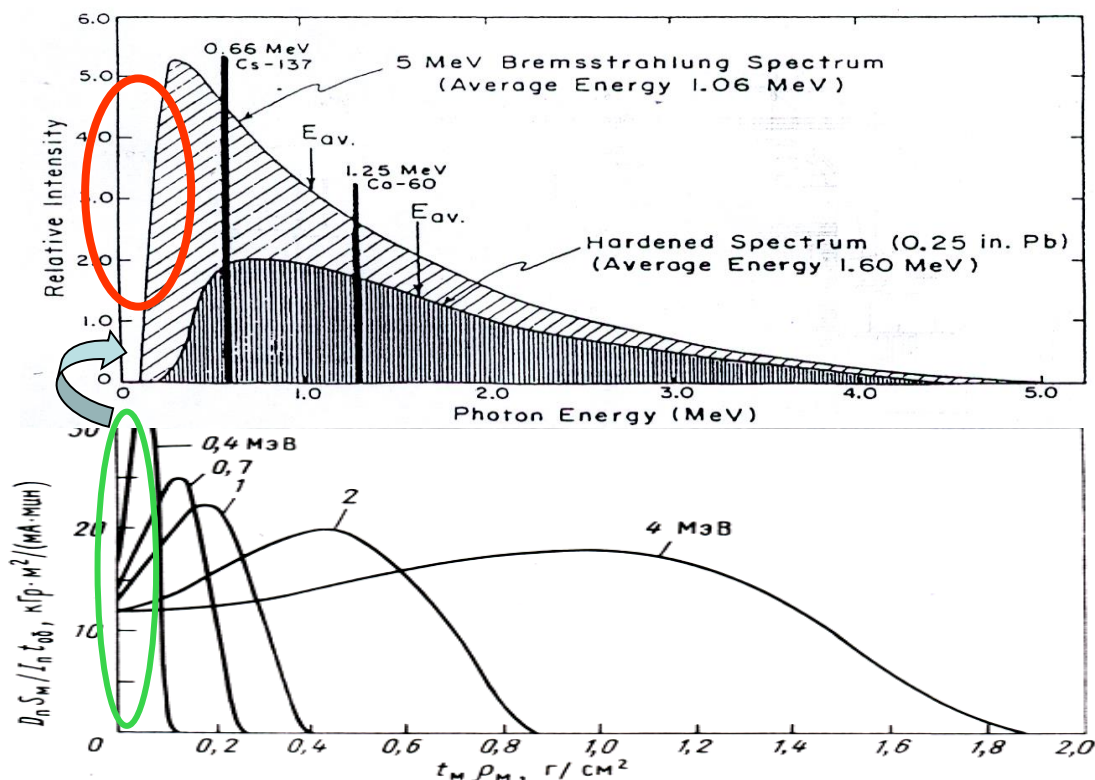


Рис. 3.1 Спектр випромінювання гама-квантів при гальмуванні електронів 5 МеВ на важких мішенях (верхній графік) та глибина проникнення електронів різних енергій в матеріал [167]

Тут в низькоенергетичній області спостерігається різке падіння інтенсивності випромінювання і навіть повна його відсутність в діапазоні до 100 кеВ. Дослідження технічних можливостей вирішення цієї проблеми не дали позитивних результатів (відносно подальшого удосконалення діючого 4 МеВ прискорювача). З аналізу можливих шляхів формування радіаційних полів з різною глибиною проникнення в матеріал, який наведено на нижніх графіках розподілу поглинутої енергії в матеріалі, свідчить про доцільність створення додаткового джерела електронів. Оптимальним буде прискорювач електронів на енергію 0,4 МеВ. Це компенсує дефіцит доступних для досліджень енергій і надасть можливість суттєво розширити

обсяги наукових досліджень і технологічних розробок в радіаційній фізиці, радіаційній хімії, радіаційному матеріалознавстві, радіаційних технологіях, атомній енергетиці. Зростуть можливості експериментів для біофізиків, та медицини.

### 3.1.2 Удосконалення структури дослідницької радіаційної бази ІЯД НАН України

З метою розширення експериментальної бази ІЯД для прогресу радіаційних технологій розроблено потужну прискорювальну установку з регульованою енергією електронів від 0,1 до 0,5 MeV [208].

В розділі обговорюються шляхи і результати створення багатоцільового дослідницького комплексу з двома радіаційними установками для забезпечення можливості проведення широкого кола матеріалознавчих робіт для сучасного етапу економічного розвитку, а також перспективного напрямку функціональних випробувань і сертифікації випробувань елементів ядерних енергоустановок.

Проблеми безпечної експлуатації ядерних об'єктів є надзвичайно важливими для персоналу та населення. Особливо гостро це питання постає в умовах необхідності продовження надпроектного терміну експлуатації ядерних енергоустановок [146, 208]. Згідно діючого українського законодавства, такі заходи (кваліфікація обладнання, критичного для надійної експлуатації) є обов'язковим заходом підвищення рівня безпеки в атомній енергетиці. Встановлено стандарти на такі випробування, вони досить складні (таблиці 3.1).

Таблиця 3.1

Типові умови випробування критичного обладнання АЕС

| Параметр  | Величина              |
|---|-----------------------|
| Вологість, %  | 100                   |
| Тиск, кгс/см <sup>2</sup> , (МПа)                   | 4,41 (0,43)           |
| Температура, °С (К)                                 | 147,0 (420)           |
| Потужність поглинутої дози, Гр/с                    | $1,25 \times 10^{-2}$ |
| Хімічний склад середовища, г/дм <sup>3</sup>        |                       |
| Парогазова суміш з вмістом борної кислоти           | 39,5-160              |
| Гідразин  | 10                    |
| Іони калію  | 100                   |
| Час функціонування установок при даних умовах, год. | 4                     |

Такі складні вимоги можуть бути виконані лише при відповідному удосконаленні дослідницьких установок.

### **3.1.3 Проектування і монтаж нового генеруючого обладнання для модернізації діючої радіаційної установки**

Створена в ІЯД НАН України потужна електрофізична радіаційна установка з промисловим потужним прискорювачем електронів (середньої енергії 4 MeV та мінімальною енергією 2,5-3 MeV) успішно експлуатується вже понад 15 років [91, 102, 147]. Але використовувати цей прискорювач для отримання електронів низької енергії неефективно.

В основу удосконалення експериментальної бази ІЯД покладено прискорювач електронів прямої дії зі стаціонарним електричним полем. Такий спосіб дозволяє доступним і простим шляхом отримувати інтенсивні потоки електронів. Робота високовольтного прискорювача описується максимально простими рівняннями, що дозволяє робити точні розрахунки структури прискорення і його складових елементів.

Зростання енергії однозарядної частинки визначається проходженням нею різниці потенціалу  $\delta = e\Delta U$ , де  $\delta$  – в eV,  $U$  – у В.

Відповідно і структура такого прискорювача максимально проста і складається усього з 3-х основних елементів: джерела високої напруги, прискорюючого вузла, та системи випуску пучка на дослідну мішень. Така простота надає оптимістичні перспективи успішної реалізації проекту в реальних сучасних умовах. Приваблює високий показник експлуатаційної ефективності – в прискорювачах з потенціальним полем при постійній в часі напрузі в пучок електронів може бути передано до 95% енергії підведеної з мережі живлення. На ринку можна знайти широкий перелік таких прискорювачів вартістю до 700 тис. € або створити таку установку самостійно за потрібним прототипом.



Але необхідність вкладення коштів повинна бути виправданою досвідом прикладного і наукового застосування такої техніки і перспективою його подальшого використання в Україні.

*Техніко-економічне обґрунтування.* Радіаційна установка – складний комплекс систем та технічних засобів для здійснення наукових досліджень та експериментів з іонізуючими випромінюваннями. В такому комплексі джерело іонізуючих випромінювань далеко не самий дорогий вузол. В її склад повинні входити унікальні спеціалізовані технічні засоби, здатні стабільно функціонувати в умовах сильних радіаційних полів. Тому радіаційні установки, за звичай, мають високу одиничну вартість. Науково-дослідні установки значно дорожчі та менш рентабельні, і вимагають більш докладного дослідження перспектив застосування.

В даний час іонізуючі випромінювання низьких енергій можуть стати вирішальним способом подолання нагальних актуальних проблем екології та прогресу сільськогосподарської діяльності щодо забезпечення населення повноцінним харчуванням.

З використанням електрофізичної техніки низькоенергетичних електронів були створені підприємства, які виробляють медичну продукцію, наприклад, бинти з радіаційно-привитими до целюлози протизапальними та бактерицидними матеріалами.

В Україні поки що ще ніхто не використовував унікальні можливості потужних електронних пучків низької енергії для потреб машинобудування. Якщо щільність матеріалу висока (наприклад, метали), то значна частина енергії налітаючих електронів перетворюється в тепло. А це може використовуватися в промислових цілях. Для нової установки очікується отримання середньої питомої потужності до  $3 \cdot 10^5$  Вт/см<sup>2</sup>. Враховуючи, що енергія електронів перетворюється в тепло в мікронному шарі матеріалу, а пучок може бути сфокусований до 1 мм<sup>2</sup>, то можна сподіватися на надзвичайно різке зростання температури матеріалу мішені при взаємодії з пучком.

*Технічна перспектива і гарантія реалізації даного напрямку радіаційних технологій* забезпечується беззаперечними успіхами виробників електронних

прискорювачів великої потужності. Вони розробляються в різних сусідніх країнах саме для вирішення вищенаведених поставлених перспективних проблем. Наприклад, в Японії створено прискорювач електронів 0,8 MeV з потужністю пучка 300 кВт. В США освоєно прискорювач з потужністю пучка 250 кВт. В Росії створено прискорювач 1 MeV з потужністю пучка 400 кВт. На ринку вартість прискорювача даного діапазону енергій з потужністю пучка 20 кВт складає 25 тис \$/кВт, а вартість прискорювача з потужністю пучка 400 кВт – всього 5 тис. \$/кВт. Їх застосування різко зменшує собівартість обробки, а акцент в нових розробках вже перенесено з радіаційної техніки на інші вузли для компонування технологічних радіаційних установок.

При техніко-економічному обґрунтуванні проекту нової радіаційної установки проаналізовано і результати власних досліджень та розробок, перспективні для удосконалення і продовження на цій техніці. Залучення низькоенергетичних електронів дозволить створити нові типи композитних радіаційно-модифікованих бетонів на основі органо-мінеральних композицій. Нова установка дозволить суттєво удосконалити прогресивну радіаційну технологію багатошарового корозійностійкого і гідрофобного бетону для використання при спорудженні сховищ радіоактивних відходів. Це дозволить створити рентабельне виробництво залізобетонних виробів, в тому числі і для атомної енергетики, особливо для сховищ радіоактивних відходів, вже не кажучи про сховища хімічних високоактивних відходів та інших об'єктів з критичними умовами експлуатації.

Запропонована в ІЯД така тришарова структура композитного бетону (рис. 3.2) [32], яка забезпечує три ступені захисту радіаційно-модифікованого полімер-бетону, що збільшує ресурс його роботи в умовах радіації та безпеку експлуатації ядерних об'єктів. Технологія його виготовлення складається з двох етапів. На першому етапі заготовка бетонної конструкції (наприклад, трубчата опора) опромінюється на прискорювачі 2 електронами 4-5 MeV і за рахунок радіаційної модифікації його структури утворюється шар бетону з підвищеною міцністю. Цей шар відтінено на перерізі 3. Наступний етап передбачає радіаційну обробку виробу інтенсивним пучком електронів від прискорювача 0,5 MeV (4) для

отримання тонкого і надзвичайно щільного шару на поверхні виробу (5). Цей тонкий шар виконує вологозахисні функції (забезпечує гідрофобність матеріалу) і виключає корозійне руйнування опори під час експлуатації.

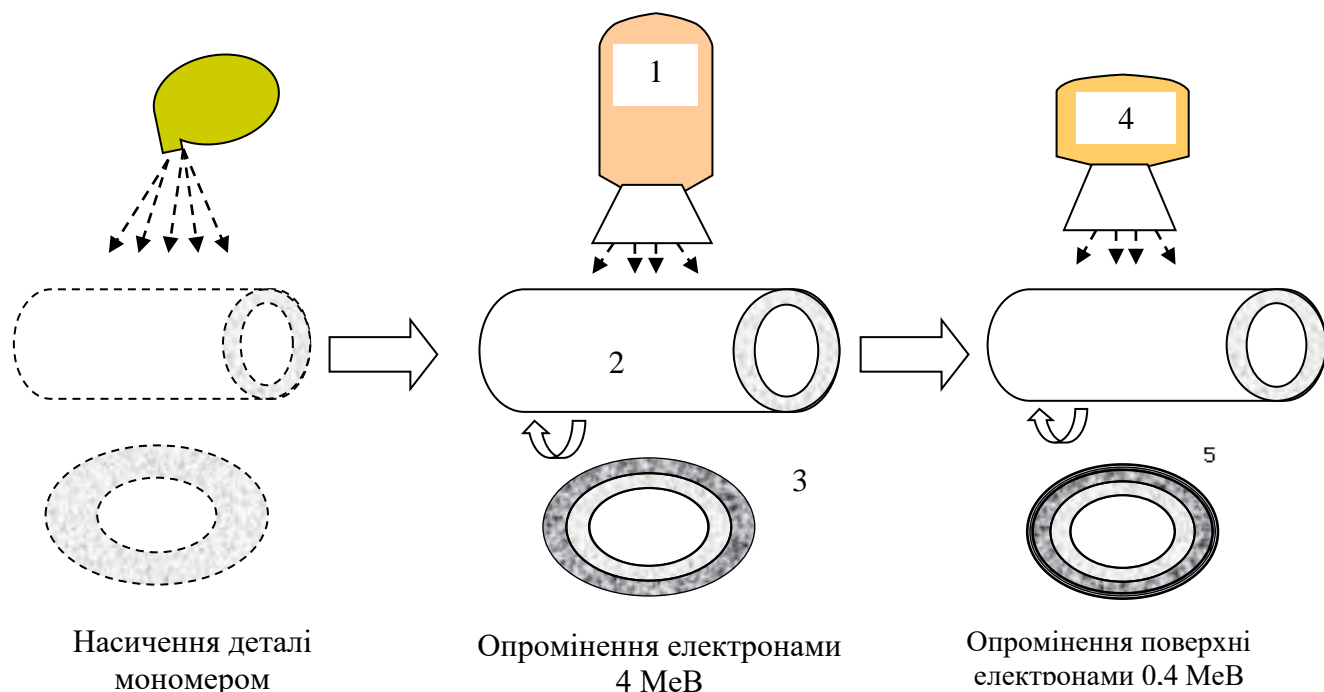


Рис. 3.2 Схема виробництва слоїстих структур корозійно-стійкого полімер-бетону для об'єктів з екстремальними умовами експлуатації [32]

Це може стати перспективним шляхом створення низки нових цементуючих систем для підвищення надійності виробів з цього поширеного конструкційного матеріалу.

На новому прискорювачі передбачається практична реалізація повного циклу комбінованих електрофізичних технологій радіаційного знезараження інфікованих стоків розроблена в ІЯД [29, 96] для знезараження стоків тубдиспансерів та інфекційних відділень лікарень, а також, здійснити натурне моделювання конструкції такої установки габаритами всього 4x4x5 метрів, доступної для використання в звичайних лікувальних закладах (розробка здійснювалася для Українського інституту фізіотрії та пульманології) або підприємствах. Методика і технологія приваблює високою економічністю і не вимагає екзотичних технічних засобів.

Вагомим аргументом на користь створення нового прискорювача є можливість проведення прикладних досліджень і розробок нових радіаційно-

модифікованих матеріалів для дорожнього будівництва. ІЯД НАН України, в співдружності з ІХВС НАН України та Турецьким університетом (м.Анталія) було розроблено і випробувано оригінальний метод утилізації вторинних полімерів (гранульованих високомолекулярних матеріалів) шляхом введення їх разом з мінеральними конкреціями в склад дорожнього покриття. З цією метою нами запропоновано і відпрацьовано технологію хімічної активації за допомогою іонізуючих випромінювань. Після такої обробки, раніше нейтральні полімерні гранули, стали утворювати міцні хімічні зв'язки з природними компонентами дорожнього покриття – бітумом та мінеральними складовими [2, 29].

Розроблені з їх використанням інноваційні види покриття для автодоріг оригінальні тим, що вони формуються за структурами композитних матеріалів і виробляються з відходів та відпрацьованих промислових та побутових виробів з поліетилену, поліпропелену тощо. Такого матеріалу ще не було, тому розробка деталей технологічного проекту є актуальною та перспективною для ІЯД, який разом зі своїми колегами-хіміками є лідером цього напрямку.

Запропонована методика є вагомим вкладом у вирішення надзвичайно актуальної проблеми сьогодення, оскільки масове проникнення полімерів у життя цивілізації призвело до виробництва маси виробів, які після зношення не піддаються економічно оптимальним методам утилізації і становлять надзвичайну екологічну загрозу, бо в природі немає механізмів природної переробки цих штучних органічних матеріалів.

Вищенаведений огляд реального досвіду промислового використання іонізуючих випромінювань свідчить, що створення в ІЯД НАН України технічної бази для досліджень і розробки ефективних методів використання радіації низьких енергій є актуальною і економічно виправданою задачею [52, 147].

### 3.1.4 Розробка структури і вибір конструкції генератора електронів низької енергії

*Структура.* При проектуванні головною метою було отримання потужних потоків електронів з регульованою енергією від 0,05 MeV до 0,4-0,5 MeV з максимально можливим коефіцієнтом корисної дії і простою конструкцією як гарантії практичної реалізації [49].

З цією метою вибрано найбільш просту і доступну для реалізації класичну структуру високовольтного прискорювача прямої дії. Загальна структура генератора електронів побудована за добре опрацьованими традиційними схемами, відомими фахівцям з прискорювачів (рис. 3.3).

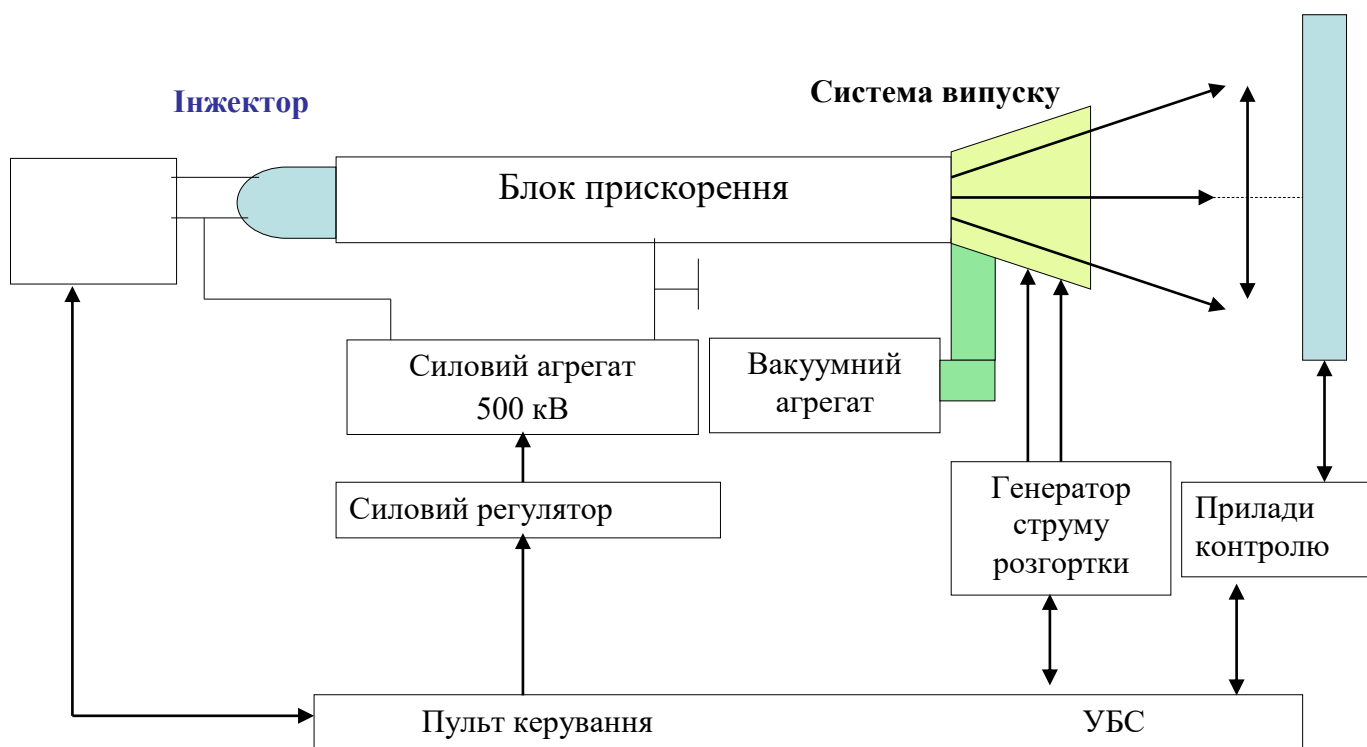


Рис. 3.3 Загальна структура генератора електронів

Розроблена трикомпонентна структура генератора складається з джерела електронів (інжектора електронів), блоку прискорення і системи випуску пучка в атмосферу. Його функціонування забезпечується набором допоміжного обладнання: джерела живлення інжектора, високовольтного агрегата постійного струму, напругою до 500 кВ, силового регулятора для встановлення необхідної напруги прискорення (енергії), вакуумного агрегата, генератора струму розгортки

електромагніта випускної системи. Усі вузли об'єднані пультом керування, що включає контрольно-вимірювальні прилади, органи дистанційного керування та засоби технічного захисту.

Вибрана структура аналогічна більшості прискорювачів прямої дії різних фірм. Вибір конкретного рішення вузлів визначається власним досвідом та технічними можливостями виготовлення чи комплектування.

*Інжектор електронів.* Схема і конструкція цього вуза наведена на рис. 3.4.

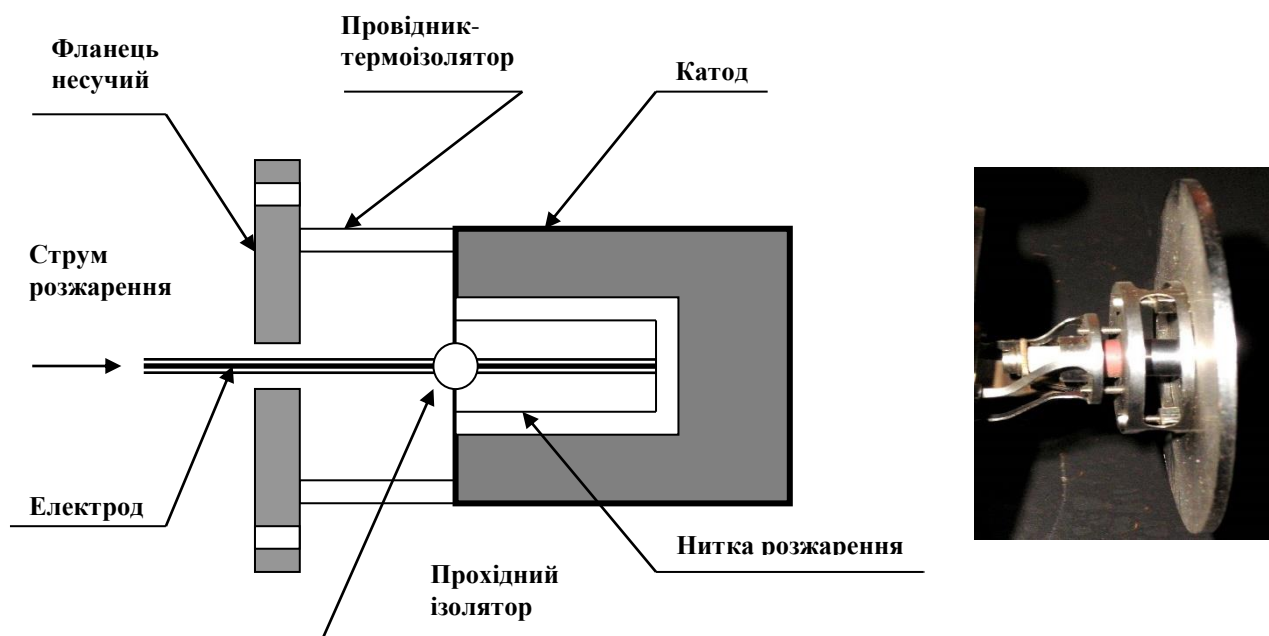


Рис. 3.4 Інжектор електронів

Інжектор побудовано з урахуванням попереднього досвіду по простій (класичній) схемі діодної електронної гармати з підігрівним катодом від нитки розжарення. Діодна (двоелектродна) схема-прототип раніше вже була використана і зарекомендувала себе як надійний інжектор на прискорювачі 4 МеВ. Від прототипу (рис. 3.5) відрізняється конструктивними розмірами під'єднання до блоку прискорення (фото справа).

*Блок прискорення.* Конструкція цього вузла наведена на рис 3.5.

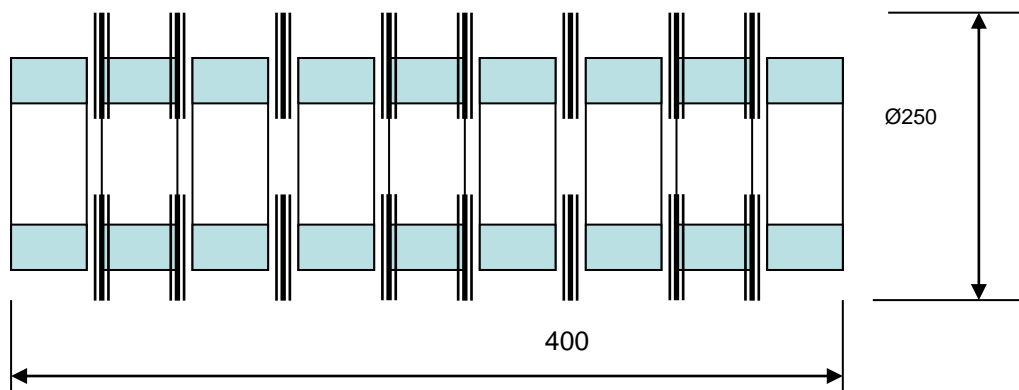


Рис. 3.5 Схема конструкції блоку прискорення

Блок прискорення побудований за структурою 18-ти електродної трубки прискорення постійним потенціальним електричним полем (зменшений аналог високовольтної колони), розрахованої на темп прискорення 10 кВ/см (1 МВ/м), загалом не екзотичний показник для сучасних прискорювачів. Підключення трубки до інших вузлів прискорювача наведено на рис. 3.6.

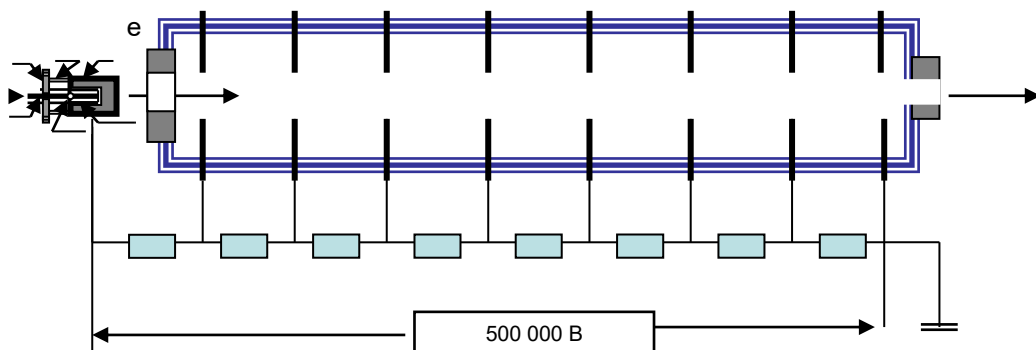


Рис. 3.6 Схема підключення блоку прискорення

Блок прискорення розміщено в баці, заповненому азотом під високим тиском. В загальній структурі прискорювача інжектор (катод) знаходиться під високим потенціалом. Діодний інжектор спрощує схему його підключення. Необхідно тільки подавати струм розжарення на нитку примусового підігріву катоду. В даному варіанті для роботи інжектора використовується змінний струм високої частоти від окремого генератора і подається окремим кабелем через розділюючий знижуючий трансформатор з коефіцієнтом трансформації 1/10 і, відповідно, струм первинної

обмотки (на який власне і подається напруга живлення) зменшується і спрощується конструкція вузла його підводу до потенціального електроду.

Підключення потенціальних електродів трубки з вирівнюючими резисторами традиційне. З метою зменшення залежності ефективності прискорювача від точності виготовлення деталей, передбачено збільшений розмір апертури трубки (рис. 3.7).



Рис. 3.7 Велика апертура блоку прискорення

До якості пучка в даному генераторі електронів (монохроматичності, мінімальності перерізу, емітансу) в даному випадку вимоги невисокі. В таких умовах велика апертура каналу прискорення забезпечує проєкцію (передачу) пучка від інжектора на фольгу випускного вікна практично без втрат.

*Джерело високої напруги.* Використано промисловий нерегульований випрямляч ВС400-50. Для регулювання його вихідної напруги в первинну обмотку випрямляча включено індукційний регулятор змінного струму з діапазоном регулювання від 40 В до 380 В.

*Очікувані параметри.* Вибрана структура генератора електронів має добре опрацьований механізм проектування, який ґрунтується на розрахунках параметрів усіх елементів такого прискорювача. Для розрахунку використано рекомендації з галузі радіаційного машинобудування для радіаційно-хімічних процесів. Цей клас



радіаційної техніки характеризується енергіями до 0,5 MeV і великою потужністю в пучку [49, 267].

Результати розрахунків очікуваних параметрів такого генератора зведено в таблицю 3.2.

Таблиця 3.2

Параметри генератора

| Параметр                                      | Величина  |
|---|-----------|
| Енергія прискорених електронів                | 0,5 MeV   |
| Струм пучка                                   | 0,05 А    |
| Енергія електронів виведеного пучка           | 0,4 MeV   |
| Потужність в пучку                            | 20 кВт    |
| Максимальна радіаційна потужність             | 40 кГр/с  |
| Діаметр виведеного пучка                      | 1 см      |
| Ширина опроміненої поверхні                   | 10 см     |
| Споживання електроенергії прискорювачем       | 24 кВт    |
| Загальна потужність споживання електроенергії | 30 кВт    |
| Очікувана вартість установки                  | 400 тис.€ |

Отримані результати розрахунків використано для проектування системи випуску потужного пучка (20 кВт).

*Система випуску пучка.* При проектуванні системи випуску пучка в атмосферу особливого вибору варіантів немає, враховуючи високу інтенсивність пучка. В техніці прискорювачів випуск пучка зазвичай здійснюється через тонку фольгу, яка примусово охолоджується повітрям чи водою. Тому було вибрано варіант системи випуску через тонку титанову (або алюмінієву) фольгу, а для запобігання руйнування її під інтенсивним пучком – скануючим магнітним полем (струм в обмотці електромагніта 2) пучок перемішується по поверхні фольги, натягнутої на каркас випускного вікна у вигляді довгої стрічки. А з урахуванням того, що ми будемо виводити пучки відносно низьких енергій і для зменшення втрат пучка фольга має бути дуже тонкою (2-5 мкм). До того ж пучок не тільки відхиляється вздовж напрямку розгортки, але додатково здійснюється його девіація поперек напрямку сканування, як це показано на рис. 3.8. З урахуванням технічних даних про очікувану потужність пучка (20 кВт), в конструкції передбачено два

паралельних вікна випуску. Відповідно необхідно сформувати дві паралельних траєкторії сканування. Пучок (3) по черзі буде рухатися спочатку по одній траєкторії (включений струм комутації в обмотці 1), а потім по другій (без струму комутації), даючи можливість попереднім ділянкам фольги (розжареної пучком) охолотитися.

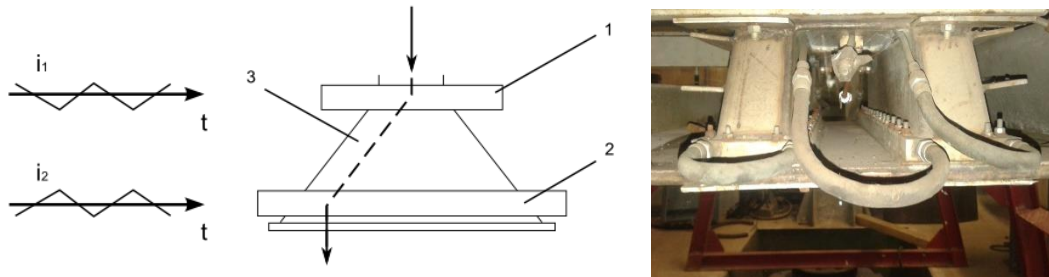


Рис. 3.8 Система випуску. На фото – конструкція вузла випуску

Таким чином, на відміну від традиційної конструкції систем випуску електронів з камери прискорення електронного генератора в атмосферу з огляду на запроєктовану велику інтенсивність пучка використовується два випускних фольгових вікна (рис. 3.8). В такій системі здійснюється послідовне сканування пучка по обидвом фольгам і теплове навантаження на фольги випускних вікон зменшується майже в 2 рази, а відповідно вона може бути тоншою. Таке рішення розширює нижній діапазон енергій з меншими втратами пучка [49].

Система випуску забезпечує сканування пучком по поверхні мішені і опромінює ділянку шириною до 10 см і довжиною до 80 см.

### 3.1.5 Розробка радіаційної установки з генератором електронів низької енергії

*Компоновка установки.* В проекті було поставлено завдання створити спеціалізовану експериментальну установку для наукових та технологічних досліджень в низькоенергетичній області. Було розроблено технічне рішення конструювати її за розподіленою структурою. Заплановано реалізувати даний проект в ІЯД НАН України.

Компоновка установки здійснена за розподіленою структурою в 3-х основних технологічних приміщеннях, як це показано на рис. 3.9.



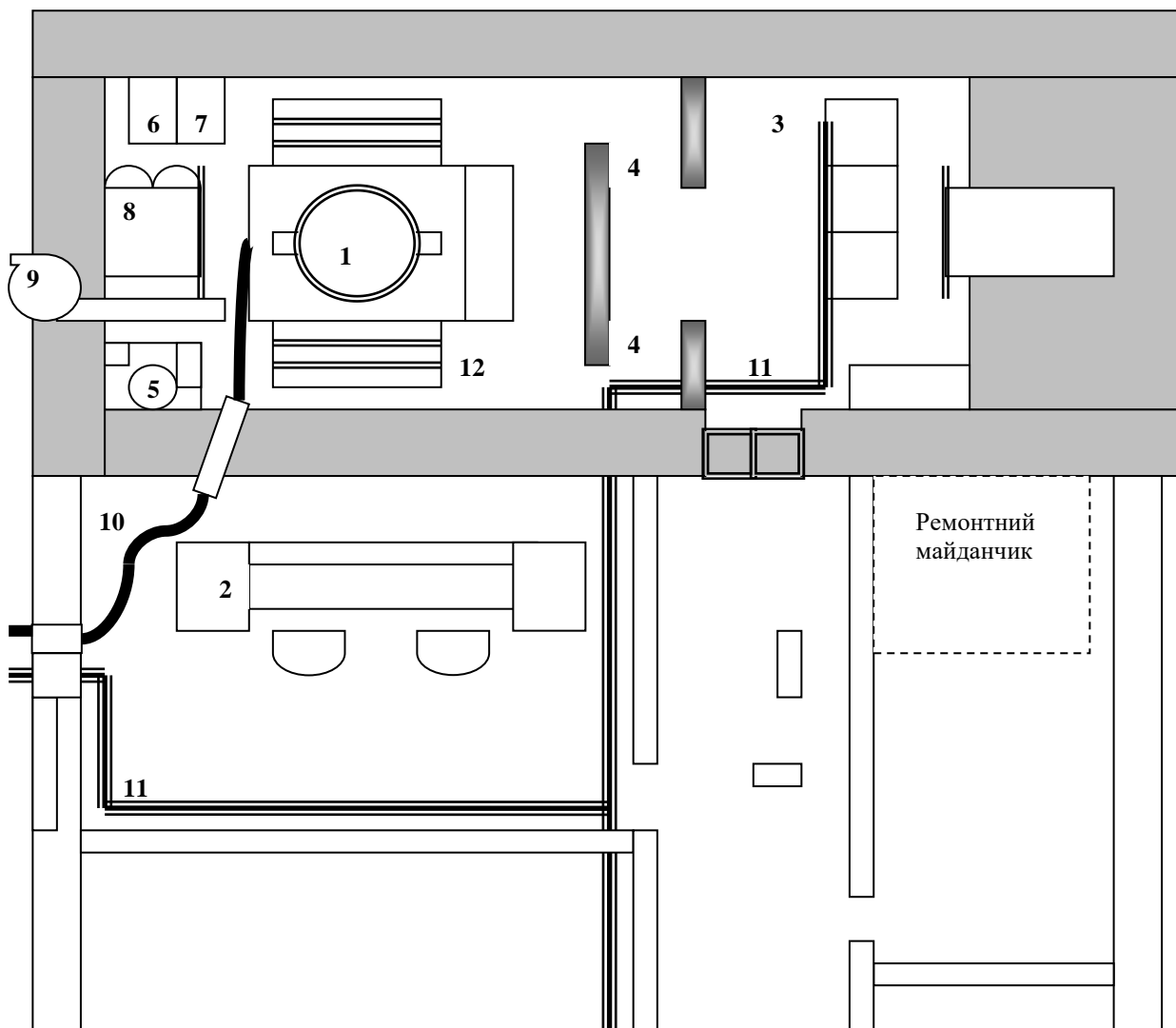
Рис. 3.9 Монтаж прискорювача електронів низької енергії

Усе обладнання, що генерує шкідливі випромінювання, передбачається встановлювати в боксі (1), стіни якого виконані у відповідності до санітарних норм радіаційної, технічної і пожежної безпеки [192,229]. Головна вимога до конструкції боксу – виконання норм радіаційної безпеки для захисту персоналу і довкілля від дії іонізуючих випромінювань. Параметри будівлі та конструкційні елементи розраховуються згідно Санітарних Норм розташування прискорювачів 1 групи.

Поблизу генератора електронів розміщуються й інші елементи установки з переліку тих, що є джерелами електричних і електромагнітних перешкод (силове і імпульсне обладнання), акустичних шумів (насоси, вакуумні агрегати), джерел летючих викидів (форвакуумне устаткування, мастильні ємності тощо).

В захищеному боксі (рис. 3.10) встановлюється джерело радіації (прискорювач електронів (1)), транспортер матеріалів (12) під опромінення, засоби місцевого протирадіаційного захисту (4).

Ці вузли утворюють блок опромінення, де при необхідності можуть встановлюватися місцеві протирадіаційні металеві екрани. Для запобігання нештатних ситуацій при роботі установки, ця частина боксу відокремлюється лабіринтом (4) з дисциплінуючими дверима.



- |                            |                           |
|----------------------------|---------------------------|
| 1- прискорювач електронів; | 7 - газований пост;       |
| 2- пульт керування;        | 8 - газові балони;        |
| 3- шафи енергоживлення;    | 9 - спецвентиляція;       |
| 4- місцевий захист;        | 10 - мегавольтний кабель; |
| 5- блок охолодження;       | 11 - кабельні канали;     |
| 6- вакуумний пост;         | 12 - транспортер;         |

Рис. 3.10 Компонівка обладнання радіаційної установки для досліджень з іонізуючими випромінюваннями низьких енергій [208]

На вільній частині боксу встановлюється силова техніка та електронні засоби контролю і блокувань (3). Тут же розташовується і локальна система спецвентиляції, яка забезпечує аспірацію підпучкового простору блоку опромінювання.

На вільних від генеруючого обладнання майданчиках розміщуються обладнання, яке не вимагає ретельного контролю, або використовується епізодично. До такого належать вакуумні пости (6, 7) балони з робочими газами та система

засобів водяного охолодження (5). В цьому боксі при роботі устаткування не передбачено знаходження персоналу, а його входні двері облаштовуються спеціальними «зонними» дверима з блокуючими засобами і сигналізацією.

Персонал установки та дослідники-експериментатори при включеній установці перебувають на пульті керування (2), технологічному майданчику або в приміщенні вимірювально-обчислювального комплексу.

Пульт керування установкою розташовується в суміжному до боксу приміщенні (2). З пульта установки здійснюється керування усіма вузлами установки і експериментом в цілому. В системі керування (управління) вузли установки об'єднуються силовими і сигнальними кабельними мережами (11, 10).

Через кабельну мережу (11) подається напруга електроживлення апаратури в бокс та силовий агрегат ВС-25, який розміщений поза стінами корпусу в його спеціальній прибудові. Кабельне сполучення (10) (спеціальний кабель з покращеною ізоляцією) забезпечує передачу високої напруги постійного струму для живлення прискорювача і високочастотну напругу 400 Гц для живлення електронного інжектора прискорювача [229].

*Розрахункові параметри установки* за результатами конструкторських робіт такі: установка споживатиме від мережі живлення 380 В 50 Гц всього 30 кВт, очікувані витрати на її експлуатацію не більше 5 € на кВт/годину пучка, очікувана вартість установки 400 тисяч євро.

Маючи таку установку цілком реально долучитися найближчим часом до новітніх радіаційних технологій для металургії, будівельної індустрії, а також до досліджень і розробок шляхів подолання екологічних проблем сучасного виробництва, які проводяться найбільш розвинутих країнах світу. З використанням низькоенергетичних електронів буде перспектива створення ще більш міцних конструкцій з композитних радіаційно-модифікованих цементуючих систем за технологією багатошарових композитних матеріалів. Така багатошарова структура бетону є найбільш вигідною для конструювання виробів підвищеної міцності і з унікальними властивостями протистояти складним умовам експлуатації.

Заплановані напрямки дослідницьких робіт на новій установці знаходяться в руслі вирішення актуальних проблем сучасного суспільства і їх реалізація сприятиме прогресу вітчизняної науки і економіки.

### **3.1.6 Висновки**

Зроблено техніко-економічне обґрунтування проекту радіаційної установки з прискорювачем електронів 100-400 кеВ та встановлено перспективні напрямки досліджень на установці.

Доведена доцільність створення установки і організації науково-технологічних досліджень радіаційних технологій з електронами низьких енергій.

Показано, що заплановані напрямки дослідницьких робіт на новій установці знаходяться в руслі вирішення актуальних проблем сучасного суспільства і їх реалізація сприятиме прогресу вітчизняної економіки.

Обґрунтовано, що оптимальним шляхом розвитку експериментальної бази ІЯД НАНУ є доповнення існуючого джерела електронів 4 МеВ додатковим електрофізичним джерелом на основі прискорювача електронів прямої дії з енергією не вище 500 кеВ та глибоким регулюванням енергії та інтенсивності.

Розраховано, що для формування повноцінного радіаційного комплексу необхідно отримати пучок електронів потужністю не менше 20 кВт. Спорудження нової установки з прискорювачем електронів 0.4-0,5 МеВ компенсує дефіцит доступних для досліджень енергій і суттєво розширює обсяги наукових досліджень і технологічних розробок.

### **3.2 Створення радіаційного комплексу для досліджень і прикладних робіт з електронами широкого енергетичного спектру**

Розширення енергетичного діапазону іонізуючих випромінювань на експериментальній базі ІЯД є перспективною науково-практичною задачею. Її вирішення надасть нові знання з техніки прискорювачів та досвід їх реалізації,

дозволить суттєво збільшити обсяги прикладних досліджень і технологічних розробок [167]. Отримані результати є важливими для прогресу сучасної економіки та можуть забезпечити пріоритет ІЯД в області прикладних ядерних досліджень і радіаційних технологій. Особливо значимим є утворення комплексу для функціональних випробувань електротехнічного обладнання, плівкових матеріалів для виготовлення ізоляційних кабелів високої напруги, дезінфікуючих плівок і матеріалів, захисного обладнання персоналу ядерних об'єктів.

На рис. 3.11 наведена схема об'єднання двох установок в єдиний комплекс для функціональних досліджень і кваліфікації критичного обладнання та матеріалів для ядерної енергетики. Поточний стан створення установки – монтаж основного устаткування і проектування необхідних підпучкових засобів.

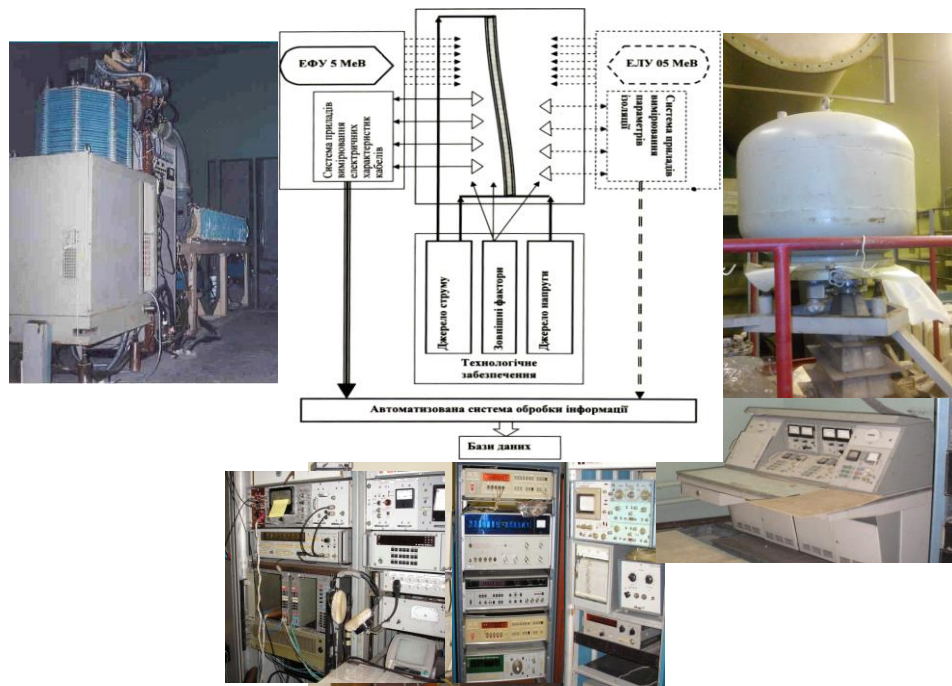


Рис. 3.17. Структура радіаційного комплексу для функціональних випробувань та сертифікації обладнання і матеріалів для АЕС [297]

Створення в ІЯД НАН України сучасного комплексу технологічних досліджень з іонізуючими випромінюваннями 30 – 5000 кеВ, дозволить активізувати в ІЯД дослідження і розробки нових матеріалів, створювати нові технології утилізації полімерних матеріалів та виробів, розробляти ефективні методи промислової стерилізації широкої гама нових сучасних полімерних пакувальних

виробів, сприяти прогресу технології напівпровідників, розробляти ефективні методи карантинної обробки сільськогосподарської продукції та імпортованих продуктів, створювати нові матеріали для ядерної енергетики. Більшість таких процесів була попередньо досліджена на існуючій техніці.

Плани інноваційних технологій спрямовані на вирішення задекларованих Державою пріоритетних напрямків економічного розвитку, а це свідчить, що експлуатація радіаційного комплексу буде рентабельною і забезпечить прогрес науково-технологічних досліджень в ІЯД.

*Висновок.* Створюється генератор електронів низької енергії для розширення обсягів прикладних досліджень з електронами та фотонами.

Розроблено і започатковано монтаж радіаційного комплексу на базі двох прискорювачів електронів різної енергії для досліджень з електронами до 0.1-5 MeV.

Здійснена модернізація радіаційної техніки з метою інтенсифікації розробок інноваційних технологій використання іонізуючих випромінювань у промисловому виробництві.

### **3.3 Удосконалення структури радіаційного комплексу ІЯД НАНУ засобами генерації важких заряджених частинок**

#### **3.3.1 Розробка техніки для технологічного опромінення іонами атмосферних газів**

Енергія заряджених частинок нагромаджених в атмосфері забезпечує життєдіяльність рослинного і тваринного світу. Цей феномен вже понад століття приваблює дослідників шляхом його використання для покращення здоров'я людей та виробництва високоякісних харчових продуктів [73, 210, 241, 249, 295].

За поняттями ядерної та радіаційної фізики, іони атмосферних газів (аероіони) відносяться до переліку заряджених частинок низької та наднизької енергії. Різні сторони впливу природних іонів атмосферних газів на інші компоненти в навколишньому середовищі вивчались тривалий час. Детекторами взаємодії



аероіонів з навколишнім середовищем виступали фізіологічні процеси в живій матерії. Було встановлено, що іонізація атмосфери є важливим процесом, який стимулює існування та еволюцію усього живого на Землі, і який вимагає докладного вивчення і урахування. Найбільшу частку в продуктах іонізації складають іонізовані атоми та молекули атмосферних газів. Взаємодія аероіонів з неживою матерією досліджена мало.

Нагромаджені знання про взаємодію матерії з аероіонами були отримані в дослідженнях з природною їх концентрацією, або трохи вищими з використанням спеціальних технічних засобів іонізації повітря (аероіонізаторів). Ці знання свого часу з великою ефективністю були застосовані для прогресу в базових напрямках діяльності суспільства – медицині, сільському господарстві, екології.

Для подальшого прогресу використання цього феномену на користь людей, поки що виявилось недостатньо знань про взаємодію з матерією інтенсивних потоків цих низько-енергетичних заряджених частинок, які в сотні-тисяч разів інтенсивніші за природні. Але саме такі високо-інтенсивні поля та потоки іонів, як свідчать результати перших досліджень, відкривають можливості технологічного використання аероіонів.

В даному розділі відображено результати досліджень основи таких технологій – принципів створення технічних засобів для генерації щільних потоків іонів з атмосферних газів. Метою досліджень було виявлення перспективних шляхів впровадження феномену аероіонів – іонів атмосферних газів низької та наднизької енергії, та пошук методів конструювання техніки для їх генерації та використання в реальному секторі економіки.

Дослідження носять науково-практичний характер і охоплюють фізику процесів іонізації та формування інтенсивних полів аероіонів. Узагальнено попередній досвід наукових досліджень фізики іонів низької енергії, куди входять усі продукти іонізації атмосфери, досвід практичного використання іонів для виробництва товарів першої необхідності – харчових продуктів, медицини, екології, та попередні результати власних досліджень і практичних методів конструювання генеруючої техніки для промислового опромінення на виробництві. Для досліджень

були залучені фізики-дослідники ІЯД та фахівці галузі харчового виробництва та промислової індустрії [249].

З метою виконання поставлених завдань попередньо було розроблено лабораторну техніку для наукових і прикладних досліджень цього напрямку. Вона стала основою подальшого створення в ІЯД НАН України потужної експериментальної бази, яка поки що не має аналогів і використовується для проведення різноманітних досліджень з зарядженими частинками різної енергії в діапазоні до 50 кеВ.

Основні практичні результати отримано експериментальним шляхом. З цією метою проведено експериментальні та теоретичні дослідження фундаментальних процесів формування та руху в атмосфері інтенсивних потоків заряджених частинок низької та наднизької енергії. Такі дослідження спрямовані на формування наукових основ для технологічних розробок та принципів і методів конструювання технічної бази для фундаментальних та технологічних досліджень, розробки та експериментальних випробувань промислових технологій з залученням іонів атмосферних газів низької енергії.

Такі дослідження на сучасному рівні технологічного розвитку суспільства є актуальними для поглиблення фундаментальних знань про еволюцію структур матерії під дією низько-енергетичних заряджених частинок з точки зору практичного використання в радіаційних технологіях.

В розділі аналізуються фізико-технічні проблеми генерації високоінтенсивних потоків низькоенергетичних іонів та досвід створення відповідних технічних засобів. Визначаються оптимальні напрямки конструювання техніки для практичного використання інтенсивних пучків аеронів на виробництві. Обґрунтовується структура і параметри спеціалізованої аероіонної установки, для здійснення планових досліджень. Розглядається макет такої установки, результати його випробування та порівняння з альтернативними технічними рішеннями інших розробників.

Отримані результати свідчать про можливість створення сучасних технічних засобів генерації безпосередньо в атмосфері технологічнопридатних потоків іонів різних газів для наукових досліджень та промислового використання.

*Огляд і аналіз теоретичних основ генерування іонів в атмосфері.* На даний час єдиним економічно виправданим способом формування потужних потоків іонів атмосферних газів для технологічних потреб є електричний розряд. Усі інші методи, поки що в десятки-сотні разів поступаються електророзрядним. Такі висновки зроблено з результатів спеціальних досліджень теорії та практики генерування і формування пучків аероіонів. Крім того, дослідження показали, що поширені зараз на ринку електророзрядні аероіонізатори не дозволяють стверджувати про їх придатність для потреб технологічної модифікації матеріалів в реальному виробництві. Для того щоб отримати таку можливість, необхідно генерувати пучки іонів в десятки-тисяч разів інтенсивніші, щоб їх кількісне зростання призвело до керованого й ефективного технологічного процесу. Але усі попередні промислові моделі електророзрядних аероіонних генераторів таким вимогам не відповідають.

Згідно теорії, для генерування іонів найбільш ефективним є використання загострених електродів. Вони, наприклад, в 2-3 рази ефективніші за поширені в промислових установках варіанти застосування струн-антен з тонкого дроту. Це добре видно з аналізу рівнянь теоретичної фізики, щодо іонізації газів поблизу потенціальних елементів (емітерів). Теорія електроіонізації формувалась впродовж тривалого часу. На її положеннях були побудовані перші іонізатори Л. Чижевського, та ціла низка таких засобів інших авторів. За досить великий проміжок часу (понад 50 років) практичного застосування перших зразків електроіонізаторів вивчено не тільки механізми передачі атомам атмосферних газів електричних зарядів, але нагромаджено досвід конструювання аеронізаторів. Основним напрямком застосування була медицина та санітарна гігієна в комунальних господарствах. В другій половині 70-х років минулого століття з'явилося багато публікацій про промислове використання електроіонізації. Наприклад, аналіз стану проблеми пов'язаний з перспективою досліджень понад 2000 статей, наукових звітів, дисертацій та авторських свідоцтв за увесь період становлення цього напрямку

науки та технології, яке свідчило про масове захоплення науковців і конструкторів цим феноменом.

Загальна схема генерації заряджених частинок загостреними електродами (емітерами) наведена на рис. 3.12.

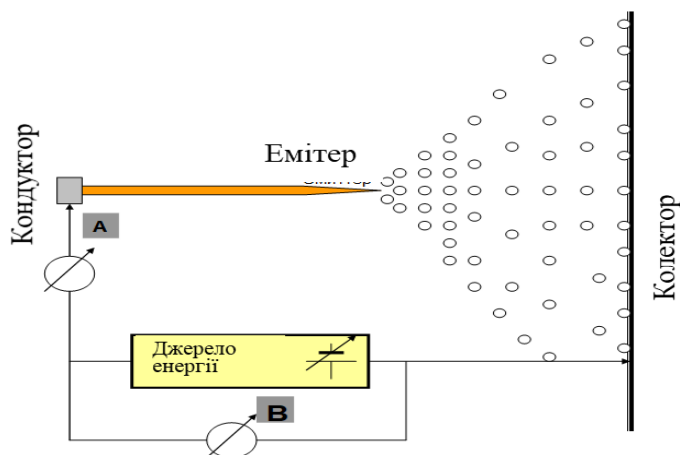


Рис. 3.12 Спрощена схема процесу генерації заряджених частинок електричним розрядом в атмосфері за допомогою загострених електродів-емітерів [96]

Промислове технологічне застосування аероіонів було пов'язане з необхідністю іонізації атмосфери, в складі якої крім газів входять різноманітні включення (вода, пил, дим тощо) за допомогою емітерів у вигляді струн-антен. Була розроблена теорія і конструкції технічних засобів з струнами-антенами [302]. Такі генератори зараз найбільш поширені у потужних промислових установках з аероіонізаторами для харчової галузі. Схема процесу іонізації атмосфери з твердими включеннями – часточками диму, наведено на рис. 3.13.

В цьому аероіонізаторі кондуктор (1) утримує струни-емітери (2). На кондуктор прикладена напруга від зовнішнього джерела енергії. Другий електрод – екран-колектор (3). Поблизу струн за рахунок їх кривизни утворюється зона з градієнтом електричного поля, під впливом якого генерується хмара електронів (дрібні білі кульки), які починають рухатися до колектора та набирають енергію, що дорівнює різниці потенціалів на шляху їх руху. Через те, що рух відбувається в щільному середовищі, на своєму шляху електрони зіштовхуються з атомами газів, молекулами води та іншими включеннями.

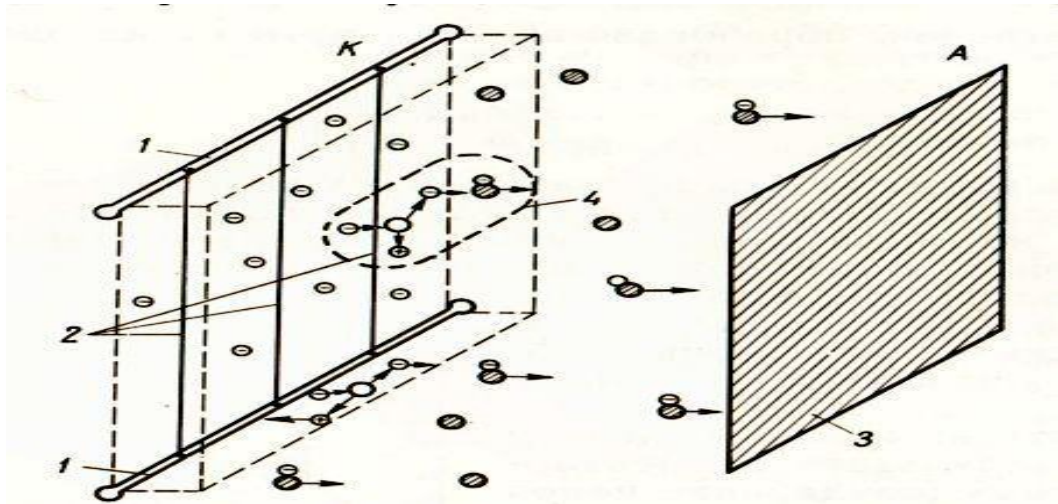


Рис. 3.13 Схема традиційної методики іонізації димової суміші в електрокопильній техніці за допомогою струн-антен, що знаходяться під високим електричним потенціалом

Частина електронів приєднується до атомів газів або вибиває вторинні електрони з зовнішніх орбіт атомів і утворюють іони. Інші приєднуються до атомів у складі води, осідають на мінеральних включеннях і утворюють заряджені кластери, які рухаються у напрямку до відповідного електроду. З цих конкрецій формується потік електризованих мас, який здатен переносити значні маси таких конкрецій. Це і є головною метою традиційного використання аероіонів, наприклад, в системах електрокопчення, електростатичних розпилювачах, насосах тощо.

На рис. 3.13 світлі часточки – це емітовані струнами електрони й іони атмосферних газів, а темні – електричнозаряджені ними димові часточки. Режим роботи іонізатора залежить від підведеної напруги, вибраного струму розряду, складу та концентрації димових часточок, тиску, вологи, пилу.

Згідно теорії електричного розряду струм заряджених частинок ( $I_k$ ) при електричному коронному розряді в атмосфері можна оцінити за формулою :

$$I_k = 1,3 \varepsilon_0 V (U_k - U_{k0}) \left( \frac{D_0}{D} \right)^{0,31} + 1,8 \varepsilon_0 K U_k (U_k - U_{k0}) \left( \frac{D_0}{D} \right),$$

де:  $\varepsilon$  – діелектрична постійна;

$V$  – швидкість потоку повітря, поблизу коронуючого електроду;

$U, U_0$  – напруга на коронуючому електроді та в чохлі корони;

$D, D_0$  – густина повітря (до і після іонізатора);

$K$  – постійна Больцмана;

В цих розрахунках передбачається, що елементом, де виникають заряджені частинки є емітер у вигляді голки, підключеної до джерела високої напруги (рис. 3.18). Другий полюс джерела електричного живлення підключено до колектора – плоского електроду великого перерізу. Електрони, що виникають на границі вістря, де градієнт електричного поля максимальний, іонізують молекули оточуючого газу і виникають потоки іонів спрямовані від вістря до колектору. Цей потік на практиці часто називають «іонний вітер», або «електричний вітер».

В теоретичних роботах, присвячених даній проблемі, часто оцінюється кількість іонів ( $n$ ), утворених на відстані ( $x$ ) від вістря емітера опираючись на класичну електродинамічну модель іонізації з урахуванням коефіцієнта Танусенда:

$$N = \exp\left(\int a_u(x) dx\right)$$

Згідно класичної електродинаміки в потоці іонів виникають сили, які розштовхують потік – кулонівські сили об'ємного заряду. До них додаються атмосферні збурення, неоднорідності атмосфери тощо. В результаті елементарне електророзрядне джерело дає потік заряджених частинок, який на незначній відстані від емітера має низьку щільність. З огляду на неоднорідність атмосфери його рівномірний розподіл по поверхні колектору зовсім не обов'язковий. Для проектування реальних технологічних процесів необхідно окремо розглядати процеси іонізації (утворення іонів), процеси їх транспортування до об'єкта та процеси передачі іонами заряду на матеріалі колектора.

### 3.3.2 Іонізація

Теоретичною основою процесів генерації іонів (іонізації) є закони електродинаміки. Вони описують механізми іонізації газу в сильних електричних полях, в полях з високими градієнтами та в полях високочастотних коливань. Для нашого випадку важливими є два перших випадки. Такі процеси можна описувати не тільки теоретичними викладками, але і рівняннями, отриманими експериментально в умовах реальної атмосфери. Частіше використовують теоретичні роботи. Наприклад, в роботі Толкунова І.А. стверджується, що в

загальному вигляді струм аероіонів усіх знаків ( $I_n$ ), що виникають під дією сильного електричного поля електрокоронного іонізатора в атмосферному повітрі можна описати наступним рівнянням:

$$I_n = \eta \cdot I_k = \eta \cdot q \cdot n^{\pm} \cdot S_{\text{эф}} \cdot (V + K \cdot E)$$

де  $S_{\text{эф}}$  – площа вихідного перерізу іонізатора м<sup>2</sup>;  $\eta$  – коефіцієнт використання струму коронного розряду ( $\eta \ll 1$ ).  $K, E \ll V$  – характеризують параметри чистого від пилу та інших сторонніх включень потоку повітря, яке проходить через іонізатор.

Для коректного вигляду, придатного для аналізу іонізаторів, призначених для систем вентиляції та кондиціонування пропонується введення коефіцієнтів, які зв'язують концентрацію аероіонів ( $n^{\pm}$ ) з іншими параметрами – напругою, характеристиками повітря в іонізаторах, в такому вигляді:

$$n^{\pm} = \frac{1,315 \cdot \eta \cdot \varepsilon_0 \cdot (U_k - U_{k0})}{q \cdot S_{\text{эф}}} \cdot \left(\frac{D_0}{D}\right)^{0,31}$$

тут  $U_k$  та  $U_{k0}$  – напруга на вістрях генеруючих (емітуючих) електродів,  
 $D_0$  та  $D$  – показники щільності повітря до та після іонізатора.

А вплив характеристик зовнішнього повітря на струм іонізатора пропонується обчислювати через показники температури ( $T, T_0$ ) та тиску ( $P, P_0$ ) за рівнянням стану газу та зміни щільності повітря до та після іонізатора ( $D, D_0$ ):

$$D = D_0 \cdot \frac{T_0}{T} \cdot \frac{P}{P_0}$$

З рівняння встановлено результат, який вимагає окремого тлумачення, бо перечить і логіці процесів і наявному досвіду практичного конструювання інтенсивних технічних засобів аероіонофікації. З цього рівняння виходить, що концентрація аероіонів на виході електророзрядного аероіонізатора (голчастого емітера) не залежить від швидкості потоку повітря, що його обтікає. Очевидно, для окремих випадків це справедливо. Але конструкції, створені в м. Києві В.А. Музиченком, показують чітку залежність інтенсивності іонних потоків від швидкості обдуву його струменем повітря і якості повітряної суміші. Тому приймати класичні рівняння в основу розробки промислових аероіонізаторів треба з певною обережністю.

Перспективним є використання енергетичних рівнянь, розроблених для розрахунку іонізаційних втрат на повітряних високовольтних лініях електропередач. З їх використанням В.А. Музиченком було створено генератор інтенсивних потоків аероіонів для обробки плодоовочевої продукції та передпосівної обробки зерна пшениці, який успішно експлуатувався тривалий час.

В ІЯД в основі попередніх розрахунків прийнято положення про головну роль електронів, як стимуляторів процесів іонізації та подальшої модифікації органічних сполук. Тому попередні розрахунки здійснюються, виходячи з теорії електронних лавин і об'ємного (просторового заряду). За цими положеннями встановлюються кількісні характеристики коронного розряду, використовуючи два коефіцієнти Таунсенда –  $\gamma$  та  $\alpha$ .  $\alpha$  – коефіцієнт об'ємної іонізації, який визначає число актів іонізації, здійснених одним емітованим з вістря електроном, що проходить в атмосфері відстань завдовжки 1 см;  $\gamma$  – коефіцієнт, що визначає кількість актів іонізації в усьому об'ємі. Він визначає відношення числа електронів, які відносяться до числа позитивних іонів, попадаючих на плоский колектор.

З аналізу реального досвіду слід враховувати необхідність використання електроди з мінімальними (мікронними) радіусами кривизни. Тому втрачати час на обчислення оптимального кута заточування електродів та їх діаметру нераціонально.

Запропоновані нами розрахунки генеруючих елементів електророзрядних аероіонізаторів ґрунтуються в основному на експериментальних дослідженнях. Тому вони більш точно відображають процеси іонізації атмосфери та виконуються простими методами. Використовується система рівнянь, що охоплює усі складові процесів, а не лише елементарні заряди, як це зазвичай роблять конструктори комунальних аероіонізаторів.

$$\left. \begin{aligned} n &= n_0 \cdot e^{\alpha x} \\ n &= n_0 \cdot e^{\int_0^x \alpha \cdot dx} \end{aligned} \right\}, \text{ де } n_0 - \text{число електронів в лавині, емітованій катодом,}$$

а  $n$  – число електронів лавини, які надійшли до колектора.

За такого підходу силу електронного струму лавини вже на колекторі, що розташований на відстані  $x$  від емітера, можна попередньо оцінити за формулою:



$$i_e = i_{e0} \cdot e^{\int_0^x \alpha \cdot dx}$$

Тоді число електронів, що досягли колектора складатиме:

$$n_a = n_1 \cdot e^{\int_0^d \alpha \cdot dx}$$

При проходженні відстані  $x$  електрони здійснюють іонізацію атмосфери з утворенням іонів і нових електронів. З урахуванням цих процесів кількість електронів, які реально надійдуть до колектора буде більшою і її можна оцінити за формулою;

$$n_a - n_1 = n_1 \cdot \left( e^{\int_0^d \alpha \cdot dx} - 1 \right)$$

Відповідно, утворюється така ж кількість позитивно заряджених іонів. Але через меншу рухливість у в'язкому середовищі ці позитивні іони утворюють коло емітера об'ємний заряд. Позитивні іони в результаті елементарних процесів (взаємодія між собою, взаємодія з нейтралами, збудження, вторинна емісія тощо) утворюють другу лавину електронів ( $n_2$ ). Кількість таких електронів дорівнює кількості позитивних іонів, помноженій на коефіцієнт Таунсенда  $\gamma$ :

$$n_2 = (n_a - n_1) \cdot \gamma = \gamma \cdot n_1 \cdot \left( e^{\int_0^d \alpha \cdot dx} - 1 \right)$$

А відношення кількості електронів в різних лавинах ( $\eta$ ) визначає вид електричного розряду і є основою для проектування генеруючої техніки:

$$\mu = \frac{n_2}{n_1} = \gamma \left( e^{\int_0^d \alpha \cdot dx} - 1 \right)$$

Випадок, коли кількість електронів первинної і вторинної лавини однакова, характеризує самостійний електричний розряд. Якщо вторинних електронів більше відбувається пробій розрядного проміжку. При зменшенні – розряд згасає. Оцінка цього показника дозволяє об'єктивно підходити до вибору параметрів джерел живлення і створення оптимальних конструкції аероіонізаторів.

*Аналіз теоретичних основ транспортування іонів в атмосфері.* В реальних технологічних процесах отримані в результаті іонізації атмосфери іони (аероіони) фактично використовуються як транспортери енергії (у вигляді електричних зарядів) до органічної сировини з метою її структурної модифікації. Тому транспортування заряджених частинок є важливою проблемою і визначає

ефективність їх технологічного використання. Критерієм вирішення цієї проблеми є досягнення максимального показника передачі зарядів (фактично – енергії) від джерела електричного живлення іонізатора до продукту.

Енергію можна передавати різними шляхами. Самий простий шлях – транспортування енергії елементарними зарядами (електрони, іонізовані молекули кисню чи азоту). Цей простий варіант часто використовується для здійснення промислових технологій. Але з практики видно, що такий шлях не завжди дозволяє передати необхідну кількість енергії для модифікації органіки.

Тому пошуки шляхів інтенсифікації процесів транспортування зарядів є актуальною проблемою проектування техніки для аероіонних технологій. В розробках ІЯД випробувані та використовуються усі доступні методи транспортування енергії, в тому числі не тільки одиночними елементарними зарядами, але і багатозарядними іонізованими частинками. Такі процеси мають під собою досить надійну теоретичну основу і добре опрацьовані в теорії та практиці прискорювачів заряджених частинок.

В атмосфері завжди можна виділити включення, які здатні накопичувати електричні заряди того ж знаку, що і потенціал на емітері. Заряджатися здатні усі пилові включення, пари рідин, пари металів, наночастинки тощо. Ці заряджені композиції (багатозарядні частинки) рухаються під дією електростатичних сил і переносять до продуктів суттєво більші кількості енергії, ніж елементарні заряди, не зважаючи на менші швидкості їх руху у в'язкому середовищі (атмосфері). У них повільніша динаміка, але вони менше втрачаються через об'ємне розштовхування кулонівськими силами. Сумарний ефект транспортування багатозарядними іонами суттєво вищий і тому в розробці конструкцій в ІЯД ці положення активно використовуються.

Для процесів з багатозарядними частинками важливо оцінити три одночасних процеси – зарядка частинок, переміщення (транспортування) багатозарядної частинки до продукції (колектора) та передача зарядів у матеріал сировини чи інші технологічні ефекти.

*Зарядка* частинок відбувається під дією сил зовнішнього електричного поля. За рахунок електростатичної індукції виникає поляризація включень і зближення частинки з іонами атмосферних газів. Суть самого процесу зарядки в тому, що під дією вказаних сил на частинці (різні включення в повітрі – від пилу до молекул води) поступово скупчуються елементарні заряди. Через велику різницю в масах цих компонентів, ці процеси можуть бути досить тривалими (десятки хвилин). До зближення вказаних компонентів додаються також і механічні сили теплового руху. Заряд таких частинок може бути дуже високим. Його можна підрахувати, виходячи з величини електричного поля та теплової дифузії іонів (з електродинаміки).

В процесі розрахунків і експериментів встановлено, що підрахунки максимального заряду важких частинок ( $q_E$ ) можна зробити за формулою:

$$q_E = n \cdot e \cdot \left(1 + 2 \cdot \frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon + 2}\right) \cdot E \cdot r^2$$

Тут  $n$  – максимальне число елементарних зарядів, які осіли на частинку;  
 $e$  – величина елементарного заряду;  $\varepsilon$  – діелектрична постійна частинки;  
 $E$  – напруженість електричного поля;  $r$  – радіус частинки.

Експерименти підтвердили, що для включень розмірами 1-10 мкм ця формула дозволяє досить точно визначити їх заряд.

З досвіду аероіонних технологій відомо, що зарядка атмосферних включень розмірами більшими 0,5 мкм відбувається виключно за рахунок теплового руху іонів. Для розрахунку заряду частинки по ланцюгу теплової дифузії іонів ( $q_T$ ) отримуємо дещо видозмінене рівняння:

$$q_T = n \cdot e = \frac{r}{e^2} \cdot K \cdot T \cdot \ln \left(1 + \sqrt{\frac{2}{\pi \cdot m \cdot K \cdot T}} \cdot 2 \cdot r \cdot N \cdot e^2 \cdot t\right)$$

де  $r$  – радіус частинки;  $e$  – елементарний заряд;  $m$  – маса іона;  $t$  – час;  
 $K$  – постійна Больцмана;  $T$  – абсолютна температура;  
 $N$  – концентрація зарядів на великих відстанях від частинки.

На заряджені частинки в полі електророзрядного аероіонізатора діє електростатична сила  $F_I$ :

$$F_I = qE,$$

яка залежать від заряду частинки ( $q$ ) та напруженості електричного поля ( $E$ ).

Якщо діелектрична постійна частинки відрізняється від діелектричної постійної оточуючих газів на частинки сферичної форми (наприклад, групи молекул води) діють сили  $F_2$ , спрямовані на переміщення її в сторону електричного поля більшої напруги.

$$F_2 = E \cdot \frac{dE}{dx} \cdot r^3 \cdot \frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon + 2}$$

$\frac{dE}{dx}$  – градієнт напруги електричного поля

Найбільшу швидкість в ансамблях заряджених частинок мають часточки з великим радіусом і поблизу коронуючого електроду (звичайно при достатньому градієнті електричного поля). Важливим фактором прискорення і транспортування заряджених частинок розміром до 1 мкм є електричний вітер, швидкість якого може сягати 1 м/с. Це дозволяє точно розраховувати електричні режими аероіонної обробки і конструкцію робочих камер технологічних установок. В експериментах було показано, що в стаціонарному режимі роботи установки, коли швидкості переміщення аероіонів в камері взаємно урівноважені та стабілізувалися, їх величину (швидкість  $v_1$ ) можна розрахувати через показник в'язкості газу ( $\eta$ ) та інші показники процесів за формулою:

$$v_1 = \frac{F_1}{6 \cdot \pi \cdot \eta \cdot r} = \frac{q \cdot E}{6 \cdot \pi \cdot \eta \cdot r}$$

Вказані ефекти необхідно враховувати при розрахунках елементів коронуючих електродів і конструкції камер аероіонної обробки, бо саме вони визначають не тільки ефекти транспортування зарядів до продукції, але і супутні, небажані процеси зворотного руху заряджених компонентів, їх осідання на поверхні коронуючих електродів, які призводять до зміни геометрії розрядного проміжку і втрати працездатності установки.

### 3.3.3 Висновки

Досліджено фундаментальні процеси формування та руху в атмосфері інтенсивних потоків заряджених частинок низької та наднизької енергії.

Досліджено механізми генерації іонів в електрофізичних джерелах. Виявлено особливості електрофізичних процесів, які визначають ефективність іонізації і динаміку потоків атмосферних іонів низьких і наднизьких енергій.

Детально досліджено особливості процесів іонізації атмосферних газів в електричному розряді. Встановлено можливість використання положень фізики пучків заряджених частинок та прискорювальної техніки. Справедливість висновку про подібність їх фізичних принципів формування і транспортування пучків заряджених частинок підтверджено експериментальними даними

Встановлено фатальний вплив щільної атмосфери на динаміку руху аероіонів.

Показано, що використання принципів побудови прискорювачів прямої дії при конструюванні аероіонних установок суттєво розширяє енергетичні можливості нової техніки.

Численні моделювання на стендах, а також вимірювання ефективності електростатичного фокусування пучків науково-дослідних і промислових варіантів низькоенергетичних аероіонних установок свідчить про те, що фактор подібності можна використовувати для реальних конструкторських розробок потужних технологічних установок для різних галузей промисловості.

Встановлено перелік параметрів, які сприяють отриманню і транспортуванню інтенсивних потоків іонів різних газів. Встановлено фактори, які вносять невизначеність в процесі іонізації газів в електричних полях.

### **3.4 Дослідження і розробки методів формування і транспортування інтенсивних пучків іонів великого перерізу**

Для створення нового покоління генераторів аероіонів досліджено й розроблено методи формування іонних пучків будь-якого перерізу. Для них створено спеціальні технічні засоби – іонно-оптичні системи, за допомогою яких можна в широких межах і ефективно керувати процесами формування потоків аероіонів і робочих камер іонізаторів.

В основу розробки таких іонно-оптичних систем покладено положення теорії фізики пучків заряджених часинок, а конструкцій – досвід розробки прискорювальної техніки. В основу розробки електроіонізаторів, здатних формувати у великих об'ємах робочих камер рівномірних потоків аероіонів великих перерізів, взято принципи формування пучків заряджених частинок в прискорювачах прямої дії [302].

Схема електрофізичного іонізатора, розробленого для промислового застосування наведена на рис. 3.14

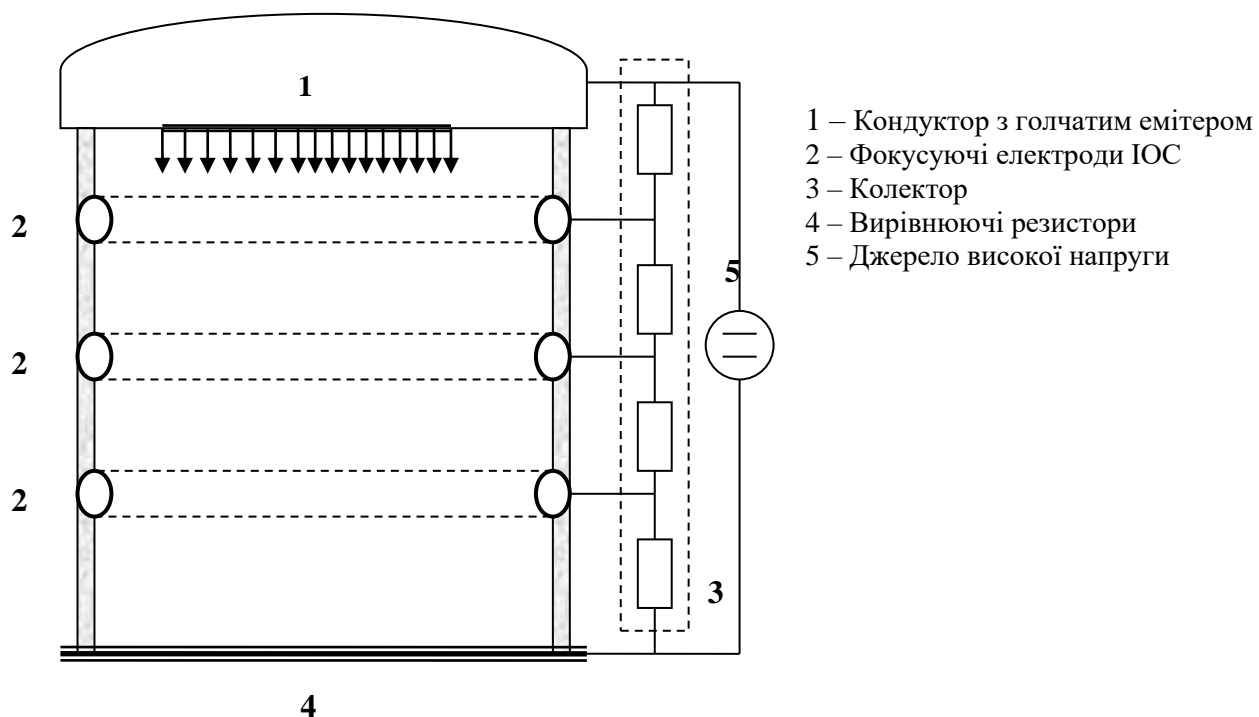


Рис. 3.14 Схема генератора потоків аероіонів широкого перерізу

### 3.4.1 Дослідження ефективності розроблених методів формування потоків іонів

За відсутності адекватної теоретичної моделі формування потоків іонів в атмосфері, дослідження здійснювались експериментально на повнорозмірних макетах іонізаторів. На лабораторних стендах досліджувалась ефективність застосування спеціальних іонно-оптичних систем (ІОС) рекомендованих в теорії транспортування пучків заряджених частинок, але не у традиційному вакуумі, а для транспортування заряджених частинок в атмосфері Основні дослідження

здійснювались на макеті іонізатора з розмірами робочого об'єму 60см x 60см x 60см, кондуктором з голчатими коронуєчими електродами (рис. 3.15).



Переріз колектора 60 см x 60 см;  
Кількість фокусуєчих елементів ЕОС – 3;  
Напруга пробою колектора – 50 кВ;  
Робоча напруга джерела живлення - 5 - 40 кВ;  
Діапазон вимірювання 5- 45 кВ;  
Діапазон регулювання струму – 2-200 мкА

Глибина робочої камери – 60 см.  
Детектори аероіонів:  
- переріз датчика – 4 см<sup>2</sup>  
- ємність інтегратора – 390 нФ/45 кВ.  
- переміщення - по усьому полю колектора.

Рис. 3.15 Повнорозмірний макет дослідницької установки

Усі вказані елементи допускали регулювання та варіацію структури іонізатора, його конструкції та електричних режимів в широких межах. З цією метою для іонізатора створено спеціальне джерело високої напруги (рис. 3.16) з контролем і глибоким регулюванням і стабілізацією напруги та струму розряду на кондукторі.

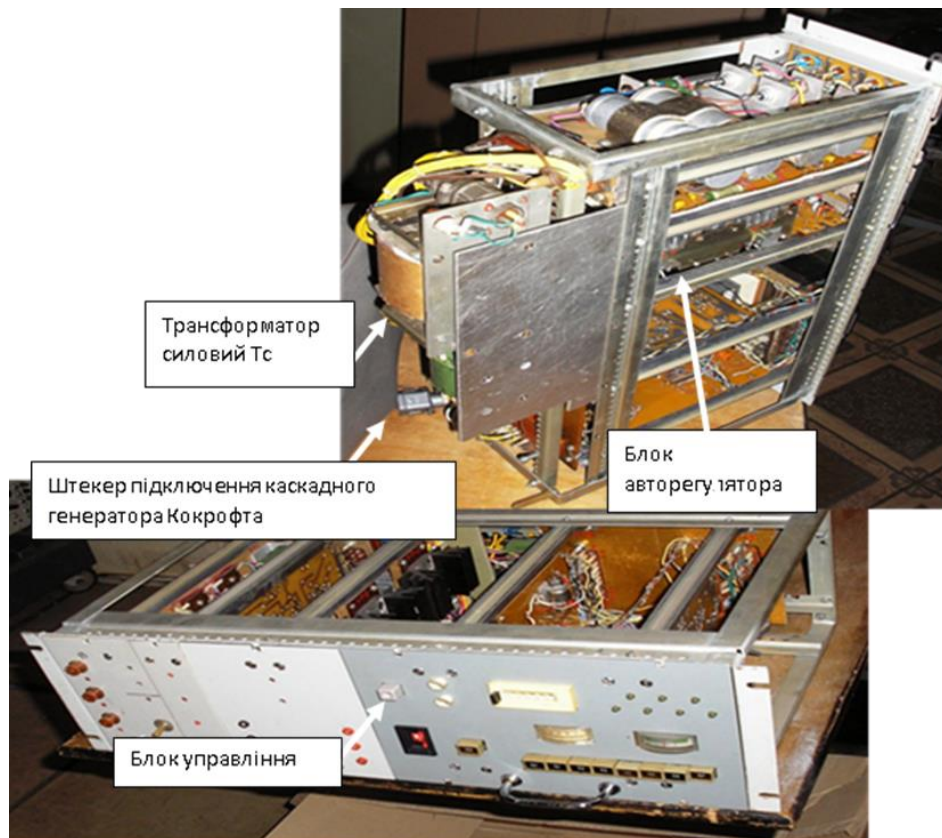


Рис. 3.16 Конструкція джерела високовольтного живлення аероіонізатора дослідної установки

Блок-схема цього джерела наведена на рис. 3.17. Структура джерела утворена силовим перетворювачем (1) змінної напруги силової мережі в постійний стабілізований струм для живлення базових вузлів джерела.

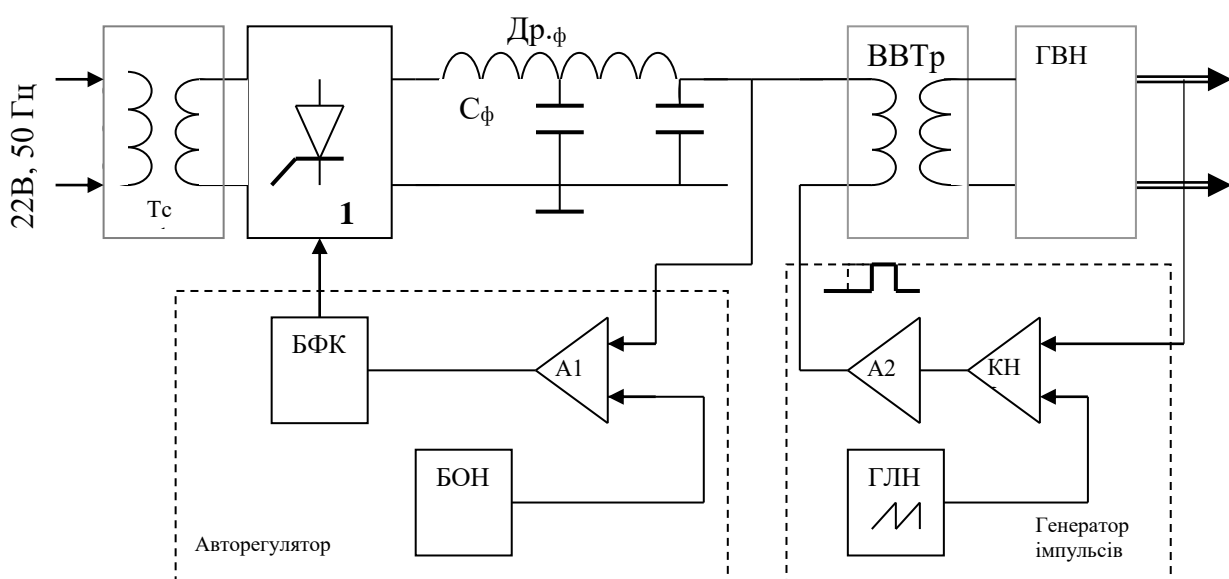


Рис. 3.17 Блок-схема джерела живлення електроіонізатора



До таких відноситься генератор високої напруги (ГВН), який працює на принципах проміжного перетворення постійної напруги живлення від блоку (1) в прямокутні імпульси напруги високої частоти. Навантаженням цього перетворювача є каскадний генератор (рис. 3.18). На його виході формується висока напруга постійного струму.

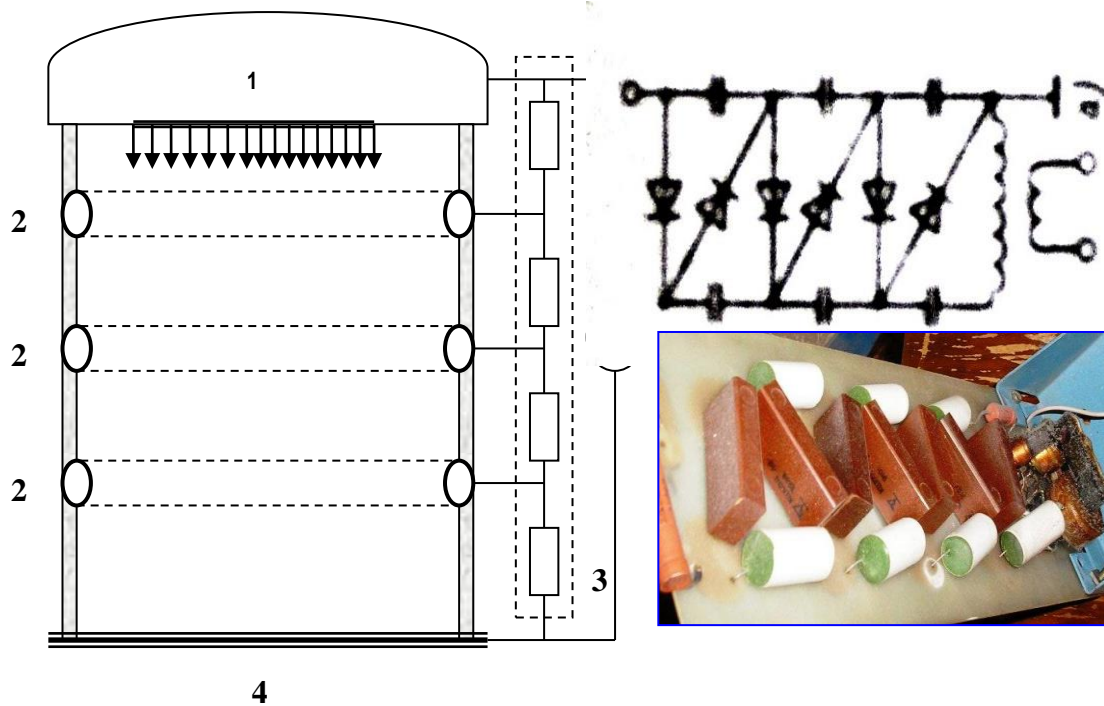


Рис. 3.18 Схема і конструкція каскадного генератора Кокрофта-Уолтона – джерело високої напруги електрофізичної стендової лабораторної установки генерації та прискорення іонів в потенціальному полі

Величина цієї напруги залежить від ширини прямокутних імпульсів на вході генератора (рис. 3.18). Цей параметр регулюється авторегулятором. Така система відслідковує величину високої напруги на виході або струм в розрядному проміжку іонізатора й автоматично компенсує будь-яке відхилення високої напруги (регульованого параметру) від заданого. Задається вона зі спеціального вузла регулювання – генератора імпульсів, тривалість яких можна плавно змінювати практично від 0,1 до 1,0.

### 3.4.2 Експериментальні дослідження ефективності генерації і транспортування аероіонів в потенціальному полі за схемою прискорювача прямої дії

Метою досліджень було встановлення шляхів отримання потоків іонів великої щільності та значного перерізу та технічно обумовлені обмеження структури прискорювачів прямої дії, щодо ефективності роботи в атмосфері.

Попередній аналіз можливостей формування потрібної конфігурації електричного поля в заповненій атмосферою камері прискорювача прямої дії з інжектором у вигляді панелі з коронуючими голчастими (ефлювіальними) електродами свідчив про можливість формування заданої конфігурації прискорюючого поля і регулювання його (рис. 3.19) в широких межах [302].

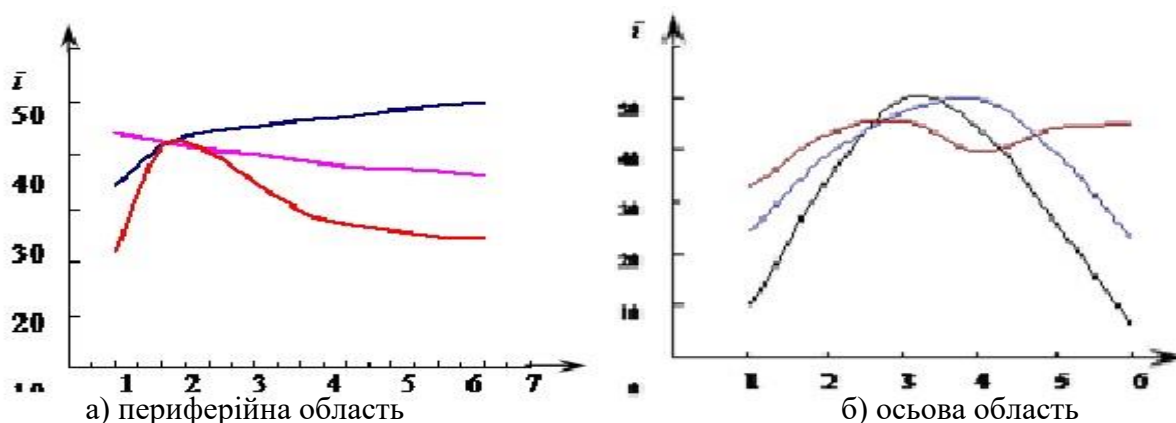


Рис. 3.19 Можливості регулювання розподілу електричного поля в камері прискорення аероіонів [302]

Питання полягало в тому, щоб дізнатися наскільки сформоване в камері установки електричне поле зможе забезпечити аналогічну просторову конфігурацію в камері поля іонів та його переріз в площині мішені-колектора.

Усі дослідження здійснювались на повнорозмірному макеті дослідницької аероіонної установки (рис. 3.20) при різних режимах іонно-оптичної систем (ІОС) генератора та живлення інжектора. Вимірювання проводилися у всьому об'ємі камери установки.

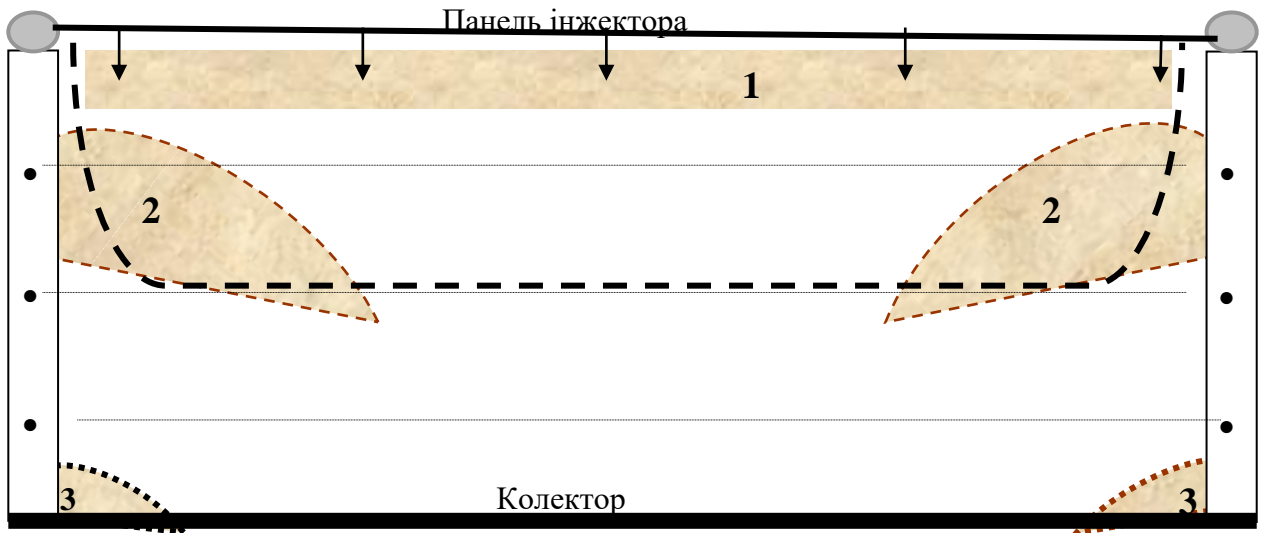


Рис. 3.20 Розподіл інтенсивності іонного поля на колекторі робочої камери в класичній структурі прискорювача прямої дії

Для інформативності результати на рис. 3.19 наводяться в графічній формі та у відносних одиницях для отримання якісної картини роботи структури установки.

Дослідження показали, що в класичній структурі прискорювача прямої дії при роботі в атмосфері рівномірний розподіл і сама вища інтенсивність іонного поля спостерігається лише поблизу коронуючих електродів інжектора (1). Вимірювання в медіанній площині робочої камери установки свідчать про деструкцію пучка. Вона мінімальна (практично дифузна) в центральній області по осі камери і максимальна на периферії (2), хоча інтенсивність суттєво нижча за ці показники в області інжектора. При цьому вимірний потенціал електричного прискорюючого поля в цій площині (штрихова лінія) рівномірний і, згідно теорії, можна очікувати рівномірний потік аероіонів.

На відстані більше 30 сантиметрів від інжектора концентрація іонів суттєво знижена (3), а на поверхню колектора надходить лише дифузний пучок незначної інтенсивності.

Динаміка поля іонів свідчить про сильну деструктивну дію електростатичних ефектів кулонівського розштовхування, особливо помітну при переміщенні пучка в атмосфері через надто малу швидкість іонів та тривалий час їх транспортування до мішені-колектора. Тут також проявляється ефект різкого зниження концентрації іонів в часі через великий переріз їх реакції та рекомбінації на складових атмосфері.

За цей час іони рекомбінують. В осьовій області залишається лише дифузна частина пучка. Основна інтенсивність потоку іонів витискається на границі камери.

Проте на периферії камери концентрація аероіонів при відповідному підборі режиму електричного живлення та розподілу потенціалу між кільцевими фокуруючими електродами, може досягати понад  $10^6$  іон/см<sup>3</sup> і бути придатною для технологічного використання. Однак в такому режимі об'єм камери використовується неефективно, що малопривабливо для промислового впровадження. За таким принципом було створено малогабаритну експериментальну установку (0,5 м<sup>3</sup>) та дослідно-промислову установку з робочим об'ємом близько 1 м<sup>3</sup>. Практичне використання перших технологічних установок ІЯД підтвердили високу ефективність застосування в електрофізичних аероіонізаторах принципів прискорювачів для створення нових аероіонних технологій виготовлення харчових продуктів з риби. Це дало підставу дослідити і розробити конструкції промислової техніки для виробництва з використанням аероіонів.

Для підвищення ефективності запропонованих структур генерації аероіонів і створення промислових електрофізичних іонізаторів великої потужності було поставлено завдання знайти методи формування більш рівномірного поля іонного опромінювання і встановити конструктивні доробки класичної структури прискорювача, щоб отримати поле опромінювання, близьке до зображеного на рис. 3.21.

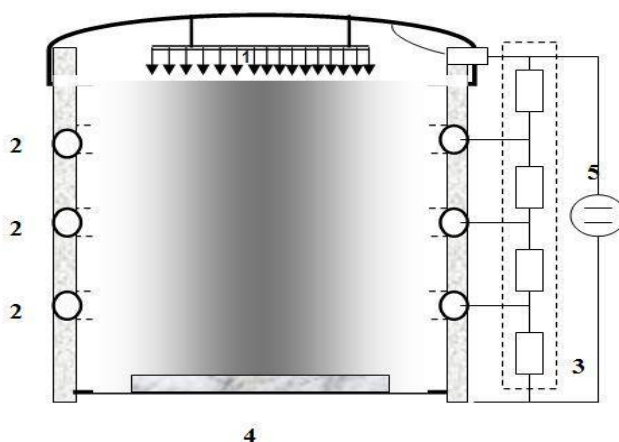


Рис. 3.21 Формування іонного поля в камері установки

З метою запобігання передчасного переміщення іонів на периферію робочого об'єму в потенціальне поле прискорювача було запропоновано ідею введення тангенційної складової, спрямованої до осі пучка.

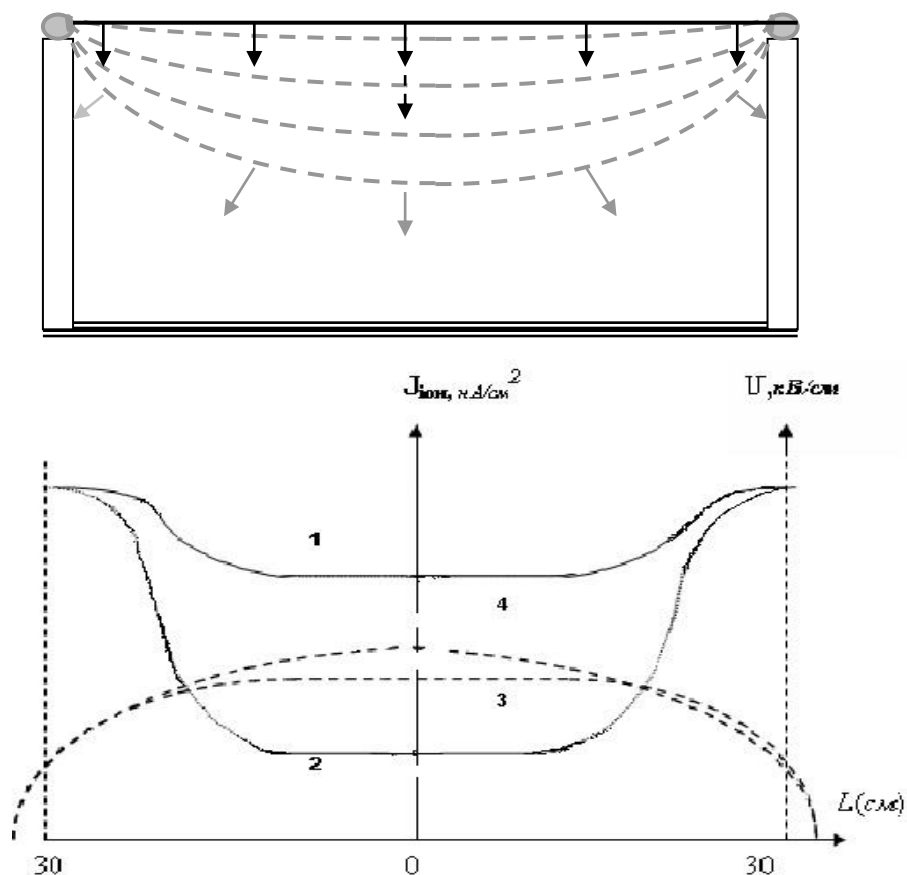


Рис. 3.22 Схема реконструкції експериментальної установки

Для дослідження ефективності такого заходу була здійснена реконструкція установки. Замість стаціонарної плоскої панелі інжектора з коронуючими електродами встановили динамічну гнучку конструкцію, як це показано на схемі рис. 3.22. Вона дала можливість дослідити вплив кривизни електричного поля на динаміку прискорення іонів.

Досліджувалась залежність об'ємної інтенсивності іонного поля при різних величинах тангенційної складової. Це досягалось встановленням різної кривизни гнучкої панелі інжектора. При цьому контролювалась динаміка конфігурації потенціального поля прискорення та іонний струм в різних точках робочого об'єму глибиною 60 см і висотою до 40 см.

Суцільними лініями на графіку зображено розподіл струму іонів по глибині в площині колектора рис. 3.22. Штриховими лініями відображено графік розподілу електричного прискорюючого поля (в площині колектора). Для наочності наведено результати вимірювань в осьовій площині камери прискорення глибиною 60 см в двох крайніх положеннях гнучкої панелі інжектора – рівної і максимально прогнутої.

Графік 2 аналогічний раніше наведеній картині розподілу інтенсивності іонного поля. В центрі – практично дифузний пучок, на периферії – найбільш інтенсивний. Цьому ж випадку відповідає і штриховий графік (3), електричне поле в центрі рівномірне і спадає до периферії.

При максимальній кривизні панелі електричний потенціал (штриховий графік) (4) в центрі зростає, як було передбачено в ідеї вирішення проблеми. А суцільний графік (1) свідчить про значене зростання струму іонів в центральній області камери прискорення (робочої камери установки).

Останнім етапом досліджень було встановлення можливості оптимізації усіх конструктивних елементів і електричних режимів для отримання рівномірного іонного поля, максимально наближеного до наведеного на рис. 3.23. Це було реалізовано на відкритій конструкції лабораторної повнорозмірної установки-стенду, яка дозволяє оптимізувати усі елементи конструкції та допускає гнучку реконфігурацію системи живлення інжектора та електродів, формуючих ІОС. Виявилось, що для різних варіантів конструкції повинно бути знайдено оптимальні конструктивні рішення та електричні режими роботи.

Такий максимум був досягнутий і на відкритій лабораторній установці-стенді. В результаті виміряний розподіл іонного поля показав максимальне наближення до поставленого завдання (рис. 3.23).

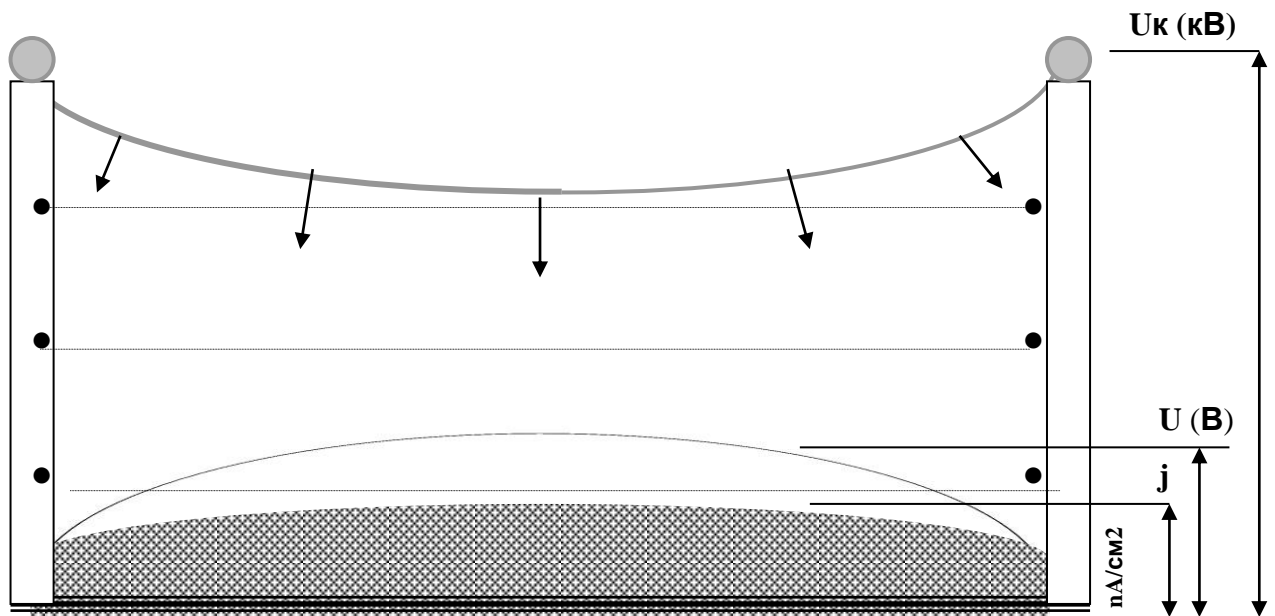


Рис. 3.23 Розподіл іонного поля в оптимізованій конструкції лабораторної установки

Результати вимірювання розподілу іонного поля опромінювання в об'ємі модернізованої структури аероіонізатора на принципах прискорювача прямої дії свідчать, що запропонована методика добре узгоджується з очікуваними результатами. Залучення до конструювання радіаційної техніки з опромінюванням іонами принципів прискорювачів заряджених частинок дозволяє отримувати добре каналізовані потоки аероіонів з чітким спадом на границі робочої камери. А отже, зменшується розсіяння аероіонів поза межами робочої камери, що і було метою та завданням даного дослідження.

За таким принципом в ІЯД було створено повнорозмірну 8-ми камерну установку для аероіонних технологій харчових продуктів (рис. 3.24), яка є базовою технікою радіаційного комплексу ІЯД НАН України і використовується для наукових досліджень, розробки та випробування інноваційних технологій. Установка, разом з іншими опромінювальними установками сектору радіаційних технологій утворює розвинену технічну базу для досліджень новітніх напрямків радіаційних технологій, пов'язаних з використанням заряджених частинок і входять до складу удосконаленого радіаційного комплексу для досліджень і приготування провісної в'яленої риби. В камерах установки створюється концентрація іонів понад  $10^6$  іон/см<sup>3</sup> при потенціалі на інжекторі до 25 кВ.



Рис. 3.24 Повнорозмірний діючий зразок-макет безкорпусної промислової установки для реалізації аероіонних технологій виробництва [96]

Системою допоміжних засобів в лабораторії харчових технологій забезпечуються кліматичні умови, визначені технологічним регламентом. Дослідження електрофізичних характеристик цієї установки показали, що рівномірність щільності аероіонів у робочій камері установки не гірше 10%, а система фокусування забезпечує інтенсивні пучки аероіонів з виразними границями [96, 302].

### **3.4.3 Висновки**

В обсязі виконаних досліджень і розробок створені та випробувані нові методи формування пучків необхідної конфігурації з використанням традиційних електроефлювіальних гольчастних електродів.

Підтвердилась ефективність залучення електрофізичних методів генерації і прискорення іонів.

Встановлено, що таким способом можна виключити фатальний вплив атмосфери на структуру пучків іонів. Виявилось, що хоч і при нижчій ефективності, але для управління пучками іонів низьких енергій в атмосфері можна



використовувати такі ж принципи, що і в типових вакуумних генераторах заряджених частинок.

Підтверджено попереднє припущення, що ефективним способом вирішення складної проблеми – формування рівномірних потоків аероіонів великого перерізу є використання принципів побудови сучасної електрофізичної техніки – прискорювачів заряджених частинок прямої дії.

Встановлено, що для можливості формування в робочій камері об'ємного іонного поля опромінювання при проектуванні електрофізичних установок слід керуватися принципами конструювання прискорювачів заряджених частинок прямої дії, але з додатковим включенням в структуру інжектора установки елементів корекції форми прискорюючого електричного поля в об'ємі робочих камер.

Отримана інформація, важлива для подальшого впровадження новітніх радіаційних технологій з іонами низьких енергій, насамперед, для розробки сучасної техніки та засобів контролю якості в нових промислових процесах.

Макети розроблених технічних засобів генерації іонів атмосферних газів впроваджено в практику досліджень ІЯД і використовуються для пошуків шляхів прогресу сучасних радіаційних технологій

### **3.5 Дослідження методів конструювання технічних засобів детектування та отримання інформації про параметри заряджених частинок низької енергії**

Дослідження здійснено з метою отримання практичних результатів для створення техніки вимірювання параметрів аероіонів. Завданням є дослідження принципів конструювання та розробки і випробування оптимальних конструкцій технічних засобів метрології іонів атмосферних газів, що використовуються в реальному промисловому виробництві.

Актуальність роботи обумовлена створенням низки ефективних і прогресивних технологій виробництва, впровадження яких дозволяє вирішувати актуальні завдання економічного розвитку.

Поряд з ґрунтовними проробками численних проблем метрології іонізуючих випромінювань в галузі ядерної фізики, надто мало опрацьовані проблеми метрології низькоенергетичних заряджених частинок в атмосфері. Хоча останні часто використовуються в промислових технологіях як ефективний інструмент досягнення технічних результатів.

В даному розділі наведено результати розробки конструкцій технічних засобів для метрології в енергоощадних технологічних процесах з іонами низьких та наднизьких енергій – основи сучасних перспективних напрямків розвитку виробництва, насамперед, високоякісних харчових продуктів.

### **3.5.1 Метрологія іонізуючих частинок низької енергії**

Попередній аналіз стану засобів метрології заряджених частинок свідчить про відсутність промислових метрологічних засобів для більшості промислових технологій з атмосферними зарядженими частинками низьких енергій. Проблема в тому, що такі технології здійснюються на відкритому повітрі (в атмосфері), а традиційні засоби ядерної фізики для цього не придатні, оскільки розраховані на роботу в умовах вакууму.

Аероіони мають складну природу. Вони утворюються в результаті іонізації атмосфери будь-яким способом. Іонізація реальної атмосфери призводить до утворення низки хімічно й електрично активних продуктів – іонів різних газів, різного заряду, маси, енергії, окислів. Усі ці процеси відбуваються одночасно в одному об'ємі реакційної камери технологічних установок. Тому отримати детальну інформацію простими і звичними методами неможливо, через взаємні перешкоди між різними фракціями (складовими) іонізаційного процесу.

Для визначення оптимального напрямку досліджень попередньо досліджувались найбільш поширені аероіонні технології. За їх результатами визначено перелік параметрів, які характеризують якість процесів виробництва.

На рис. 3.25 наведено схему технологічної установки (лінії виробництва), яку прийнято за основу для визначення переліку параметрів, що їх необхідно

контролювати і на які повинна бути орієнтована розробка методів і конструкцій технічних засобів для метрології таких виробничих процесів. Це найбільш поширена схема застосування аероіонів для виробництва в'ялено-сушеної харчової продукції.

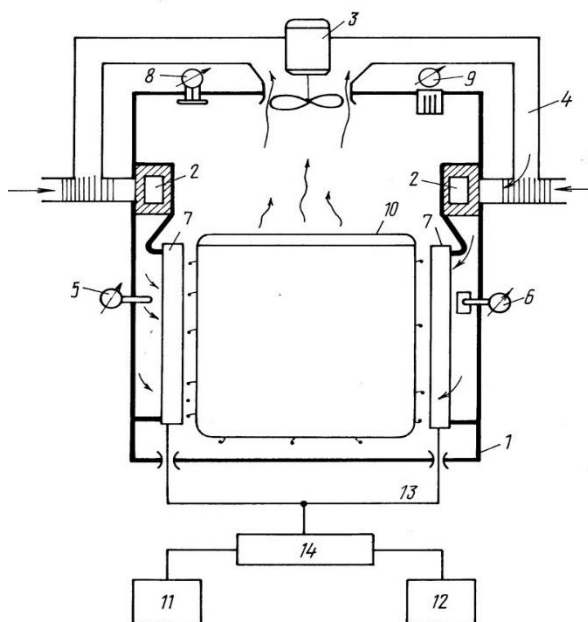


Рис. 3.25 Схема універсальної технологічної установки для аероіонних технологій в'ялено-сушеної харчової продукції

Установка побудована на електрофізичному генераторі аероіонів коронуючими (ефлювіальними) електродами, що живляться від джерела високої напруги. Від ізотопних установок електрофізичні відрізняються наявністю ще одного фактору – електричного поля високої напруги. Тому технологічний процес модифікації органіки в іонізованій атмосфері відбувається з одночасною дією заряджених частинок і електростатичних сил (вектору електричного поля).

Необхідна концентрація іонів в атмосфері реакційної камери формується за допомогою панельних електророзрядних іонізаторів з коронуючими електродами (7). Їх живлення здійснюється від системи високовольтних джерел напруги 50 кВ (11, 12, 14) через систему кабельних комунікацій (13).

Для забезпечення циркуляції повітря в робочому об'ємі камери та подачі свіжого повітря через двоступеневі фільтри (2) очистки від важких включень передбачена система спеціальної вентиляції утворена вентилятором (3) з мережею повітропроводів (4). На вході системи встановлено зовнішній фільтр грубої очистки та аероіонний електрофільтр тонкої очистки. Останній фільтрує усе повітря та

звільняє його від пилу, молекул води та інших мікрочастинок для запобігання утворення важких іонів.

Метрологія установки складається з вимірювачів потенціалу живлення панелей електророзрядного іонізатора (4, 5), вимірювачів температури повітря на вході іонізатора (6), вимірювачів концентрації іонів в камері установки (9), вимірювачів температури повітря в камері (8). Сировина в реакційній камері обробляється негативними і позитивними аероіонами з концентрацією  $1 \cdot 10^7 - 10 \cdot 10^7$  іон/см<sup>3</sup>. Температура і вологість не регулюються. Для прискорення і стабілізації технологічного процесу прийнято здійснювати його при вологості зовнішнього повітря не більше 70%.

В цьому варіанті технологічної установки потрібно враховувати широкий перелік параметрів, що характеризують даний технологічний процес – вологість повітря в каналі витяжної вентиляції, температура середовища в реакційній камері установки, склад іонів усіх знаків, склад свіжого повітря на вході у вентиляційну систему установки.

З рисунку видно, що для метрології аероіонних технологічних процесів необхідно щонайменше контролювати:

- іонний склад повітря в реакційній камері;
- струм іонів на одиницю поверхні;
- напругу на коронуючих електродах (кондукторі);
- інколи, як допоміжні параметри – температуру та вологість зовнішнього повітря (в цеху виробництва).

Температура, вологість, швидкість потоку повітря тощо контролюються на підприємствах типовими промисловими засобами метрології. А усі інші вимагають створення спеціальних конструкцій технічних засобів, узгоджених з конструкцією конкретної технологічної установки.

Через неможливість контролю іонного складу повітря промисловими засобами (через їх відсутність), першочергову увагу було приділено розробці методики та техніки для таких вимірювань.

Метрологія аероіонів є окремим класом метрологічних вимірювань, для яких необхідно створювати спеціалізовані прилади для вимірювання параметрів заряджених частинок наднизької енергії. Вони вирішують проблеми контролю зарядового складу атмосфери, водних і газових середовищ. Такі прилади мають різну конструкцію і базуються на принципах осідання зарядів на металевому зонді, розміщеному в середовищі. Такі прямі вимірювання є найбільш простими і доступними, але похибка вимірювань сягає 50-100%. Для підвищення точності доводиться застосовувати складні структури чутливих елементів і електроніки для обробки інформації.

Було передбачено разом з технічними засобами генерації іонів, розробити структуру і здійснити моделювання спеціального приладу для вимірювання інтенсивності та складу іонів (аероіонів) у повітрі.

### **3.5.2 Методика вимірювань**

Завданням для проектування є методика вимірювань іонного складу повітря та щільності потоку іонів. Ідея методу дослідження складу іонно-повітряної суміші полягає у використанні електростатичного методу контролю зарядового складу цієї суміші. Спрощена схема показана на рис. 3.26. Аналіз зарядового складу іонів в атмосфері здійснюється поперечним електричним полем при проходженні через камеру зі стандартною швидкістю за рахунок механічного спонукання їх до руху вентилятором. [302]

Основою датчика зарядового складу є аналізуючий конденсатор, утворений двома пластинами (1, 2), на які подається потенціал від джерела високої напруги (3). Вентилятором (6) в цей конденсатор подається атмосферне повітря (5), насичене різними зарядами (9). Рухаючись в складі атмосфери в конденсаторі заряджені частинки (аеріони) відхиляються в електричному полі аналізуючого конденсатора у відповідності до їх заряду і маси. Більш легкі та з більшим зарядом частинки першими досягають ламелів-сенсорів зарядів (4), а важкі рухаються довше і проходять більшу відстань, осідаючи на віддалених ламелях (4).

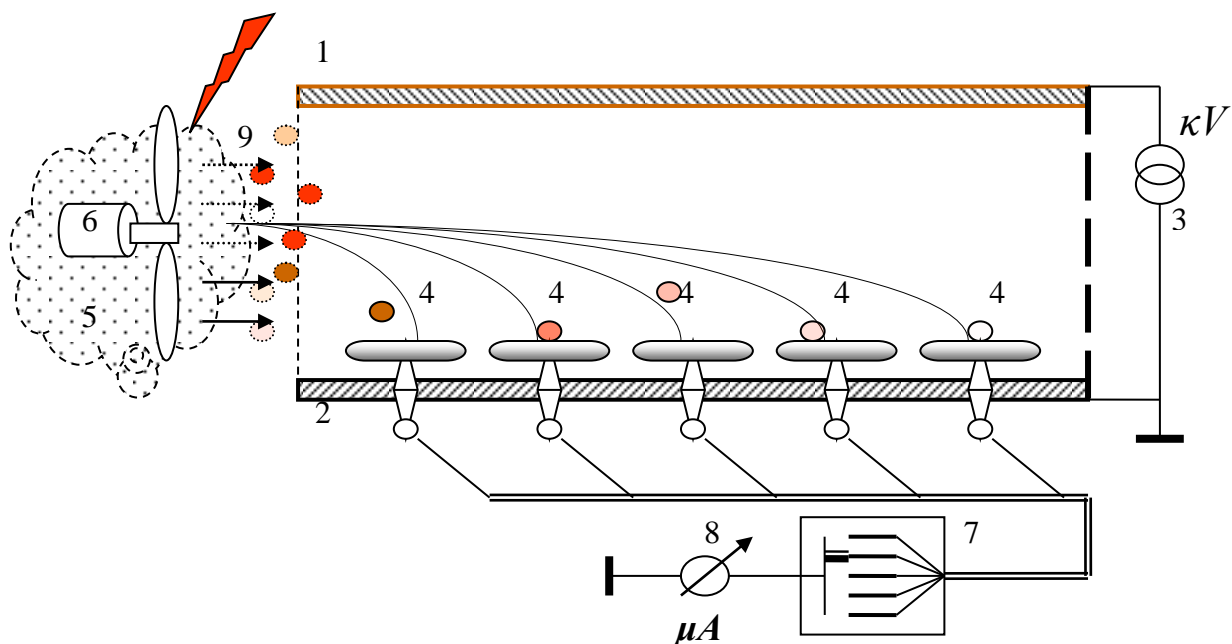


Рис. 3.26 Схема методики вимірювання іонного складу атмосфери (спектру аероіонів)

В результаті на системі сенсорів (4) осідають заряди, кількість яких відповідає розподілу вхідної суміші аероіонів (9) по масах і зарядності. Візуалізацію отриманої інформації далі здійснюють вимірювальним приладом (8), підключеним до сенсорів за допомогою комутатора (7).

Фактично запропоновано схему зарядового іонного спектрометра для аналізу складу повітря в місці контролю. Особливістю конструкції є набір електронних схем (рис. 3.27) попередньої обробки сигналів, які поступають з чутливих елементів – сенсорів спектрометра (4).

При розробці таких схем найбільші труднощі виникають при проектуванні каскадів прийому і попередньої обробки аналогових сигналів малої величини з чутливих елементів (4). З урахуванням технологічно обумовлених концентрацій іонів в атмосфері реакційних камер аероіонних установок, їх струм в будь-якій області реакційної камери не перевищує  $1-2 \text{ нА} \cdot \text{см}^2$ . А враховуючи, що даний спектрометр фактично повинен бути «прозорим» і вилучати з потоку лише невелику частину іонів, то сигнали на електродах (4) мають дуже низькі значення. Тому для їх прийому необхідно застосовувати ефективні схеми підсилення і обробки (інтегрування, диференціювання). На рис. 3.27 наведено схему одного з каналів

прийому сигналу. Їх кількість може бути різною, в залежності від вимог точності і дискретності вимірювань. Точність забезпечується в схемі попереднього підсилення, дискретність - в конструкції (кількості і розташуванні сигнальних електронів).

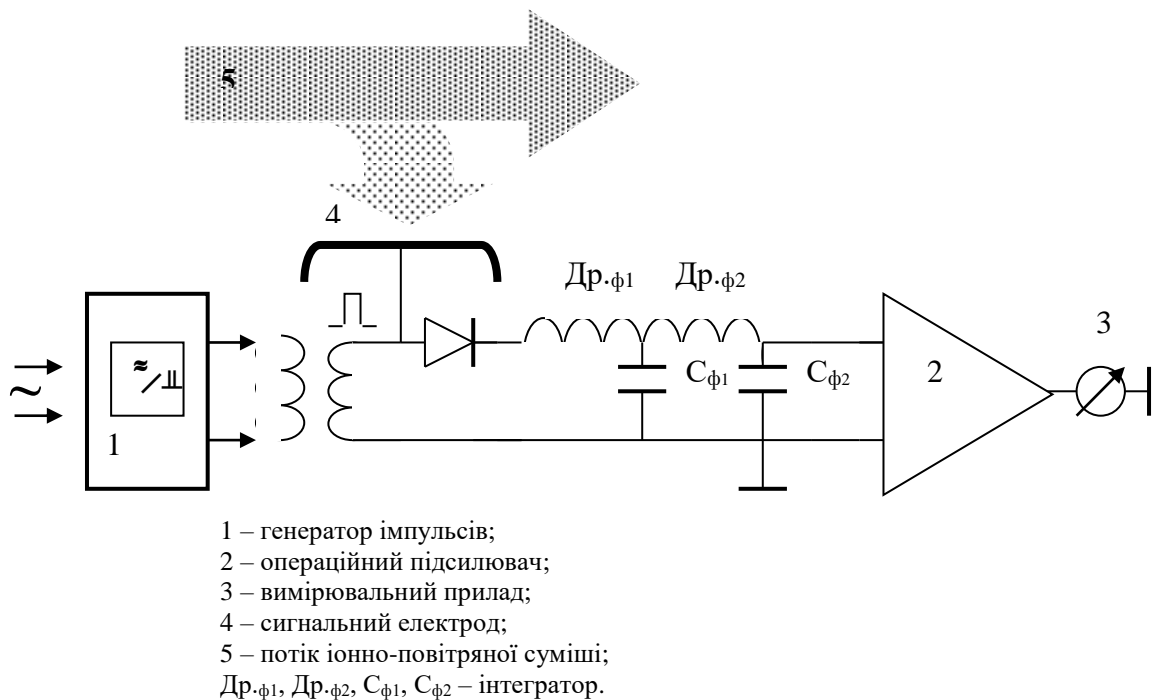


Рис. 3.27 Схема одного з каналів прийому і попередньої обробки сигналу від сенсорів

Для подолання першої проблеми, методикою вимірювання передбачається імпульсне живлення сигнального електроду і отримання аналогового сигналу імпульсної форми. Це зменшує вплив температурних дрейфів і шумів перших каскадів підсилення. При обробці цього сигналу спочатку здійснюється інтегрування сигналів першим інтегральним контуром, встановленим безпосередньо на вході підсилювача (інтегрування реактивними елементами). Другий контур інтегрування є складовою наступних електронних каскадів в ланцюгах корекції їх амплітудно-частотних характеристик (АЧХ) в контурах зворотного зв'язку. Третій рівень інтегрування здійснюється вже на виході підсилювача. В залежності від потреб використання, це може бути магнітно-електричний прилад з постійною інтегрування 2-20 секунд або стандартні перетворювачі амплітуда-частота з регульованою величиною інтегрування.

На рис. 3.27 умовно показано комутацію (7) вихідного сигналу на єдиний контрольний прилад. Це найпростіша схема. Насправді для ефективної метрології кількість таких каналів повинна бути не менше 4.

Для реалізації високоточної методики іонної спектроскопії, передбачається використання комп'ютеризованої системи автоматизації вимірювань серії PC-lab (рис. 3.28), яка надає можливість програмним шляхом формувати спектральну характеристику іонного складу повітря на екрані монітора.

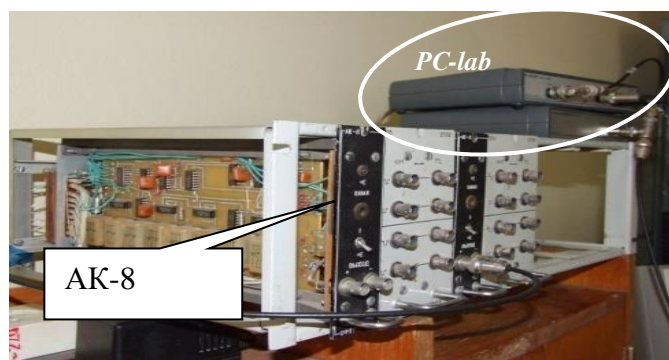


Рис. 3.28 Апаратура в стандарті PC-lab для агрегування вимірювальних засобів on-line з комп'ютерами типу PC-lab

Зліва – крейт електроніки узгодження з каналом ЕОМ прецизійних комутаторів малих аналогових сигналів АК-8, розроблених для підключення в систему вимірювань датчиків (4 - сенсорів) сигналів малої величини (одиниці мікровольт).

### 3.5.3 Розробка конструкції іонного спектрометра

Розробка конструкції спектрометра проводилась з урахуванням типових вимог промислової апаратури, а саме – максимальна простота, орієнтація на елементи вітчизняного виробництва, технологічна доступність повторення, максимальне використання добре досліджених схемних рішень.

Для сенсорної системи спектрометра вибрана циліндрична форма корпусу з ізолюючого матеріалу (рис. 3.29) з високими діелектричними показниками (капролон і тефлон). В корпусі розміщено вентилятор нагнітання повітря (6)



(рис. 3.26) у вимірювальну камеру спектрометра (1). На внутрішніх стінках корпусу закріплено сигнальні електроди (сенсори 4).

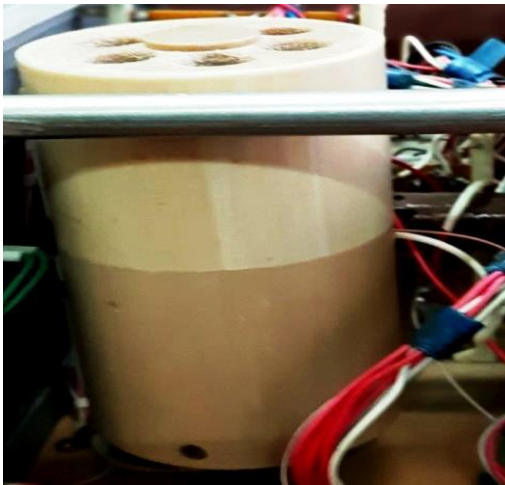


Рис. 3.29 Повно розмірний макет конструкції іонного спектрометра

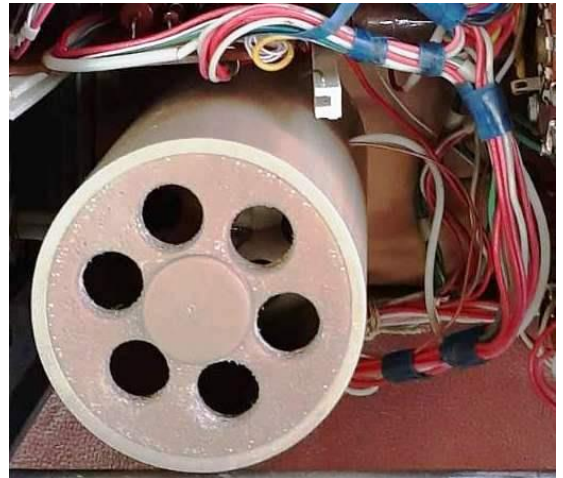


Рис. 3.30 Монтаж спектрометричного вузла в корпусі приладу. Справа – плата з електронікою

Повітря забирається через верхню кришку корпусу і видаляється через нижній отвір каркаса приладу. Схема прийому і обробки реалізована на інтегральних мікросхемах з мінімальними вхідними струмами і високим вхідним опором. Усі електронні компоненти змонтовані на платі та встановлені на мінімальній відстані від корпусу спектрометра, як це показано на фото рис. 3.30.

### 3.5.4 Розробка конструкції датчика щільності струму аероіонів

Для промислових аероіонних технологій визначальним параметром є показник ефективності передачі енергії до матеріалу (сировини). В даних процесах енергія передається у вигляді зарядів, а щільність потоку енергії визначається шляхом вимірювання струму іонів на одиницю площі. Через надто малу швидкість низькоенергетичних іонів залучити звичні в ядерній і радіаційній фізиці методи неможливо. Але можна скористатися найпростішим методом, т.зв. методом «п'ятака» – вимірювання струму (в мкА) з металевого електроду відомого перерізу (в см<sup>2</sup>).

Для використання на типовій техніці для аероіонних технологій розроблено просту конструкцію датчика, наведену на рис. 3.31.

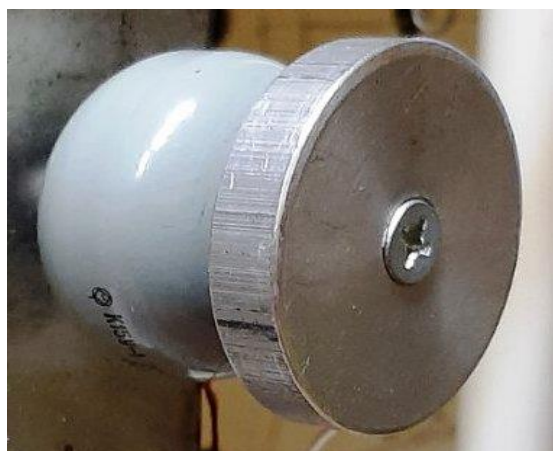
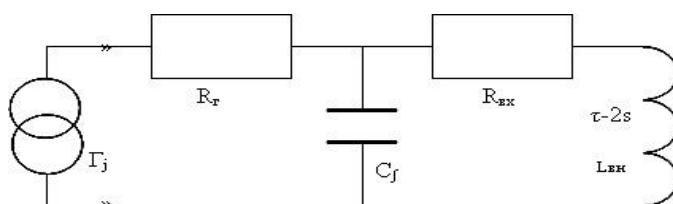


Рис. 3.31 Конструкція датчика струму



$\Gamma_j$  – генератор струму;  
 $R_r$  – внутрішній опір генератора;  
 $C_j$  – інтегруюча ємність;  
 $R_{вх}$  – вхідний опір приладу;  
 $L_{вн}$  – індуктивність приладу;  
 $\tau$ (s) – постійна часу інтегрування.

Рис. 3.32 Еквівалентна схема заміщення.

На рис. 3.32 зображено еквівалентну схему цього пристрою, яка дозволяє наочно визначати напрямки конструювання таких засобів для отримання необхідних метрологічних показників.

АЧХ приладу ( $\tau$ ) необхідні для конкретного використання (установки) забезпечується відповідним підбором параметрів  $C_j$  та  $L_{вн}$ .

Такі датчики були поширені в ядерній та радіаційній фізиці, коли для реалізації поставлених цілей було достатньо точності 20%. З часом метрологічні вимоги зросли і ці прості датчики було замінено на більш точні, наприклад, циліндри Фарадея та ін.

В реальних технологічних процесах з іонізованою атмосферою виробники та дослідники часто використовують, як контрольний параметр, величину концентрації іонів в одиниці об'єму. З використанням «п'ятака» цей показник визначається по відношенню струму з електроду до його перерізу.

Описаний прилад має блочну конструкцію і складається з чутливого елемента (сигнального електроду з елементами узгодження) та блоку вимірювання, в найпростішому випадку стандартний промисловий вимірювач постійного чи імпульсного струму. В залежності від конструкції технологічної аероіонної

установки, для датчика використовують різні варіанти вузлів його кріплення. Сенсор може закріплюватися стаціонарно, або як мобільний прилад для вимірювання технічних параметрів іонних полів (розподілу інтенсивності іонів в об'ємі реакційної камери). На рис. 3.33 показано варіант мобільного кріплення сенсора, з використанням стандартного промислового вимірювального приладу.

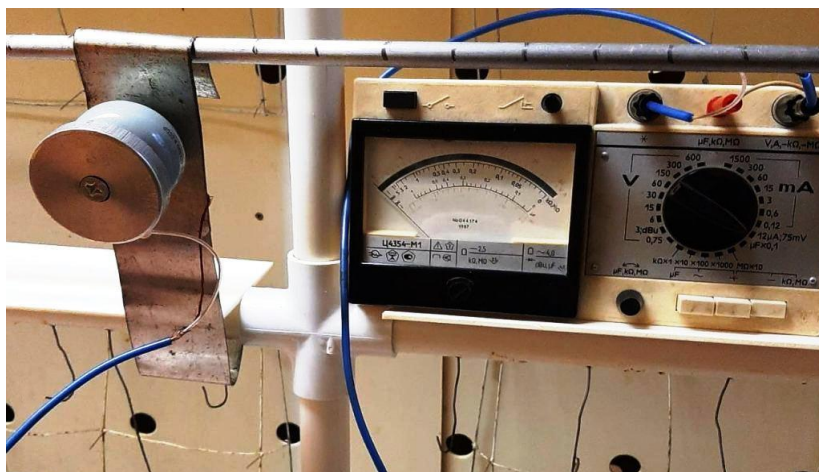


Рис. 3.33 Варіант мобільної конструкції приладу для вимірювання інтенсивності потоку іонів в будь-якій точці робочої камери електрофізичної аероіонної установки, контролю та формування необхідної конфігурації іонного поля опромінювання

Сенсор, закріплений на пластині, має можливість переміщуватися по елементах конструкції установки в горизонтальній площині поперек поля опромінювання. Похибка вимірювань відповідає технологічним вимогам і знаходиться в межах 10%. За звичай, такі вимірювання здійснюються в «чистій» камері установки, бо завантаження її матеріалом призводить до зміни розподілу потоків іонів. Цей процес саморегульований і залежить від динаміки модифікації опромінюваного матеріалу.

### 3.5.5 Висновки

Досліджена проблема метрології заряджених частинок низької та наднизької енергії, актуальна з огляду широкого розповсюдження заряджених частинок у науці, на виробництві, у медицині та екології. Визначено перспективні шляхи метрології пучків аероіонів. Здійснено моделювання різних конструкцій техніки для метрології.

Експериментально досліджено характеристики розроблених конструкцій при метрології складових радіаційних технологій на моделях промислових процесів з низькоенергетичними іонами атмосферних газів.

Розроблено методику та технічні рішення на засоби для вимірювання параметрів заряджених частинок низької та наднизької енергії для наукових і прикладних досліджень на експериментальних установках сектору радіаційних технологій ВСЯ. Розроблено конструкції технічних засобів для контролю спектральних характеристик іонних полів в атмосфері реакційних камер аероіонних установок.

Макети розроблених технічних засобів для оперативного вимірювання інтенсивності потоків заряджених частинок та їх спектральних характеристик впроваджено в практику досліджень ІЯД і використовуються для пошуків шляхів прогресу сучасних радіаційних технологій

Результати досліджень суттєво розширюють знання про особливості метрології іонів низької та наднизької енергії та їх характеристики. Їх використовують для розробки інноваційних радіаційних технологій з іонами низьких енергій та для розробки сучасної техніки і засобів контролю якості в нових промислових процесах з використанням іонізуючих випромінювань.

### **3.6 Висновок**

1. Досліджено фундаментальні процеси формування та руху в атмосфері інтенсивних потоків заряджених частинок низької та наднизької енергії. З аналізу літературних джерел встановлено, що найбільш поширеними є електрофізичні та ізотопні джерела атмосферних іонів низьких енергій. Встановлено механізми утворення іонів, що лежать в основі електрофізичних джерел. Досліджено особливості електрофізичних процесів.

2. Досліджено особливості процесів електроактивації атмосферних газів в електричному розряді, які визначають ефективність іонізації та динаміку потоків атмосферних іонів низьких і наднизьких енергій.

3. Показано, що електророзрядні електрофізичні генератори іонів атмосферних газів можуть бути описані чіткою системою рівнянь усіх етапів електроактивації атмосфери.

4. Показано, що для електрофізичних іонізаторів практично не існує межі потужності. Електрофізичні установки дозволяють формувати потоки іонів зі щільністю, що необхідна для отримання відгуку кількість-якість.

4. В експериментах показано, що для потреб виробництва необхідно використовувати поля іонів з концентраціями більше  $10 \cdot 10^7$  іон/см<sup>3</sup>. Лише при такій концентрації розпочинають відчуватися ефекти дії цих заряджених частинок на структуру матеріалів, впливати на хід хімічних процесів в біомасах.

При високих концентраціях полів іонного опромінювання розпочинаються процеси, які близькі до вже вивчених процесів модифікації матерії під впливом іонізуючої радіації (структуро-механічні біохімічні, хімічні та ін.) та є основою технологій виробництва.

5. Експериментально підтверджена справедливність висновку про подібність фізичних принципів генерації, формування і транспортування в атмосфері концентрованих іонних полів базових положень теорії пучків заряджених частинок і прискорювальної техніки. Для розрахунку конструкції іонізуючих вузлів (емітерів заряджених частинок та вузлів їх інжекції) можна користуватися добре опрацьованим апаратом аналізу принципів генерації і транспортування високо енергетичних заряджених частинок.

6. Експериментально встановлено, що не дивлячись на очікуваний фатальний вплив щільної атмосфери на динаміку руху заряджених частинок, хоча і при нижчій ефективності, але рух іонів низьких енергій в атмосфері підкоряється таким же законам, що і в типових вакуумних генераторах заряджених частинок високих енергій.

Моделювання на стендах ефективності електростатичного фокусування пучків в різних варіантах конструкцій аероіонних установок підтверджена, що свідчить про те, що фактор подібності можна використовувати для реальних конструкторських розробок потужних технологічних установок для різних галузей промисловості. Це

підтверджується досвідом створення лабораторних зразків техніки та дослідно-промисловими випробуваннями на виробництві.

6. Показано, що використання принципів побудови прискорювачів прямої дії при конструюванні аероіонних установок суттєво розширяє енергетичні можливості нової техніки. Такі установки більш потужні, а собівартість їх роботи різко зменшується – для більшості установок іонної обробки високоінтенсивними пучками досить електричної потужності усього 1 Вт·год/кг обробленої продукції. Лабораторні стендові випробування моделей різних конструкцій електророзрядних іонних генераторів підтвердили ідею про ефективність залучення до конструкцій аероіонізаторів принципів побудови вакуумних прискорювачів заряджених частинок. Сформульовано перелік параметрів, що визначають ефективність такого процесу генерації і прискорення.

7. Виявлені безумовні переваги електрофізичної техніки для формування високоінтенсивних іонних полів опромінювання. Випробувано на повномасштабних макетах різні конструкції проблемно орієнтованих технічних засобів генерування і контролю аероіонів в наукових дослідженнях та технологічних процесах. Розроблено заходи подолання сумнівів щодо застосування положень вакуумних прискорювачів до установок генерації іонів, в яких отримання пучка і його транспортування до об'єктів опромінення необхідно здійснювати на повітрі при звичайному атмосферному тиску. В розроблених за цими принципами конструкціях генеруючих вузлів (емітерів заряджених частинок електроаероіонізаторів), розрахованих за принципами прискорювачів, отримано очікувані результати.

Практичні результати досліджень і розробок узагальнено на рис. 3.34. На основі створених технічних засобів генерації і вимірювань параметрів іонів атмосферних газів, сформувалась і експлуатується спеціалізована дослідницька лабораторія для експериментів з опромінювання органічних систем іонами газів низьких та наднизьких енергій, де можна відтворювати і вивчати комплексну дію механізмів взаємодії аероіонів з матерією.

## Практичні результати



Рис. 3.34 Практичні результати

Для розширення можливостей досліджень радіаційних технологій створено і доукомплектовано радіаційний комплекс ІЯД новими типами експериментальної техніки – генераторами іонів атмосферного газу та відповідною системою контролю технічних характеристик цього експериментального обладнання та конфігурації і параметрів полів опромінювання. В результаті утворено багатоцільовий технічний комплекс, радіаційних досліджень, структура якого наведена на рис. 3.35.



Рис. 3.35 Формування радіаційного технічного комплексу для наукових і прикладних досліджень з розширеним асортиментом заряджених частинок

Вирішено завдання щодо удосконалення радіаційної техніки ІЯД з метою широкого використання в інноваційних розробках технологій використання іонізуючих випромінювань для вирішення актуальних наукових і економічних проблем. В обсязі цих робіт вирішено низку проблем удосконалення технічних засобів і установок (рис. 3.36). Отримані результати відповідають вимогам, що були встановлені при постановці завдання.

### ТЕХНІЧНІ РЕЗУЛЬТАТИ

1. Здійснена модернізація обладнання радіаційної установки з прискорювачем 4 МеВ.
2. Створена спеціалізована технологічна лінія, для опромінення промислових виробів значних габаритів і ваги.
3. Створено комплекс засобів технологічної дозиметрії процесу радіаційної модифікації процесу радіаційної модифікації промислових матеріалів.
4. Розроблена методика та засоби рівномірного опромінення великих зразків промислових виробів.
5. Створено обладнання для технологічного опромінення іонами атмосферних газів.
6. Створено багатоцільовий технічний комплекс для досліджень та технологічних розробок.

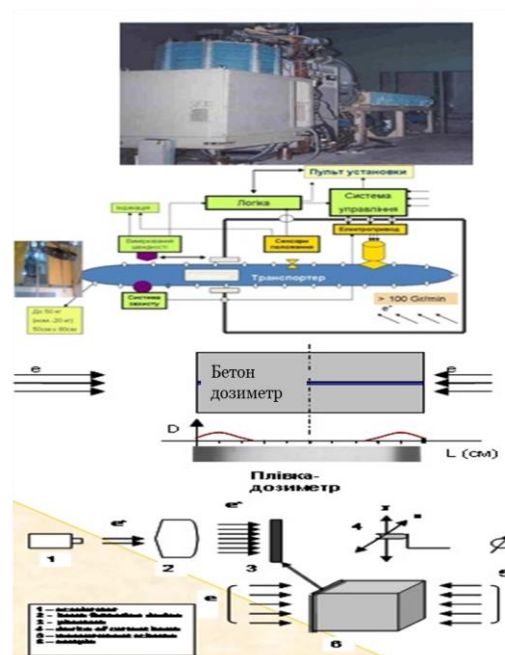


Рис. 3.36 Технічні результати досліджень і розробок

В результаті технічної модернізації дослідницької техніки ІЯД, описаної в розділі 3 отримано можливість її широкого використання для комплексних прикладних досліджень і розробок в обсязі Державних і міжнародних програм економічного розвитку. За своїми технічними можливостями обробки іонізуючими випромінюваннями та метрологією цих процесів комплекс дозволяє виконувати значний перелік актуальних досліджень:

- Досліджувати взаємодію випромінювань низьких енергій з матеріалами;
- Досліджувати принципи конструювання радіаційної техніки для промисловості;
- Досліджувати актуальні напрямки розвитку харчових технологій;
- Розробляти радіаційні методи випробувань критичного обладнання АЕС;
- Досліджувати технології наноматеріалів для промисловості та медицини;
- Досліджувати ядерні та радіаційні методи в технологіях матеріалів для індустрії;
- Досліджувати перспективні шляхи розвитку радіаційних технологій.



## **РОЗДІЛ 4 ДОСЛІДЖЕННЯ ПЕРСПЕКТИВНИХ НАПРЯМКІВ СТРУКТУРНОГО РОЗВИТКУ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЇ БАЗИ ПРИКЛАДНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ**

### **4.1 Імітатори як перспективний напрямок створення техніки для прикладних досліджень з використанням ядерної енергії**

В критичних галузях виробництва, пов'язаних з можливостями нанесення особливої шкоди суспільству і довкіллю, традиційно галузеві (матеріалознавчі) дослідження на кінцевих етапах Програм розвитку (реалізації проектів) прийнято піддавати спеціальним методикам досліджень. Їхньою метою є встановлення фактичної можливості функціонування виробу за місцем призначення (екстремальними умовами експлуатації). Так прийнято в авіації, космонавтиці, військовій галузі. Такі випробування мають назву функціональні випробування. В цих дослідженнях здійснюється перевірка стабільності функцій об'єктів в стаціонарних, перехідних і критичних (аварійних) режимах. На таких установках передбачено численні складні технічні засоби формування різних фізичних і хімічних несприятливих факторів. З використанням радіації, об'єм такого обладнання може бути суттєво меншим, бо радіація має унікальні властивості одночасно генерувати різні фактори дії – хімічні, електричні, температурні, радіаційні, про що вже йшла мова в попередніх розділах. В усіх випадках прийнято говорити про застосування імітаторів – складних технічних комплексів, розрахованих на випробування придатності обладнання (виробів), важливих для надійності експлуатації промислових об'єктів критичної інфраструктури.

За своїм складом імітатори є представниками високих технологій. Вони характеризуються великою вартістю, вимагають вкладення великих ресурсів при спорудженні та експлуатації, а тому створюються виключно для загальногалузевого (державного) користування.

В даному розділі розглядаються лише імітатори, де головним інструментом випробувань є радіація – іонізуючі випромінювання різного виду. Їх прийнято називати радіаційними функціональними випробуваннями [281].

*Стан проблеми.* Одним з показових прикладів імітаторів можна вважати проект ФТІНТ НАН України та СКТБ з ДВ ІЯД НАН України (рис. 4.1).



Рис. 4.1 Імітатор умов космосу з залучення іонізуючих випромінювань  
На фото – група творців імітатора – співробітники галузевих НДІ НАН України

Вказаний імітатор був основою випробувань космічної галузі СРСР і забезпечував функціональні випробування обладнання та елементів космічної техніки при низьких температурах, космічному вакуумі та потоків заряджених частинок. Для цього в його складі передбачено генератори електронів і протонів, основного іонізуючого випромінювання в космічному просторі. На даний час стан цього комплексу невідомий через втрату суспільством зацікавленості в продовженні космічних досліджень.

Перші роботи по створенню імітаторів в ІЯД відносяться до 90-х років і були спрямовані на здійснення нових технологій випробувань – радіаційних функціональних випробувань критичного обладнання АЕС. В основі розробки комплексу використання потужного прискорювача електронів середньою енергією 4-5 МеВ. Були розроблені методики адаптації під такі дослідження [281] та конструкції спеціалізованих технічних засобів для здійснення і метрології функціональних випробувань [154].

На даний час радіаційна установка задумана для харчових технологій [91, 246] модернізована і реконструйована в технічний комплекс (рис. 4.2) для розробки і здійснення інноваційних технологій використання іонізуючих випромінювань для різних галузей промислового виробництва.

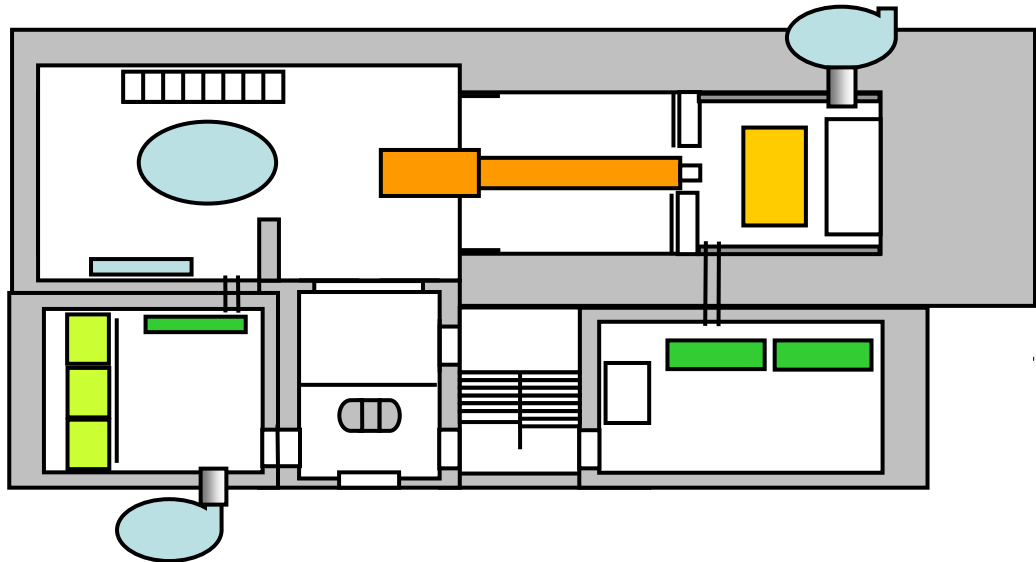


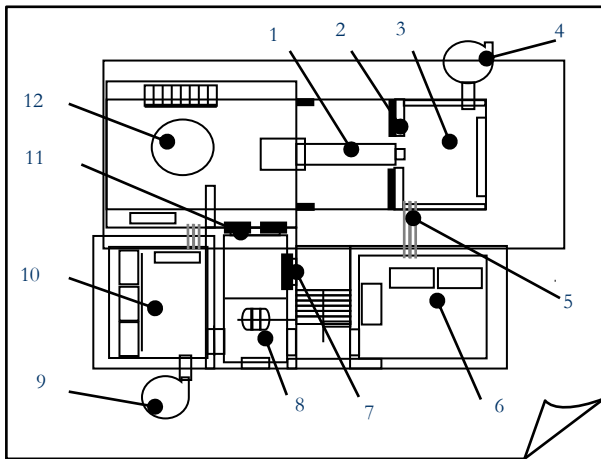
Рис. 4.2 Компонівка модернізованого дослідницького радіаційного комплексу на базі електрофізичного джерела електронів 4 MeV

А для здійснення функціональних випробувань на установці облаштована реакційна камера великого об'єму (рис. 4.3).



Рис. 4.3 Збільшений об'єм технологічного приміщення

На момент дослідження установка відповідає більшості вимог до техніки кваліфікації критичного обладнання АЕС, які наведені на рис. 4.4.



- 1 – електрофізичне джерело випромінювання;
- 2 – внутрішні двері реакційної камери;
- 3 – реакційна камера установки;
- 4, 9 – приточно-витяжна вентиляція;
- 5 – проходки сигнальних та силових мереж;
- 6 – зал підготовки та контролю експериментів;
- 7 – входні двері в бокс;
- 8 – лабіринт транспортної лінії;
- 10 – пульт управління;
- 11 – дисциплінуючий бар'єр;
- 12 – резервуар охолодження.

| Умови випробувань                                      | Нормативні вимоги                              | Параметри установки  |
|--|--|--|
| об'єм реакційної камери                                | близько 10 м <sup>3</sup>                      | понад 20 м <sup>3</sup>  |
| потужність радіаційної дози                            | до 1·10 <sup>3</sup> Гр/год.                   | від 0,1 Гр/год. до 14,4·10 <sup>6</sup> Гр/год.                          |
| параметри радіаційних полів                            | Змішані 4 МеВ (β-, γ- та нейтронна компоненти) | 4 МеВ (β- та γ- компоненти) відповідають вимогам стандарту IEEE 323-2003 |
| величина фронтального перерізу опромінюваного простору | до 1 м <sup>2</sup>                            | до 80 × 80 × 120 см <sup>3</sup>   |
| контроль процесів опромінювання                        | до 8 %   | безперервний багатопараметровий  |
| дозиметрія опромінювання                               | до 8 %   | електронна система радіаційних вимірювань: точність 5%                   |
| час опромінювання                                      | від 100 до 1000 годин                          | до 1000 годин безперервної роботи  |
| нестабільність опромінювання                           | до 8 %   | дрейф параметрів: до 5 %   |

Рис. 4.4 Структура і параметри радіаційного комплексу для функціональних випробувань електротехнічного обладнання гермозон реакторів, критичного для надійності роботи АЕС

Створення цього комплексу було спрямоване на вирішення актуальних задач надійності АЕС згідно міжнародних і національних НТД, щодо збільшення надійності експлуатації об'єктів атомної енергетики і вирішення проблеми подовження термінів їх експлуатації. Першочерговими цілями було визначено кваліфікацію електротехнічного обладнання АЕС, критичного для надійності експлуатації ядерних енергетичних реакторів. Місце комплексу в атомній енергетиці було визначено згідно рис. 4.5. Для комплексу було створено методику комплексних функціональних випробувань кабелів АЕС [154, 299], які були випробувані при розробці нових типів кабелів. Такі методики були реалізовані для випробувань і розробки нових конструкцій сигнальних кабелів здатних працювати при температурі до 1000°C.



Рис. 4.5 Місце радіаційного комплексу для функціональних випробувань критичного обладнання в атомній енергетиці

Схема випробувань наведена на рис. 4.6 та рис. 4.7 [96, 154, 208, 298]. Було отримано корисну і важливу інформацію для оцінки стану та завчасного розпізнавання його можливих пошкоджень ще на етапі розробки та запуску у виробництво.

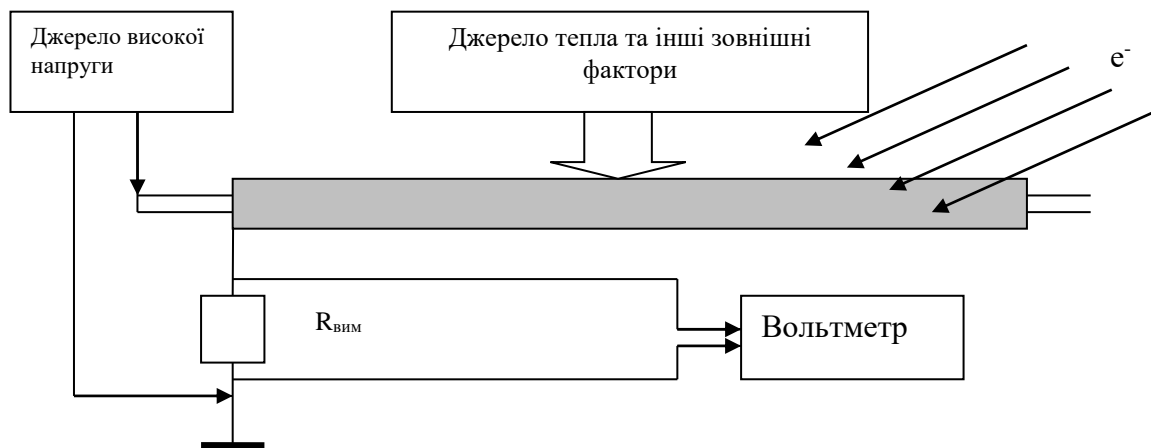
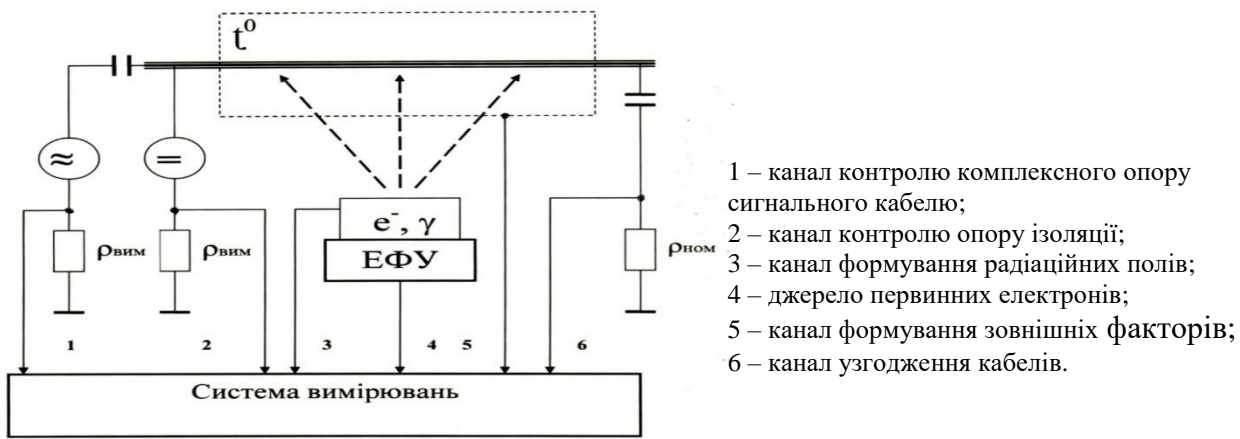


Рис. 4.6 Узагальнена комплексна методика кваліфікації кабелів



- 1 – канал контролю комплексного опору сигнального кабелю;
- 2 – канал контролю опору ізоляції;
- 3 – канал формування радіаційних полів;
- 4 – джерело первинних електронів;
- 5 – канал формування зовнішніх факторів;
- 6 – канал узгодження кабелів.

Рис. 4.7 Схема кваліфікації сигнальних кабелів [154]

Для цих випробувань структура установки була реконструйована до виду, що показано на рис. 4.8.

Функціональні радіаційні випробування та кваліфікація кабелів АЕС

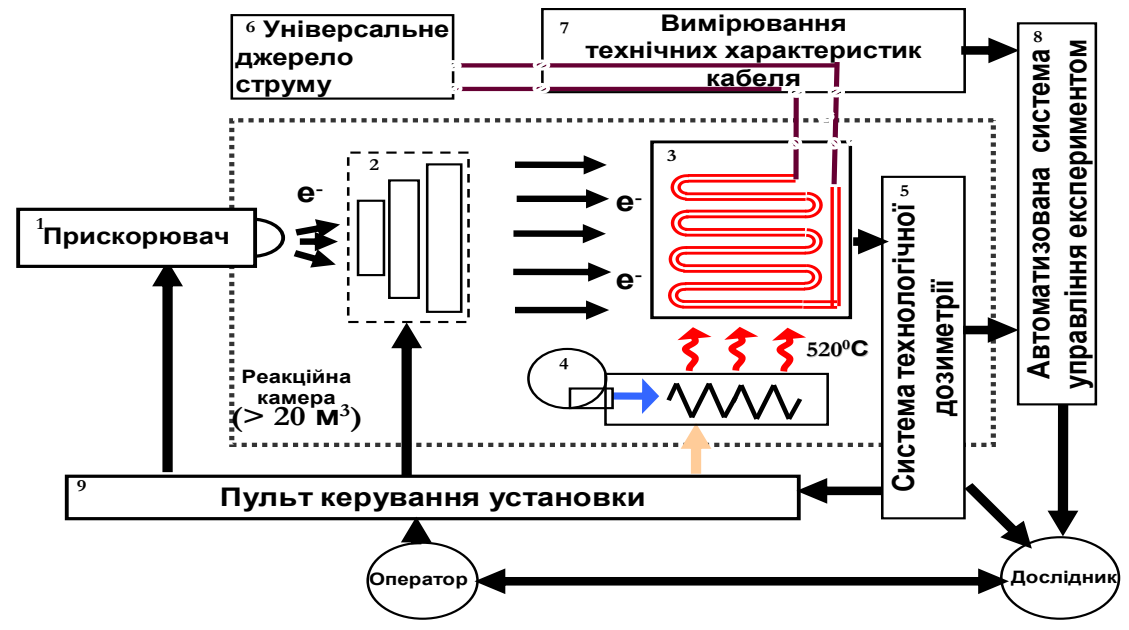


Рис. 4.8 Реконфігурація структури радіаційної установки імітації умов експлуатації для функціональних випробувань і кваліфікації високотемпературних сигнальних кабелів АЕС [208]

Методика, розроблена для реалізації функціональних випробувань передбачає здійснення їх в експлуатаційних режимах і контролює увесь об'єм фізичних, механічних, електричних, хімічних та інших показників, характерних для роботи обладнання на об'єктах, у тому числі в системі всіх експлуатаційних і несприятливих факторів атомних станцій аж до радіаційних включно [154]. За своїм потенціалом цей комплекс аналогів не має. Отримано оптимістичні дані щодо

вирішення проблеми прогнозування поведінки обладнання АЕС і завчасного розпізнавання аварійних ситуацій, як важливого підґрунтя успішного здійснення Національної програми подовження термінів експлуатації об'єктів атомної енергетики України

Наведені в таблиці рис. 4.3 дані свідчать про можливість проведення кваліфікації обладнання в умовах, рекомендованих нормативними документами галузі [296-299]. Останні дослідження вказують на доцільність прискореного вирішення усіх проблем впровадження запропонованих в ІЯД комплексних методів радіаційних функціональних випробувань електротехнічного обладнання, бо з аналізу результатів проведеної програми кваліфікації обладнання АЕС поки що відчутних результатів не відзначається.

Результати останніх досліджень вказують на можливість суттєвого підвищення метрологічного рівня досліджень і експертних висновків шляхом доповнення функціональних показників, показниками експлуатаційної стійкості матеріалів(з радіацією включно), які входять до складу обладнання. Особливо для нового обладнання, виготовленого з нових матеріалів (невідомі їх радіаційні характеристики). Це важливо для конструкторів і виробників електротехнічного обладнання з метою оптимізації їхньої надійності при роботі на АЕС.

Дослідження свідчать, що до цього часу повністю не вирішена проблема оцінки функціональної придатності в умовах одночасної дії радіації високих і низьких енергій. Саме останні для електротехнічного обладнання можуть виявитися головною проблемою надійності. Очікують вивчення доцільність і технічні проблеми залучення заряджених частинок низьких енергій для функціональної діагностики кабелів та електричних установок.

В свою чергу до персоналу радіаційного комплексу виникають особливі вимоги щодо формування характеристик радіаційних полів, необхідні для отримання надійних експертних висновків про функціональну придатність електричного обладнання до експлуатації на ядерних об'єктах.

В роботах співробітників ІЯД [264, 154] вже розглядалися деякі ефекти впливу низькоенергетичного іонізуючого випромінювання на стан та функціонування

кабелів, ізоляційних матеріалів та виробів з них. Встановлено сильний вплив процесів іонізації середовища на поверхнях ізоляційних виробів та кабелів, що відбуваються під дією іонізуючого випромінювання низьких енергій. Розроблені механізми оцінки впливу цих процесів на надійність роботи виробів та на ресурс їх експлуатації на ядерних об'єктах. Встановлено [154, 281], що дослідженнями з іонізуючими випромінюваннями енергією до 0,5 MeV необхідно охоплювати електростатичні процеси на поверхнях ізоляторів, радіаційно-хімічні процеси модифікації ізоляційної органіки, радіолізу газів та парогазових сумішей оточуючого середовища, процеси утворення і рекомбінації аероіонів.

Поточний стан імітатора експлуатаційних умов в герметичних відсіках атомних реакторів АЕС – фінальні процеси формування радіаційних полів (чистих і змішаних  $\gamma$ - $\beta$ -випромінювань) та доопрацювання протирадіаційного захисту в режимах опромінення важких металів та габаритного обладнання.

Структурно імітатори для радіаційних функціональних випробувань можуть утворюватися на базі однієї чи декількох електрофізичних джерел іонізуючих випромінювань різних енергій та типів випромінювань на території одного чи більше підприємств.

Далі розглянуто результати експериментального дослідження технічних комплексів радіаційних функціональних випробувань різної структури.

## **4.2 Дослідження імітатора на одному джерелі випромінювання**

### **4.2.1 Розробка радіаційних технологій отримання та дослідження методів застосування гідролізних наноматеріалів для ядерної та традиційної медицини**

Метою створення і використання імітатора є програма пошуку шляхів використання енергії іонізуючих випромінювань для стимулювання біохімічних і фізіологічних процесів в організмі.

Завданням досліджень було формування наукового підґрунтя застосування електрофізичних радіаційних технологій для новітніх методів в медицині. Вперше



поставлена проблема залучення тонких ефектів взаємодії іонізуючої радіації з живою матерією через проміжні реакції утворення-розрядки активних гідролізних наноструктур. Такий спосіб цілеспрямованої передачі енергії випромінювання безпосередньо до лікувального процесу обіцяє, крім вже відомих бактерицидних ефектів, стимулювання репараційних процесів і зростання активності живих клітин на рановій поверхні. Тому актуальним є дослідження можливостей і функціональності продуктів радіолізу води для створення нових та модифікації поширених медичних розчинів, призначених лікувати важкі форми ранового процесу при термічних та радіаційних опіках, онкологічних проявах та інших захворювань [175].

Ідеї, покладені в основу даного прикладного дослідження – пошуки шляхів використання енергії іонізуючих випромінювань для регулювання динаміки клітинних реакцій при несприятливих фізичних впливах (термічних та радіаційних ураженнях, онкології). Дослідження цієї проблеми було розгорнуто після виявлення незрозумілого для медичних фахівців ефекту підвищення ефективності традиційних медичних розчинів для лікування важких форм термічних опіків [172]. Було встановлено, що при використанні ізотонічного розчину хлориду натрію безпосередньо після його стерилізації за стандартом ISO 11137-1-2011, окрім традиційного ефекту розчинення і вимивання виділень на ранових поверхнях, спостерігалось підвищення темпів репарації пошкоджених тканин. Ранові поверхні заживлялись швидше. Для розуміння можливостей використання цього феномену, виникла об'єктивна необхідність у докладних дослідженнях особливості ефектів високих порядків, які виникають при опроміненні води та водних розчинів в процесі їх стандартної радіаційної стерилізації. Кінцевою метою цих досліджень є залучення радіаційно стимульованих ефектів для підвищення ефективності терапевтичного процесу [28, 140, 171].

Для медицини такі дослідження виконувалися вперше. А попередні дослідники [59, 107, 111] технологій радіаційної стерилізації медичних засобів значну увагу приділяли в основному мікробіологічним ефектам – проблемам стерильності оброблених медичних розчинів.

На початкових етапах було проведено теоретичні і експериментальні дослідження особливостей радіаційної стерилізації медичних розчинів електронами 2-5 MeV шляхом поглибленого аналізу доступних матеріалів численних дослідників з радіаційної хімії, радіаційної фізики, медрадіології, а також результатів і досвіду власних робіт цього напрямку [19, 25, 28, 30, 96]. Аналізувались енергетичні та хімічні параметри, якими описуються процеси в рідких матеріалах з великим вмістом води при обробці їх випромінюваннями пікометрового діапазону іонізуючими і мегавольтними електронами. Передбачалося отримані знання спрямувати на пошуки шляхів використання енергії іонізуючих випромінювань для підвищення ефективності традиційних медичних матеріалів з метою скорочення термінів лікування важких травм (опіків, побічних наслідків ядерної медицини в онкології, польової хірургії тощо).

*Особливості радіолізу води.* Аналіз доступних даних щодо складу продуктів радіолізу води при опроміненні електронами середніх і низьких енергій свідчить, що особливістю радіаційної стерилізації є супутні процеси утворення/розрядки продуктів радіолізу води (іонів і збуджених атомів та молекул) з різними, в тому числі надзвичайно короткими, термінами існування [160]. На думку вчених-медиків привабливим є їх використання для стимулювання відновлювальних процесів в пошкоджених клітинах. З цією метою головним завданням перших етапів було нагромадження детальної інформації з радіаційної фізики і радіаційної хімії, а також її систематизації для медичних фахівців з метою визначення продуктів радіолізу, перспективних для медичного застосування. Визначення переліку корисних продуктів радіолізу є основою для створення енергетичних моделей процесів їх утворення та розробки практичної технології напрацювання [160].

Встановлено, що радіоліз води відбувається за рахунок поглинання енергії випромінювань пікометрового діапазону електромагнітних хвиль (гама-квантів), або електронів середньої енергії. Кінцевий результат модифікації води при опроміненні цими видами іонізуючої радіації однаковий і відрізняється лише ефективністю передачі енергії в матеріал. Іонізуючі випромінювання цього діапазону енергій ефективно діють на зовнішні оболонкові структури атомів опромінюваного

матеріалу та визначають його хімічну активність. Такі механізми можуть використовуватися для цілеспрямованої модифікації структур атомів, а, відповідно, і властивостей матеріалу, що опромінюється. При радіаційній стерилізації водних медичних розчинів, енергія іонізуючих випромінювань трансформується у потоки вторинних електронів, які забезпечують її подальшу трансформацію у хімічні реакції, та у зміну фізичного стану матерії (температури). Вторинні електрони, рухаючись по рідині, втрачають енергію на хаотичне збудження чи іонізацію молекул води на своєму шляху. Частина їх може покинути об'єм опромінюваного матеріалу і взаємодіяти з атомами зовнішнього середовища (атмосфери) і суттєво впливати на кінцевий результат радіаційної обробки.

*Процеси поглинання енергії випромінювання у воді.* Процеси поглинання водою енергії електронів добре вивчено [154, 160, 175]. Електрони взаємодіють з вільними електронами матеріалу і атомами за рахунок електростатичних сил. Більша частина їх енергії передається в опромінюваний матеріал при взаємодії з орбітальними електронами. Відомо, що збуджені та іонізовані молекули дають старт каскаду реакцій з утворенням вільних радикалів і молекулярних продуктів. При проходженні через шар води та водних розчинів електрони втрачають свою енергію на хаотичне збудження та іонізацію атомів речовини на всьому шляху руху. Технологічно важливо, що іонізаційні втрати енергії електронів на одиницю довжини траєкторії стають постійними, починаючи з енергії 0,5 MeV. За нормативними Міжнародними документами для радіаційних технологій введено обмеження на вид (лише електрони та фотони) та енергію іонізуючих випромінювань до мінімальної величини (фотони – 5 MeV, електрони – 10 MeV), яка з запасом гарантує, що при опроміненні в матеріалі не утворяться небажані сполуки чи наведена радіоактивність. Електронні технології характеризуються найбільшою ефективністю через високу початкову енергію електронів, яка суттєво перевищує потенціали іонізації атомів. І при цьому на всьому шляху відбуваються їх зіткнення з атомами речовини та передача їм частки енергії на вибивання вторинних електронів. Вторинні електрони можуть іонізувати ще декілька молекул і стимулювати збудження хімічних реакцій. За час взаємодії електрони зміщуються в

опромінюваному матеріалі на  $10^{-8}$ - $10^{-7}$  см і утворюють групу іонів вздовж траєкторії первинної частинки (треки). В результаті утворюються локальні нанорозмірні групи взаємодії, які прийнято називати шпурами (інколи – кластерами). Значна частина вибитих з атомів електронів має енергію в десятки eV і вони приймають участь у процесі іонізації опромінюваного матеріалу та збудженні його атомів і молекул. Причому це відбувається миттєво – кожен акт такої взаємодії відбувається за час  $10^{-14}$ - $10^{-15}$  с. А сам процес передачі енергії електронами прямий і запускається вже при першій взаємодії з атомами матеріалу.

Також відомо, що середня енергія, яка витрачається на утворення в опромінюваній воді однієї пари іонів в реальних радіаційних технологіях з електронами практично не залежить від енергії падаючих первинних електронів і для більшості речовин складає величину близьку до 30 eV, що суттєво вище за потенціал іонізації більшості простих молекул ( $\approx 10$  eV). Дві третини енергії первинні електрони витрачають на збудження. Це і обумовлює більшу технологічну ефективність напрацювання продуктів радіолізу шляхом електронного опромінення.

*Радіаційно-хімічна модель електроактивації води.* Прийнята канонічна формула радіолізу води [160].



В цій формулі елементи  $OH$  і  $H$  – це нейтральні вільні гідроксильні радикали та атоми водню,  $e^-_{гидр}$  – гідратований електрон,  $H_2$ ,  $H_2O_2$ , і  $H_3O^+$  – звичайний молекулярний водень, перекис водню та іони водню.

Коефіцієнти в правих членах рівняння характеризують радіаційно-хімічний вихід  $G$  – показника кількості іонізованих/збуджених молекул на прикладену енергію в 100 eV.

Коефіцієнти в правих членах рівняння дещо відрізняються у різних авторів через технічні розбіжності та постановку експериментів. Тому часто перелік продуктів опромінення описують у спрощеному вигляді:



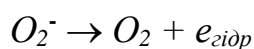
Тут зірочка (\*) вказує, що радикал утворився в результаті збудження атому, коло якого зліва стоїть зірочка. А якщо справа від символу стоїть знак полярності

(+/-), це свідчить, що радикал утворився в результаті розрядки іонізованого атому. Але обидва процеси характеризуються однією і тією ж величиною – радіаційно-хімічним виходом  $G$ .

При опроміненні води на відкритому повітрі без сторонніх включень, або опромінення медичних розчинів з повітрям в герметичних упаковках будуть додатково виникати численні продукти іонізації (радіолізу) повітря, яких є декілька груп: легкі іони  $H$ ,  $H_2$ , іони кисню  $O_2^-$  та їх похідні  $O_3^-$  та окисли азоту  $NO_2$ ,  $NO$ .

Відповідно, при опроміненні реальних зразків медичних розчинів електронами подальші реакції відбуваються за участю не тільки продуктів радіолізу, а й продуктів іонізації повітря.

Негативно заряджені іони кисню розряджаються з вивільненням електронів, в результаті чого формуються маси вільних (вторинних) електронів невеликої енергії, які можуть віддавати свою енергію на збудження хімічних реакцій. Цей процес можна додатково інтенсифікувати за допомогою введення реакційно здатних елементів – каталізаторів, сенсibilізаторів.



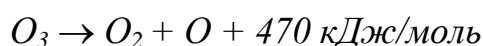
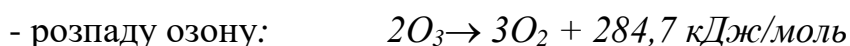
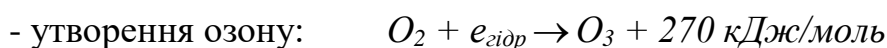
Процес поглинання гідратованого електрону атомом кисню призводить до утворення нестійкої конструкції  $O_3^-$  з коротким періодом напіврозпаду і виділенням енергії, отриманої в реакції її синтезу.

Усі продукти радіолізу є активними центрами і віддають нагромаджену енергію на збудження каскадів реакцій їх розрядки. Вони відносяться до окислювальних реакцій, привабливі для керування біохімічними процесами, наприклад, на ранових поверхнях. Саме ці етапи трансформації енергії випромінювання найбільше цікавлять фахівців медицини. Перелік найбільш досліджених реакцій зведено в таблицю 4.1.

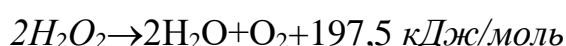
## Окислювальні реакції продуктів радіолізу води

|   | Гідроксильні радикали<br>$^*\text{OH}$ ( $^*\text{O}^-$ )  | Перекиси водню $\text{H}_2\text{O}_2$  | Вищі гідроксильні<br>радикали $\text{H}^*\text{O}_2$   | Азот $\text{N}_2^*$ , $\text{N}_2^+$   |
|---|--|--|--|--|
| Реакції   | $\text{H}_2\text{O}^+ + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_3\text{O}^+ + ^*\text{OH}$<br>$\text{H}_2\text{O} \rightarrow ^*\text{H} + ^*\text{OH}$                                | $2 \cdot ^*\text{OH} \rightarrow \text{H}_2\text{O}_2$<br>$2 \cdot \text{H}^*\text{O}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{O}_2 + \text{O}_2$                         | $^*\text{OH} + \text{H}_2\text{O}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{H}^*\text{O}_2$<br>$^*\text{H} + \text{O}_2 \rightarrow \text{H}^*\text{O}_2$ | $\text{N}_2^* + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{N}_2 + \text{H}_2\text{O}^*$<br>$\text{N}_2^+ + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{N}_2 + \text{H}_2\text{O}^+$ |
| Радіаційно-хімічний вихід<br>$G$ (мол/100eB)              | 3,0 при pH=0,4<br>2,8 при pH=7<br>3,0 при pH=13( $^*\text{O}$ )  | 0,8 при pH=0,4<br>0,75 при pH=7  | 0,02 при pH=0,4  | 0,8  |
| Коефіцієнт дифузії<br>$D$ ( $10^{-5}$ см <sup>2</sup> /с) | 2,3  | 1,3  | 1,7  | 1,1  |
| Потенціал реакції<br>$E^\circ$ (В)                        | 2,1 ( $\text{OH}^- \leftrightarrow ^*\text{OH} + e^-$ )<br>2,8 ( $\text{H}_2\text{O} \leftrightarrow ^*\text{OH} + \text{H}^+ + e^-$ )   | 0,7 ( $\text{H}_2\text{O}_2 \leftrightarrow \text{O}_2 + 2\text{H}^+ + e^-$ )<br>1,5 ( $\text{H}_2\text{O}_2 \leftrightarrow \text{HO}_2 + \text{H}^+ + e^-$ ) | 0,4 ( $\text{HO}_2 \leftrightarrow \text{O}_2 + \text{H}^+ + e^-$ )  |  |
| Примітки  | Вища реакційна здатність, ніж у вживаних промислових оксидантах $\text{Cl}_2$ , $\text{O}_2$ , $\text{HOCl}$ , $\text{KMnO}_4$ , $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ , та $\text{O}_3$ . |  |  |  |

*Трансформація енергії при розрядці радіолізаторів.* З аналізу процесів розрядки збуджених атомів і молекул у воді, встановлено, що крім енергії на стимулювання послідовних хімічних реакцій, одночасно виділяється і надлишкова енергія у вигляді тепла (велика кількість, згідно біохімічних процесів у живих клітинах). З теорії радіаційної хімії харчових продуктів можна оцінити кількість виділеної енергії в реакціях з радикалами [28, 154, 175]. До таких енергоємних компонентів відносяться перекиси, гідратовані електрони та озон. Згідно положень цієї дисципліни за декілька хвилин молекула озону може розпадатися по ланцюгах реакцій:



А додаткову енергію слід очікувати з реакцій розрядки перекисів:



В таких реакціях виділяється велика енергія, яка порушує енергетичну рівновагу в крупних органічних молекулах і призводить до їх модифікації. Ці реакції супроводжуються вивільненням атомарного кисню – одного з найбільш сильних

окислювачів, та передачею до матеріалу значної кількості нагромадженої енергії. В живих біомолекулах (віруси, бактерії) при цьому відбувається фатальне порушення біохімічних процесів.

*Особливість радіаційних процесів напрацювання гідролізатів.* Радіаційна стерилізація води відрізняється від інших методів її стерилізації високою інтенсивністю утворення гідратованих електронів – унікальних заряджених частинок, що при певних умовах виникають з води, які були відкриті та досліджені в 60-х роках минулого століття. Численні дослідники з радіаційної хімії полімерів стверджують, що ці продукти радіолізу здатні існувати в воді тривалий час після опромінення. Такі ж результати було раніше отримано і для складних водно-органічних сумішей. При опроміненні органічних сполук з великим вмістом води ніяких небажаних ефектів з точки зору хімічних перетворень не спостерігалось. Очевидно, через надто низьку концентрацію супутніх радіаційно стимульованих сполук, недоступну для стандартних засобів промислового контролю.

В усіх експериментах, попри відсутність хімічних протипоказань, відзначалась поява тонкого специфічного «електронного» запаху і присмаку, який усувався старанним відпрацюванням технологічного регламенту радіаційної пастеризації чи стерилізації.

За результатами досліджень можна стверджувати, що вказану особливість визначає саме наявність довго живучих продуктів радіолізу. І лише для гідратованих електронів остаточно не визначено термін існування у воді після опромінення.

Тому з припущення про тривале існування гідратованого електрону було зроблено попередній висновок, що саме він може бути використаний для збудження радіаційно-хімічних процесів в опроміненій воді у віддалені проміжки часу після радіаційної стерилізації. Наприклад, вже при нанесенні радіаційно-стерилізованої води на ранову поверхню.

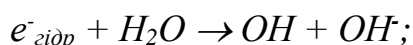
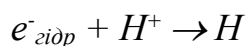
Цьому припущенню було приділено особливу увагу. Виявилось, що не існує надійної фізичної (енергетичної) моделі існування у воді електронів з практично нульовою швидкістю. Це представляє самостійний інтерес для прикладної ядерної фізики. Але з таких досліджень можна очікувати на практичні результати для

вирішення поставленої мети, якщо знайти шлях керування вмістом гідратованих електронів впродовж терміну зберігання стерилізованих рідин.

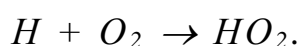
В реальних рідинах цей компонент радіолізу легко вступає в хімічні реакції. Можна припустити, що саме це визначає термін існування гідратованих електронів. І можна сподіватися на розробку для медичних розчинів ефективних заходів керування вмістом гідролізатів при їх зберіганні до моменту терапевтичного застосування.

Цьому знайдено підтвердження при аналізі похідних реакцій під дією гідратованих електронів. Встановлено, що гідратовані електрони більш селективні в низці хімічних реакцій, і дуже швидко приєднуються до компонентів розчинів, які мають низько розташовані вільні орбіти (ароматичні сполуки). Реакції з гідратованими електронами характеризуються високими константами швидкостей. Отриманий в таких реакціях продукт (нове потенційне джерело електронів) часто є вільним радикалом.

Гідратовані електрони можуть надзвичайно швидко реагувати з іонами кисню й іонами водню. Для чистої води, де концентрація іонів водню вища, ніж концентрація іонів кисню, для  $e^-_{гдр}$  переважає реакція з  $H^+, (H_3O^+)$ :



Гідратовані електрони підтримують реакції з утворенням перекисів водню, стимулюють реакції з іншими іонами, наприклад, заліза. В свою чергу, продукти реакцій з гідратованими електронами, наприклад, атоми водню – далі вступають в реакцію з молекулярним киснем і утворюють гідроксиди



*Аналіз технологічних особливостей напрацювання активних гідролізатів.* Напрацювання гідролізатів шляхом опромінення є самою простою технологією. Для цього упаковані розчини вносять в область дії іонізуючого випромінювання в реакційній камері радіаційної установки, як це показано на рис. 4.9.



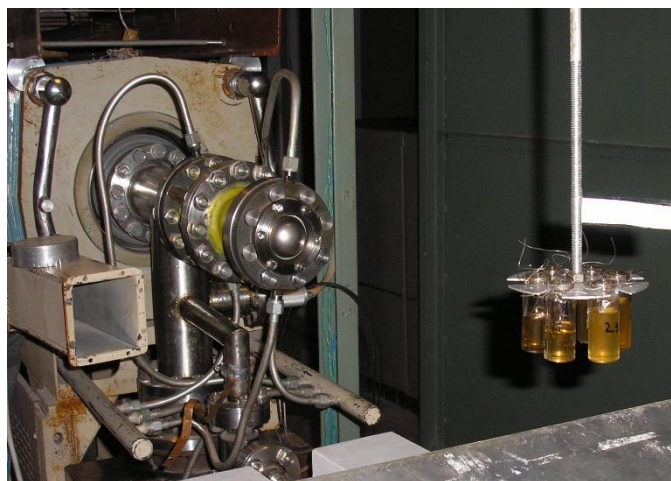


Рис. 4.9 Опромінення зразків медичних розчинів мегавольтними електронами [160]

Технологію опромінення необхідно узгодити не лише з часом електронної активації та термінами застосування гідролізатів, але враховувати вплив процесів збудження-розрядки активних наногруп. Перевагу слід віддавати прямому опроміненню електронами, енергія яких задовольнятиме вимогам рівномірної обробки рідини в стандартних для медицини упаковках. Розчини слід опромінювати таким чином, щоб об'єм неопроміненої рідини був мінімальним, бо в процесі напрацювання гідролізатів необроблена вода сама буде інтенсивно споживати активні гідролізати, утворені в опромінених масах і цим самим зменшувати їх корисний вихід для подальшого медичного застосування. Найбільш вигідним є опромінення зразків одночасно, а не послідовно, з двох або більше сторін. Аналіз результатів спеціальних досліджень та досвіду використання радіаційних технологій, свідчить, що зараз це не є проблемою з огляду на тривалий досвід об'ємного опромінення в промислових процесах, наприклад при обробці органічної ізоляції.

Двома окремими проблемами, які досліджувалися, були питання оптимальної технології напрацювання – в упаковках з присутністю повітря чи без нього.

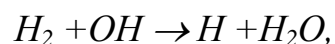
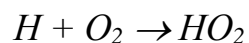
Вирішувалися і метрологічні проблеми контролю за технологічним процесом і його стандартизація для медичного застосування.

В процесі виконання досліджень було встановлено важливі ефекти.

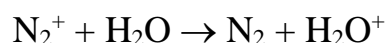
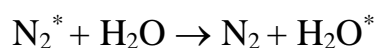
1. При радіаційній стерилізації у воді нагромаджується енергія іонізуючих випромінювань у вигляді нанорозмірних утворень з іонізованих і збуджених молекул, атомів, елементарних зарядів. Згідно законів збереження енергії, такі конструкції не можуть зберігатися довго і віддають нагромаджену енергію на збудження ланцюгів хімічних реакцій, аж до повної їх розрядки. Причому, без будь-яких додаткових реактивів. А утворені в цих хімічних реакціях сполуки є предметом досліджень для застосування в медичній практиці. Важливо, що надійна керованість потоками радіації дає перспективу цілеспрямованого напрацювання в розчинах необхідної кількості нанорозмірних гідролізних утворень.

2. Особливістю електронного опромінення є підвищена інтенсивність нагромадження енергії у вигляді елементарних зарядів, що виникають з води – «гідратовані електрони». Характерно, що упродовж усього терміну виникнення-розрядки активованих молекул води, гідратовані електрони існують постійно і при опроміненні розчинів з високою діелектричною характеристикою, можна очікувати їх тривале зберігання і можливість використання у віддалені проміжки часу. Їх роль в біохімічних і фізіологічних процесах поки що досконало не вивчена.

3. Технологічно можливо нагромаджувати енергію у вигляді гідратованих електронів і уже в складі електроактивованої рідини, передавати цю енергію безпосередньо до біохімічних процесів на ранових поверхнях. Це перспективно, бо таким чином принципово можна транспортувати енергію, необхідну для збудження репараційних процесів в живих клітинах. В масах розчиненої органіки на ранових поверхнях ймовірно можуть відбуватися процеси біотрансформації цих радикалів за участю  $O_2$  та  $H_2$ :



4. Вимагає окремого дослідження методика медичного використання водних розчинів, опромінених електронами в присутності повітря. З теоретичної точки зору додатково в органіці на рановій поверхні можлива низка реакцій за участю іонізованого атмосферного азоту (при його тривалому зберіганні в опроміненому розчині) за рахунок передачі енергії його електронного збудження молекулам води.



5. Перспектива медичного застосування продуктів радіолізу води визначається енергією гідратованих електронів, нагромаджених в процесі радіаційної стерилізації розчинів. Ці заряджені частинки (одичні заряди) хоча і мають практично нульову швидкість, але за рахунок електростатичних сил здатні активно вступати в реакції з іншими складовими в біологічних масах раневої поверхні. Більшість таких реакцій формують активні та короткоживучі сполуки, але при цьому кожен акт модифікації електронами атомів і біологічних молекул супроводжується виділенням в точці реакції додаткової енергії. За такого механізму дії стає зрозумілим тривале зберігання активності «зарядженого» радіацією розчину, що спостерігалось експериментально.

Інші продукти, згідно теорії, надто короткоживучі, щоб суттєво впливати на біохімію і фізіологічні процеси на рановій поверхні.

6. Головною технологічною проблемою застосування продуктів радіолізу води є період існування після опромінення та його узгодження з реальним часом терапевтичного процесу. З цією метою необхідно удосконалити методику отримання і зберігання активних наногруп та технології їх медичного застосування у віддалений період.

7. Використання енергії іонізуючих випромінювань дозволяє створювати гнучкі технології формування в складі води і водних медичних розчинів груп гідролізатів з різними біохімічними, фізіологічними та фізичними властивостями (фізіологічною активністю, термінами існування тощо).

8. Залучення в медицину вказаних процесів привабливі тим, що не будуть вимагати ніякого додаткового вкладення коштів. Необхідно лише визначити біохімічні та фізіологічні проблеми на ранових поверхнях, які можна вирішити за допомогою продуктів радіолізу. А подальше їх використання – це лише доповнення до існуючих інструкцій щодо використання радіаційно-стерилізованих медичних розчинів (з урахуванням термінів існування потрібних груп гідролізатів).

9. Обґрунтовано, що залучення тонких ефектів взаємодії іонізуючої радіації з живою матерією через проміжні реакції утворення-розрядки активних гідролітичних наноструктур забезпечує цілеспрямовану передачу енергії випромінювання безпосередньо до лікувального процесу.

#### 4.2.2 Медико-біологічні результати випробувань функціональності радіолізатів

Була розроблена і на базі електронного прискорювача реалізована схема імітатора досліджуваних процесів [172]. Мета цих заходів – здійснення радіаційно-біологічних досліджень функціональності продуктів радіолізу медичних розчинів. Модернізація радіаційної установки (рис. 4.10) складається з двох базових технічних доповнень – засобів керування установкою (1, 3) та спеціальної експериментальної камери (4) з засобами контролю за кліматичними умовами в його просторі (5, 6, 7).

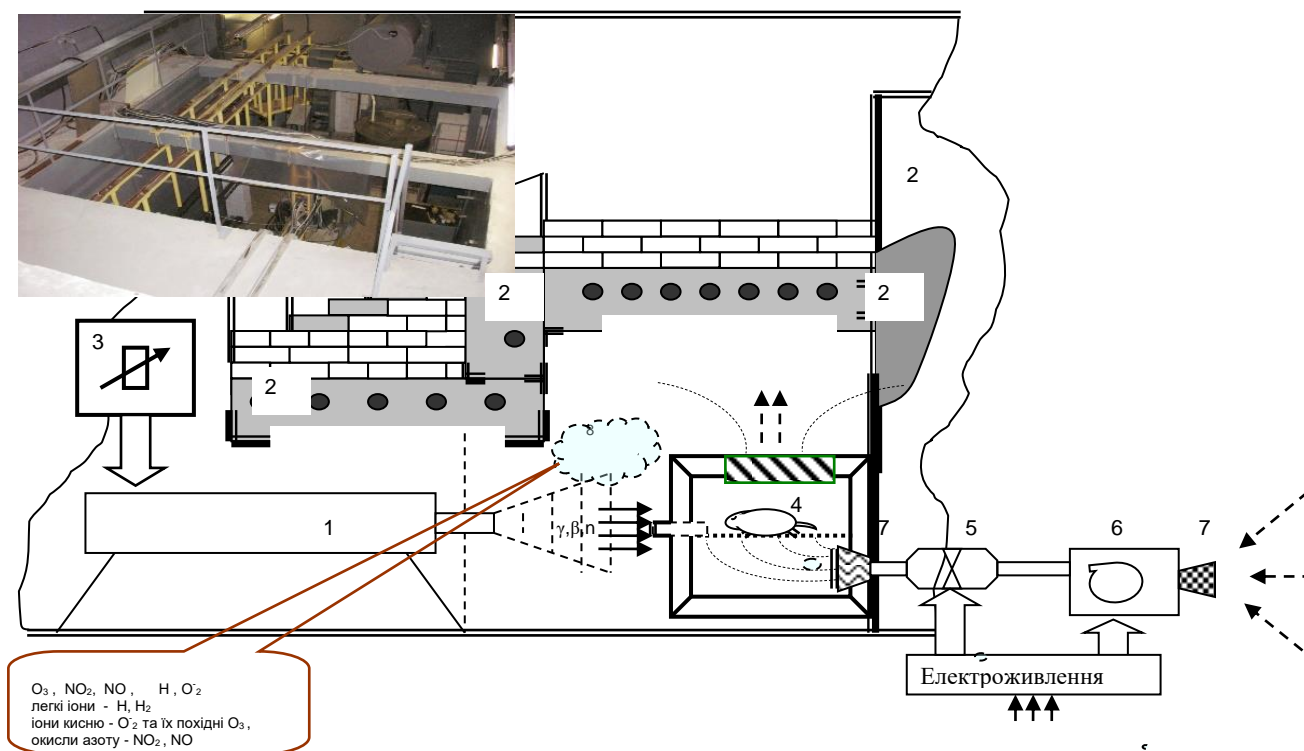


Рис. 4.10 Модернізація установки для адаптації до формування імітатора радіаційно-біологічних процесів

Останнє доповнення є оригінальною частиною розробок, що забезпечує виключення усіх небажаних факторів, які супроводжують роботу електрофізичної радіаційної техніки. Необхідні умови досліджень *in-vivo* забезпечуються забором чистого зовнішнього повітря вентилятором (6), його двоступеневою фільтрацією (7) та підігрівом (5). В боксі передбачено утворення ламінарного потоку та видалення відпрацьованого повітря в простір реакційної камери (8). Таким чином виключається небажаний вплив хімічно активних продуктів радіолізу повітря в реакційній камері. Для досліджень з радіаційними опіками передбачено місцевий протирадіаційний захист з коліматорами необхідного розміру в стінці захисту зі сторони прискорювача електронів. Доповнення радіаційної техніки стосується засобів регулювання струму пучка та відповідних засобів формування і контролю радіаційних полів при низькій інтенсивності пучка, у відповідності до схеми на рис. 4.10 і рис. 4.11.

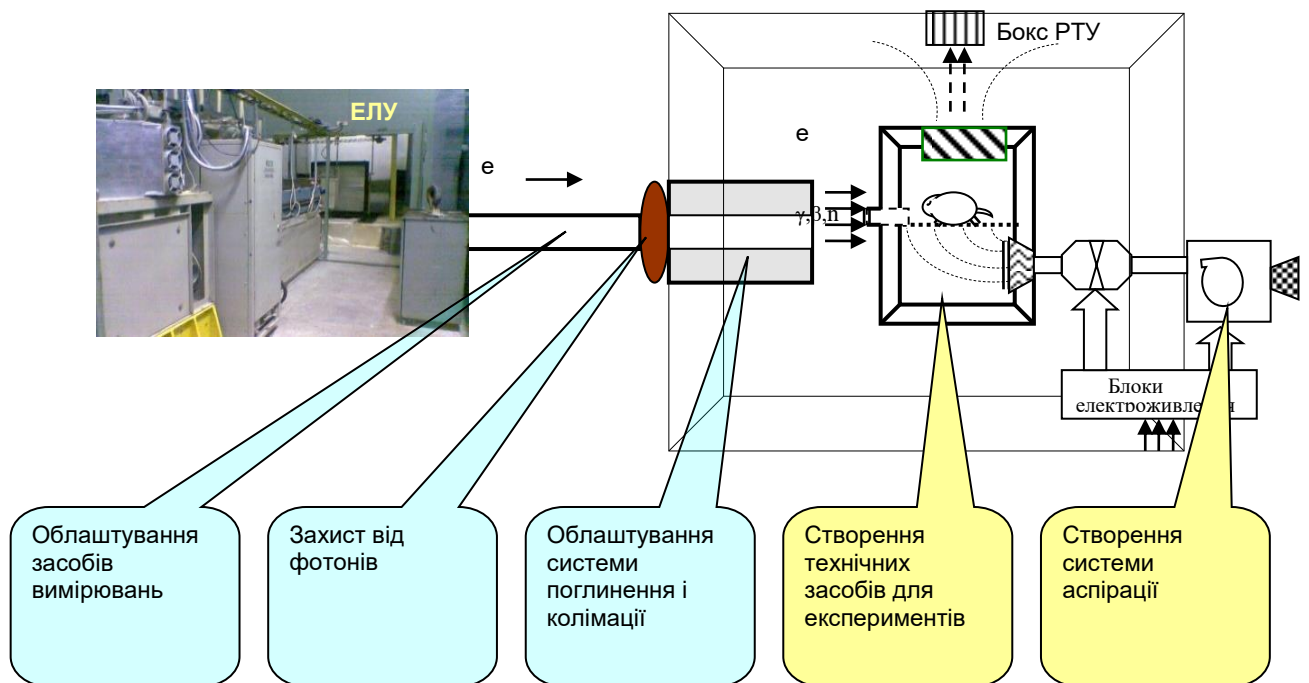


Рис. 4.11 Схема модернізації обладнання реакційної камери радіаційної установки при адаптації у структуру імітатора

Фактично для медико-біологічних робіт створено низку технічних засобів, вписаних в структуру адаптованої радіаційної установки ІЯД [129, 172]. Це

модернізація засобів вимірювань (в сторону малих струмів пучка), облаштування засобів поглинання небажаних компонентів іонізуючої радіації (фотонів від прискорювача), створення системи засобів колімації та фокусування пучків на об'єкті – знову ж таки з засобами контролю – спеціальних камер для утримання дослідних біооб'єктів з системами подачі і кондиціонування повітря та захисту (при необхідності) від впливу небажаних фотонних факторів в реакційній камері. І відповідно засоби енергопостачання цих нових вузлів установки.

Знайдено шляхи компенсації відсутності дорогих, екзотичних і малодоступних хімічних приладів. Розроблені методики попередньої оцінки очікуваної концентрації гідролізних груп. В таблиці 4.2 наведені деякі з відшуканих реальних даних про фактичний радіаційно-хімічний вихід активованих молекул в одиниці об'єму опромінюваних розчинів. Вони свідчать, що проблему можна вирішувати шляхом математичного моделювання процесу радіолізу води в межах параметрів реального радіаційного поля.

Таблиця 4.2

Фактичний радіаційно-хімічний вихід активованих молекул в одиниці об'єму опромінюваних розчинів

| Фракція                | G (ммоль/100 еВ)   | Коефіцієнт дифузії $D$ : ( $10^{-5} \text{ см}^2/\text{с}$ ) | Швидкість реакції ( $\text{м}/\text{с}$ ) |
|------------------------|--|--|---|
| $e^-_{\text{гидр}}$    | 0,28   |  | $2 \cdot 10^{10}$                         |
| *H                     | 0,062  |  | $10^7 - 10^8$                             |
| *OH                    | 0,28   |  |   |
| $\text{HO}_2^*$        | 0,02 при $\text{pH}=0,4$                                       | 1,7  |   |
| $\text{H}_2\text{O}_2$ | 0,072<br>0,08 при $\text{pH}=0,4$ ,<br>0,075 при $\text{pH}=7$ | 1,3  |   |
| $\text{H}_2$           |  |  |   |

Попередні оцінки показують, що при оптимальному виборі режиму опромінення концентрація гідролізатів матиме фізіологічно значиме значення навіть через 1-2 години по деяких гідролізатах.

Випробування і отримання висновків про результати радіаційної технології підвищення ефективності медичних розчинів здійснювались дистанційно в умовах спеціалізованого науково-дослідного закладу відповідного спрямування шляхом транспортування напрацьованих гідролізатів у складі фізіологічних розчинів.

Методика, наведена на рис. 4.12, передбачала транспортування опроміненого матеріалу на значні відстані і випробовування його ефективності через великі проміжки часу (від 1 години до 2 діб).

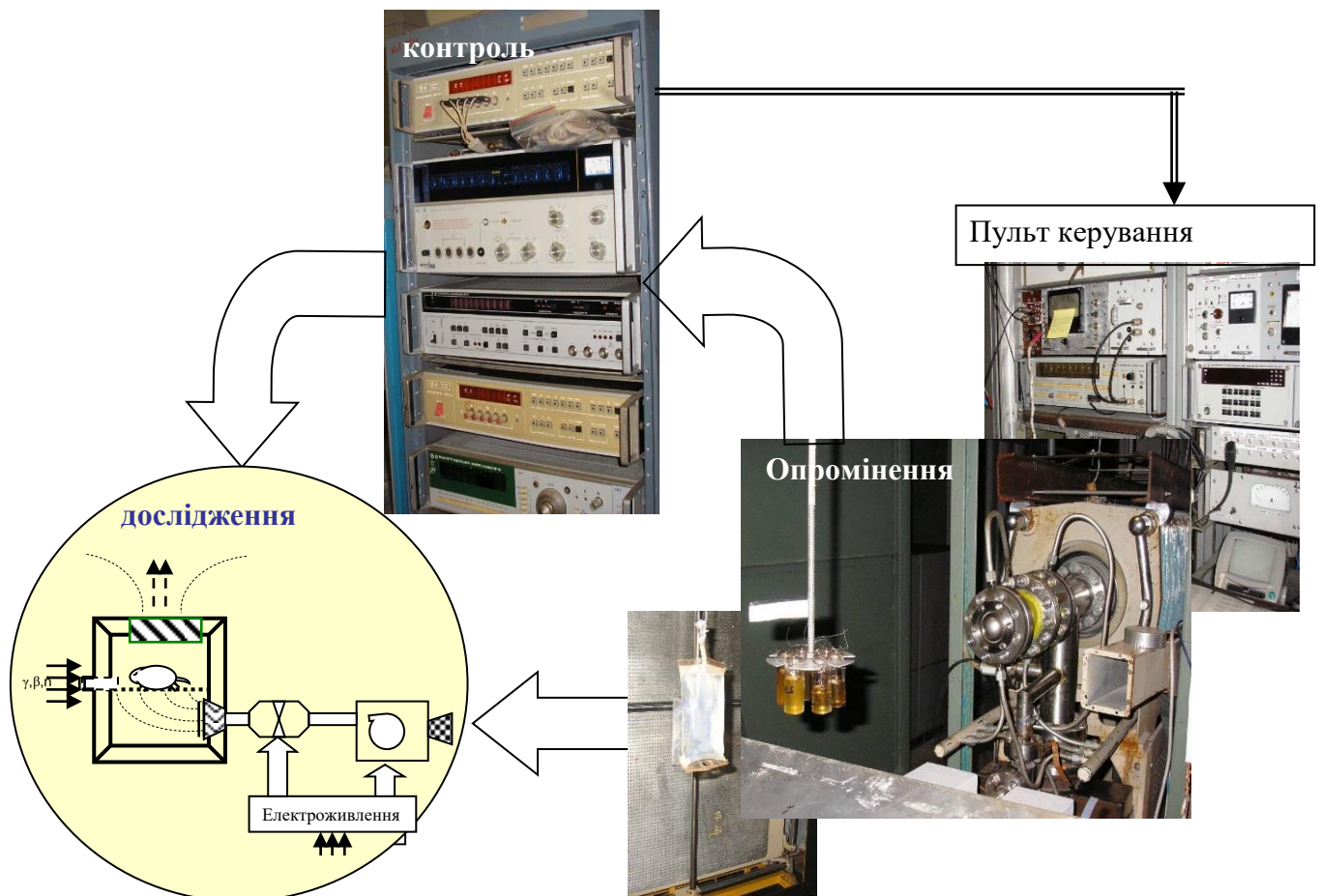


Рис. 4.12 Схема медико-біологічних випробувань функціональності радіолізаців

Опромінення фізіологічних розчинів мегавольтними електронами для напрацювання продуктів радіолізу (фото справа внизу) під контролем системи вимірювань (позначено стрілкою).

З цією метою на усіх етапах здійснювався технологічний контроль через вимірювання електричних параметрів опромінених розчинів за диференційною схемою, наведеною на рис. 4.13.

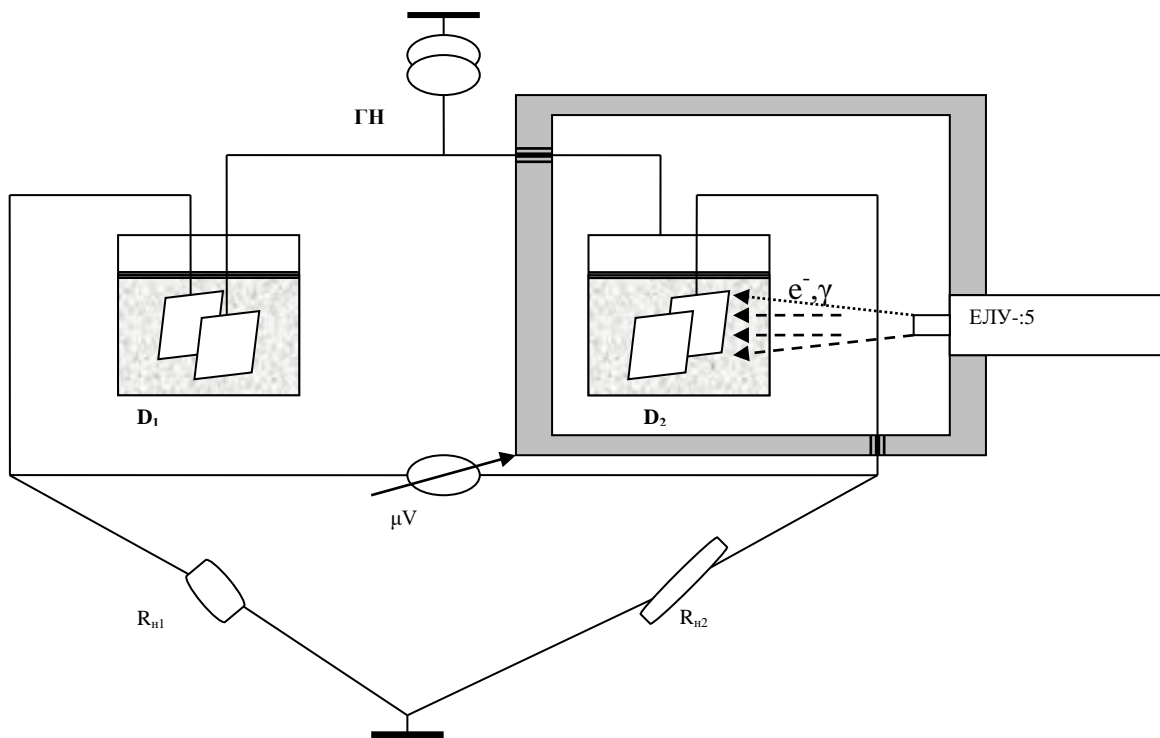


Рис. 4.13 Диференційна схема вимірювання зарядності опроміненних медичних розчинів

Отримані дані з вимірювань використовуються для верифікації результатів медико-біологічних досліджень з опроміненними розчинами.

*Суть методики.* Методика вимірювань складається з порівняння характеристик еталонної рідини з опроміненою рідиною. З цією метою передбачено два однакових датчика – об'єми  $D_1$  і  $D_2$ . В датчики  $D_1$  і  $D_2$  залито однакові кількості дистильованої води зі строго ідентичними характеристиками. В обох об'ємах встановлено однакові конструкції пар чутливих електродів. Один з електродів обох датчиків під'єднано до джерела електричної напруги ГН, а другі електроди датчиків навантажені окремими резисторами  $R_{н1}$  та  $R_{н2}$  відповідно. Ці резистори іншими кінцями сполучені між собою і під'єднані до другого полюса джерела напруги ГН через заземлений провід.

В утвореній містковій схемі корисним сигналом є розбаланс параметрів між її плечами. Його контролюють в діагоналі місткової схеми. Точність вимірювань визначається чутливістю приладу, який контролює розбаланс. Параметри елементів місткової схеми вибрано такими, щоб у початковому стані сигнал в діагоналі був відсутній. Досягається така рівновага за рахунок точного регулювання резисторів



навантаження в невеликому діапазоні (10-15%) для урахування реактивностей у сигнальних магістралях.

Останнє є суттєвим, бо еталонний датчик ( $D_1$ ) розташовано поза межами реакційної камери експериментальної установки і під'єднано до схеми найкоротшими провідниками, в той час, коли для сигнального датчика ( $D_2$ ), розташованого в реакційній камері поблизу прискорювача електронів, довжина сполучних ліній в сотні разів більша і цей параметр необхідно компенсувати відповідним підбором  $R_{н1}$  або  $R_{н2}$ .

*Методика калібрування системи вимірювань.* Калібрування приладу здійснюють вимірюванням вмісту перекисів водню, як одного з найбільш вивченого реактиву в медицині. Умовою коректного калібрування є однакова температура обох датчиків, вологість та атмосферний тиск, відсутність електромагнітних перешкод.

Задачею є отримання калібрувальної кривої даної системи вимірювань – функції відгуку (сигналу) в діагоналі місткової схеми від зміни концентрації перекису водню у датчику  $D_2$ . Для цього у воду датчика  $D_2$  невеликими дозами поступово додають концентрований перекис водню. Точність калібрувальної кривої визначається чутливістю приладу в діагоналі містка та дискретністю внесення перекису до датчика. Користуючись отриманою калібрувальною кривою визначають вміст перекисів і при радіаційній обробці розчинів.

В медичній практиці поширені зразки товщиною 35-40 мм вагою 200-500 г (наприклад, пакети розчину ізотонічного гідрохлориду натрію, рис. 4.12).

Енергія електронів для опромінювання реальних зразків води ( $\rho=1 \text{ г/см}^3$ ) при опромінюванні з двох протилежних сторін традиційно розраховалась за формулою:

$$W \approx L / 0,8$$

де  $L$  – товщина зразка (упаковки з водою), в см,  $W$  – енергія електронів, в MeV.

Було виявлено, що вміст продуктів радіолізу від цього параметра мало залежить через надто короткий термін їх розпаду, а згідно теорії вміст модифікованих молекул залежить лише від величини поглинутої енергії випромінювання – поглинутої дози.

Поглинута доза ( $D$ ) – це відношення середньої енергії, яку іонізуюче випромінювання передає речовині в елементарному об'ємі, до загальної маси речовини в цьому об'ємі. В реальному процесі визначається середньою енергією випромінювання, поглинутого в одиниці об'єму і характеризує не саме випромінювання, а його дію на речовину.

$$D = dw/dm$$

В системі СІ одиницею поглинутої дози  $D$  є Грей:  $1 \text{ Гр} = 1 \text{ Дж/кг}$ .

Цей показник визначається лінійними витратами енергії випромінювання при проходженні матеріалу. Для водних розчинів зі щільністю близькою до звичайної води пучок електронів з енергією  $1 \text{ MeV}$  характеризується  $L_d = 0,032 \text{ нДж/м}$  ( $0,2 \text{ кеВ/мкм}$ ).

З досвіду проведених досліджень можна зробити висновок, що на функціональності отриманих продуктів радіолізу похибка розрахунків до 40% ( $\pm 20\%$ ) не позначається, тому і оцінювати розподіл енергії по глибині (дозу отриманої від електронів енергії) можна за вищенаведеною спрощеною формулою для будь-якої з методик опромінення.

### 4.2.3 Висновок

Таким чином, імітатор надав можливості знаходження оптимальних методів опромінення води і водних розчинів лікарських засобів мегавольтними електронами та експериментального дослідження процесів трансформації енергії активних радикалів і їх груп.

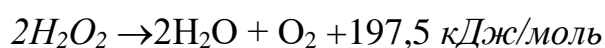
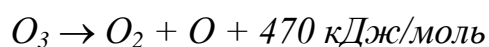
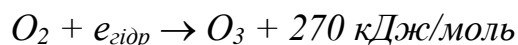
Розроблено методуку та прилади для вимірювань характеристик опроміненої (електроактивованої) води, схему їх практичної реалізації для реальних експериментів.

Визначено перелік найбільш активних гідролізатів з різними термінами існування, куди трансформується і нагромаджується енергія іонізуючих випромінювань.

Виявлено гідролізати з тривалим терміном існування, перспективні для створення методів передачі енергії випромінювань через опромінені розчини до фізіологічного процесу з метою стимулювання клітинних репараційних процесів на молекулярному рівні.

Встановлено, що помітними для фізіологічних цілей енергетичними характеристиками відзначаються гідратовані електрони.

Встановлено шляхи трансформації енергії при розрядці радіолізітів.



Розроблено оперативний метод контролю енергетичного стану гідролізітів упродовж усього періоду їх напрацювання і доставки до споживача.

*В результаті показано, що за допомогою імітатора навіть з одним джерелом іонізуючих випромінювань створено і випробувано in-vivo промислову радіаційну інноваційну технологію підвищення ефективності медичних розчинів з метою покращення репараційних процесів у пошкоджених тканинах організму та прискорення заживлення важких опікових ран. Реалізовано оригінальну технологію передачі до лікувального процесу енергії іонізуючих випромінювань дистанційно і на великі відстані через проміжні реакції утворення продуктів радіолізу.*

### **4.3 Дослідження ефективності імітаторів складної структури**

Завданням є створення технічної бази для розробки інноваційних методів використання іонізуючих випромінювань в технологіях виробництва термостійких мікрофільтраційних матеріалів підвищеної міцності.

Мета – імітація умов виробництва ядерних фільтрів за інноваційною технологією ІЯД, яка характеризується активним застосуванням радіаційних методів на більшості технологічних етапах виробництва. Мікрофільтрація зараз

активно використовується в численних і актуальних напрямках економічного розвитку, а Насамперед для безпеки харчування і охорони здоров'я людей.

*Актуальність.* Вкладом ядерної науки у розвиток сучасних високих технологій є винахід унікальних фільтраційних матеріалів, що називаються ядерними фільтрами. В їх основі – трекові технології отримання в матеріалах надзвичайно тонких каналів (пор), придатних для фільтрування найдрібніших об'єктів – до вірусів чи молекул (рис. 4.14).

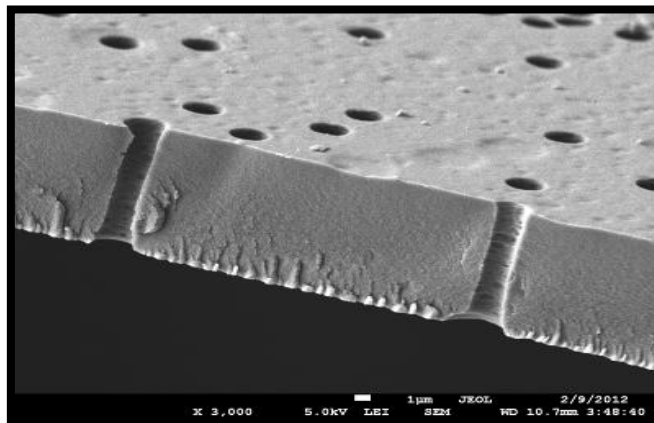


Рис. 4.14 Сучасна трекова мембрана

Такі матеріали знайшли широке застосування в багатьох провідних галузях сучасного виробництва, таких як:

- Фільтрація рідин і газів;
- Плазмофорез;
- Мікробологічний аналіз;
- Тонка очистка повітря;
- Моніторинг навколишнього середовища;
- Метрологія і сертифікація в дослідженнях;
- Екстрація цінних компонентів з розчинів та рідких відходів;
- Екрановакуумна ізоляція для криогенної техніки;
- Нанотехнології;
- Цитологічні дослідження, медична діагностика;
- Виробництво ферментних препаратів;
- Стерилізація харчових продуктів та лікарських препаратів.

Це далеко не повний перелік галузей, де ядерні фільтри набули великої популярності.

Як свідчать висновки провідних фахівців і винахідників ядерних мембран – виробництво, удосконалення та розробка нових типів трекових ядерних мембран – це область високих технологій і може бути реалізована тільки високопрофесійними вченими-ядерниками, фізиками, хіміками, але лише при умові наявності найвищого рівня технічної бази.

З цією метою поставлено завдання створити в ІЯД НАН України відповідну технічну основу для удосконалення технології та розробки нових типів ядерних мембран – термостійких і міцних, а також більш доступних для широкого вжитку в різних галузях вітчизняного промислового виробництва.

Ринок фільтрувальних матеріалів зараз широкий. В 2013 р. лише НВК «БЕТА» виробляє за рік  $10^6$  м<sup>2</sup> трекових мембран з порами від 20 нм, при цьому дохід складає близько млрд.

Промисловість вимагає активного удосконалення технологій цих матеріалів, створення нових виробів і пошуків широкого їх використання для прогресу виробництва. Сприятливими факторами для цього є розробка новітніх полімерних матеріалів з суттєво більшою температурною стійкістю та міцністю. Але ці нові матеріали характеризуються іншими фізичними властивостями – теплопровідністю, адгезією, температурою охрупчування, діелектричними і оптичними властивостями, щільністю та в'язкістю. А тому використовувати попередні технології для виготовлення нанопористих плівок з нових матеріалів практично неможливо. Цим визначається актуальність досліджень та розробок нових технологій виготовлення нанопористих плівок для перспективного технічного застосування.

Основою програм створення новітніх ядерних фільтрів є модернізація ядерно-фізичної техніки ІЯД – найбільш трудомісткий і дорогий етап програми. Ядерна техніка відноситься до переліку унікальної, коштує дорого і доступна лише державам з високим економічним рівнем. В ІЯД імітація умов виробництва нового покоління трекових ядерних мембран здійснюється з залученням на час виконання програми комплексу різної ядерно-фізичної техніки.

*Стан проблеми.* Як промисловий напрямок, виробництво ядерних фільтрів було започатковано в 70-х роках минулого століття в Лабораторії ядерних реакцій Об'єднаного інституту ядерних досліджень (м. Дубна) під керівництвом академіка Г.Н. Фльорова [294, 295]. В даний час їх виробництво розгорнуте в більшості розвинутих країн світу – США, Росії, Казахстані, Японії та ін. На їхній базі утворено низку галузевих технологій, де мікрофільтрація здійснила технологічний переворот (медицина, харчова промисловість, сільське господарство, електроніка, напівпровідники).

В Україні поки що відсутнє виробництво унікальних і цінних мікрофільтраційних матеріалів. Їх започаткування передбачено Програмою Європейської асоційованої лабораторії (*LIA*), в якій безпосередню участь бере ІЯД [198-200]. Завдання ІЯД – імітація умов виробництва ядерних фільтрів за власною інноваційною технологією, де радіація залучається в більшості технологічних етапів. Мета – утворення технічного комплексу, здатного імітувати умови здійснення усіх етапів виробництва.

*Економічне обґрунтування.* Світовий ринок фільтрувальних елементів для плазмофореа та заготівлі крові ще в 2000 році складав 2,0 млрд. дол. США. З них Європа - 41 %, Азія – 29 %, Північна Америка – 28 %. Вже в 2008 році «мембранний» ринок складав в Німеччині \$886 млн., у Франції \$616 млн., Італії \$492 млн., в Росії – \$104 млн. Далі відбувається стабільне зростання світового ринку на 9,5 % щорічно, 11-12 % – в Росії, а в 2016 р. – до 16 %. В даний час російський ринок фільтраційних елементів оцінюється в \$200 млн.

Комплекс утворюється як спеціалізований імітатор умов виробництва нового покоління ядерних мембран (ядерних фільтрів) за радіаційною технологією, запропонованою вченими-ядерниками ІЯД НАН України. Її вибір обумовлений узгодженими планами *LIA* використання принципів трекових технологій, узагальнена схема якого наведена на рис. 4.15.

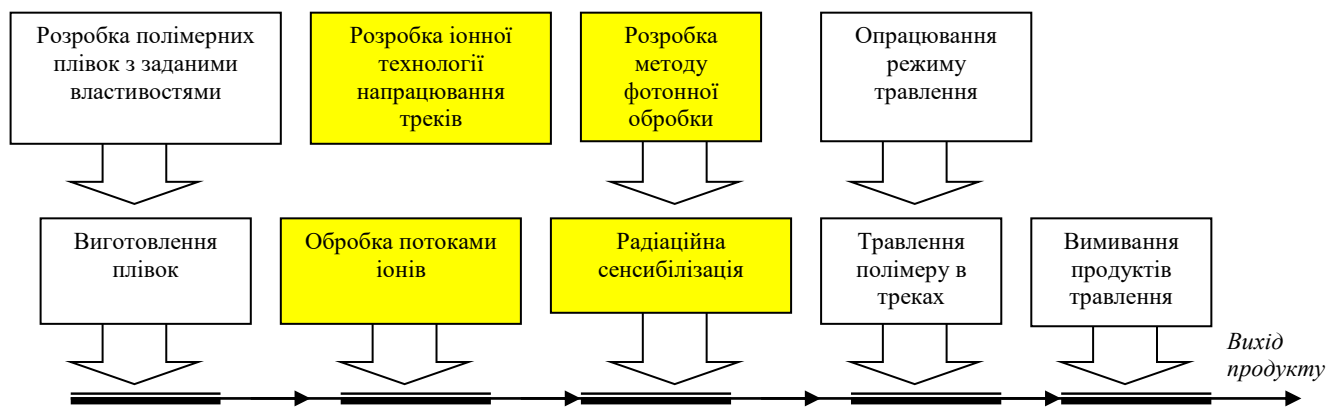


Рис. 4.15 Загальна схема технологічного процесу виготовлення удосконалених видів ядерних мембран [199]

Оригінальною особливістю запропонованої технології є використання легких іонів та радіаційної сенсibilізації матеріалу. Така технологія спрямована на використання новітніх типів надзвичайно термостійких і міцних полімерів ІХВС НАН України як основи інноваційних вітчизняних типів трекових нанопористих матеріалів, де використання діючих зараз важкоіонних технологій непридатна. Для важких іонів діє обмеження на товщину опромінюваної плівки, яка повинна не перевищувати 5-20 мкм). На заміну важким іонам (для генерації яких необхідна дорога спеціалізована ядерно-фізична техніка) запропоновано застосування легких (дешевших) іонів. Для розробки нових удосконалених технологій нанопористих матеріалів утворено імітатор усіх складових технологічного процесу на основі діючих ядерно-фізичних установок ІЯД НАН України. Структура імітатора наведена на рис. 4.16. В його основі бомбардування полімерних плівок і матеріалів (виробів) легкими альфа-частинками різних енергій [35, 45, 159, 166]. В тому числі і високих енергій, які мають більший пробіг в органічних матеріалах (понад 100 мм), хоча і меншу іонізуючу здатність. Для забезпечення високої якості отворів в даній технології запропоновано здійснювати сенсibilізацію потужними потоками гама-квантів. Для них не мають значення оптичні властивості матеріалу плівок. Подальша хімічна обробка здійснюється на останньому етапі технологічного процесу.

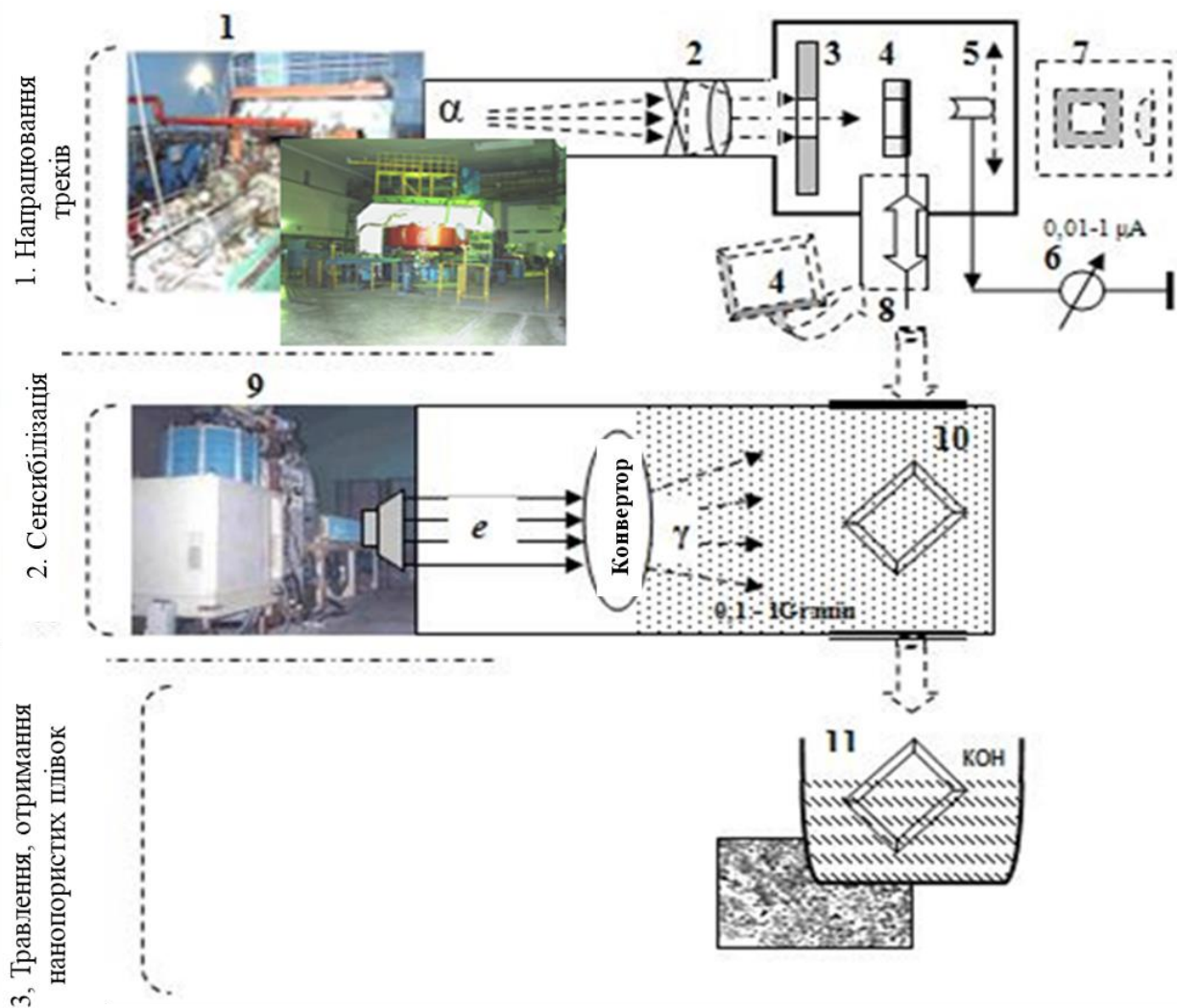


Рис. 4.16 Загальна структура імітатора, необхідна для досліджень технологій термостійких нанопористих матеріалів

### 4.3.1 Структура технічних засобів імітатора

Імітатор технологічних умов виробництва термостійких ядерних мембран організований для виконання науково-дослідних робіт і виробництва нанопористих фільтрувальних матеріалів в обсязі програми Асоційованої Європейської лабораторії ЛІА.

При компонованні обладнання імітатора було прийнято рішення залучити до комплексу циклотрон У-240, який забезпечує не тільки глибоке регулювання інтенсивності, але і регулювання енергії іонів. Цей комплекс дорожчий, але це не може бути перешкодою на етапі досліджень і розробки технологій нанопористих



матеріалів – це звичний процес для технологій ядерних мембран, куди завжди залучають техніку найвищого рівня [8]. А циклотрон У-240 – це один із 3-х універсальних циклотронів світу і представник ядерних установок самого високого рівня.

Схема технології виробництва ядерних мембран, розроблена для застосування новітніх розробок ІХВС з полімерів високою температурною стійкістю наведена на рис. 4.17.

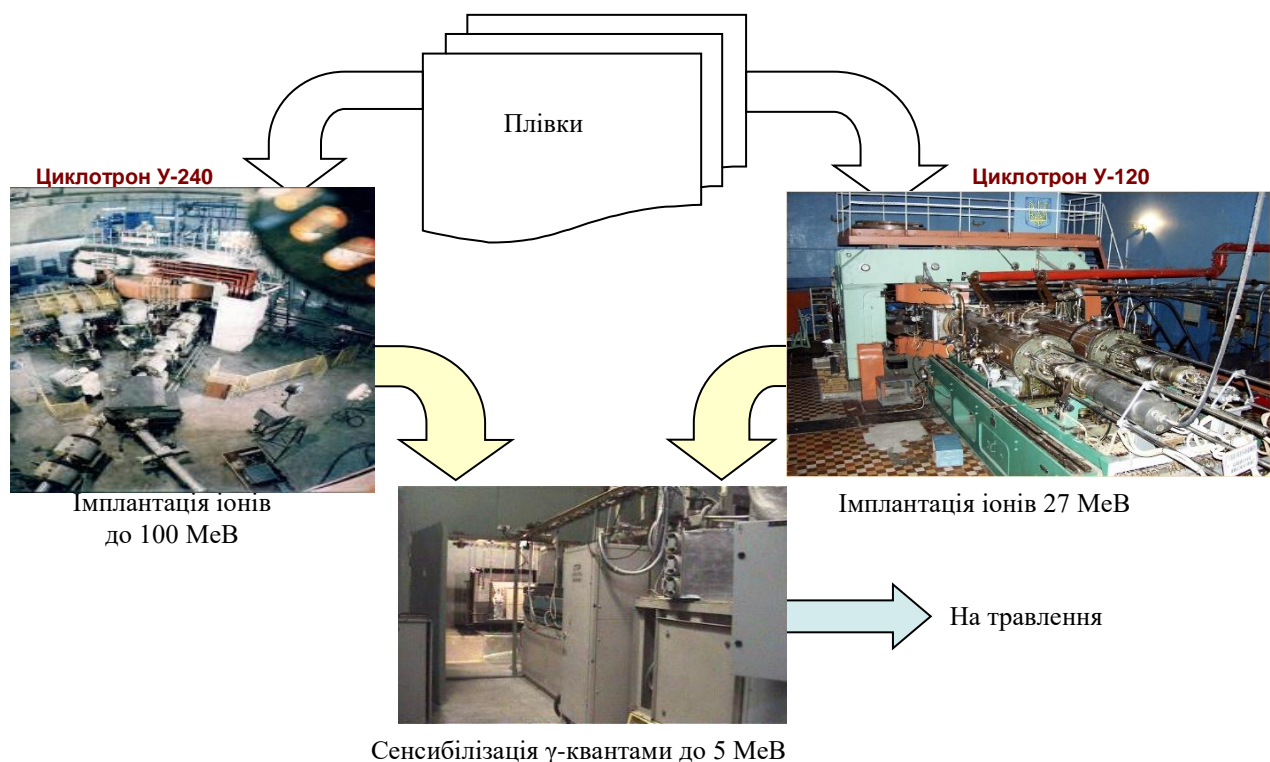


Рис. 4.17 Загальна структура комплексу імітатора та технологія виробництва ядерних мембран

Плівки поліціануратів відповідних розмірів від ІХВС НАН України поступають на циклотрони У-120 і У-240. Їх опромінюють з метою отримання треків. Після іонної імплантації плівки опромінюються електромагнітним випромінюванням пікометрового діапазону (іонізуючого) в діапазоні 0,1 – 4 MeV і повертаються в ІХВС для травлення і досліджень.

Для компонування такого комплексу проведена модернізація обладнання на ядерно-фізичних установках ІЯД з метою адаптації їх до виконання завдань програми досліджень. Найбільш вагомим доукомплектуванням – спеціально розроблені

на циклотронах засоби виводу в повітря альфа-частинок для опромінення плівок поліціануратів. В склад цих додаткових засобів входять пристособи для опромінення зразків плівок обмежених розмірів (30x40 мм) та зразків великої площі (100x150 мм). На циклотроні У-120 (рис. 4.18) вузол виводу дозволяє опромінювати альфа-частинками зразки великої площі шляхом механічного переміщення (сканування) матеріалу перед випускним вікном, як це показано на схемі.

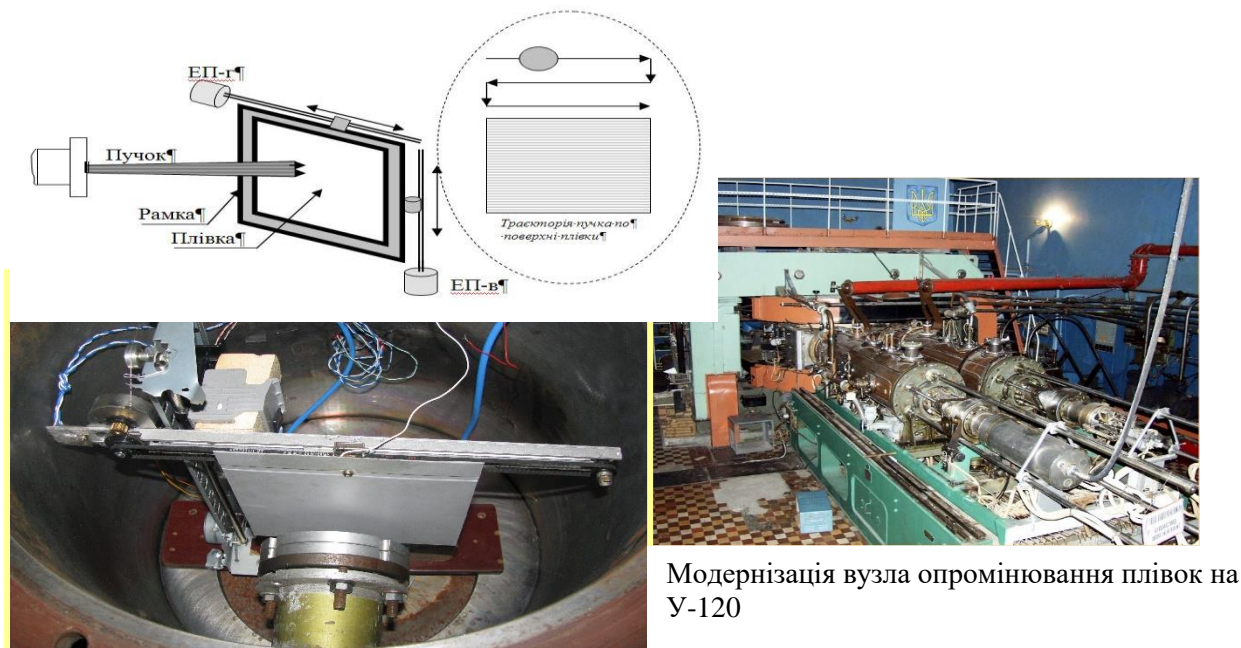


Рис. 4.18 Вузол виводу пучка, створений на циклотроні У-120 для опромінення плівок великої площі [78]

Вузол такого ж призначення, створений на циклотроні У-240, передбачає опромінення зразків дифузним пучком, розсіяним на фользі випускного вікна та атмосферою на шляху до матеріалу (рис. 4.18). Цей канал розрахований на опромінення промислових виробів з елементами мікрофільтрації і має технічне пристосування значних розмірів і вантажопідйомності для встановлення там необхідного експериментального обладнання. На цьому циклотроні передбачено пошуки енергетичної межі застосування альфа-частинок в діапазоні до 100 МеВ, щоб визначити максимально можливу товщину матеріалу для нанопористих матеріалів, при якій альфа-частинки ще не пошкоджують ядра атомів матеріалу і не виникає наведена радіація (рис. 4.19).

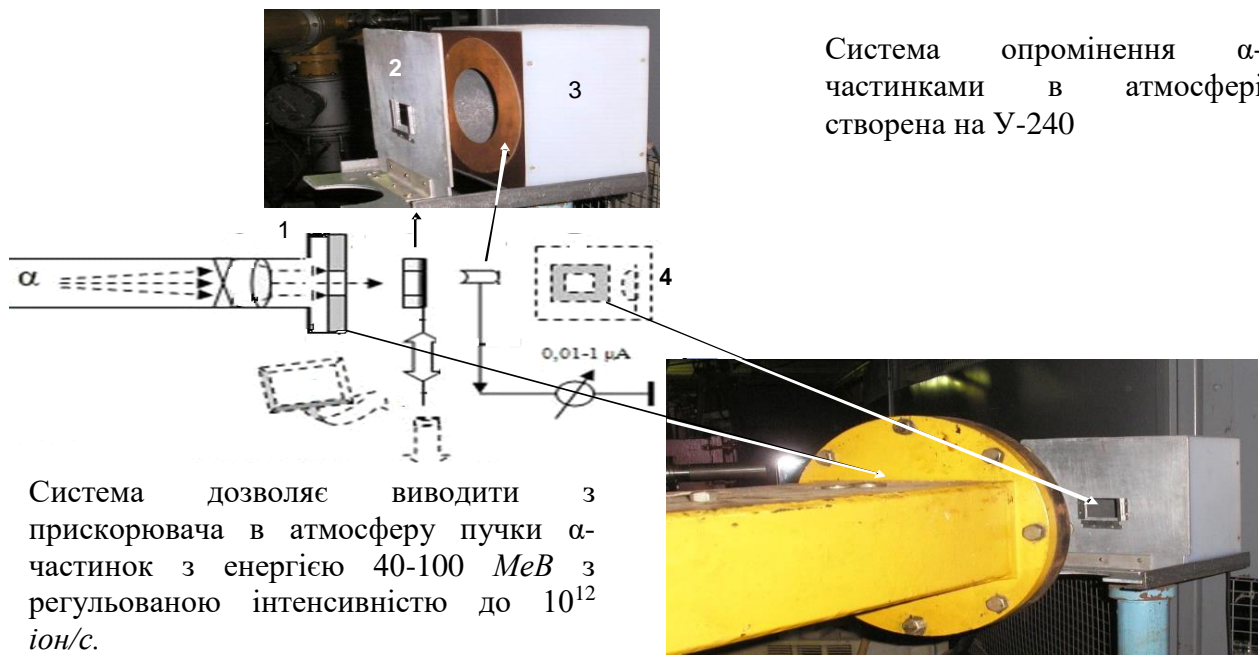


Рис. 4.19 Модернізація обладнання циклотрона У-240 для роботи в режимі імітатора

Система складається з випускного вікна пучка (1), камери прискорювача відділеної від атмосфери тонкою фольгою для мінімального впливу на енергію α-частинок. Вплив фольги на траєкторію пучка поза межами прискорювача компенсується відповідними магнітами перед фольгою. Назовні камери розташований утримувач рамок з плівками (біля випускної фольги) (2).

Альфа-частинки проходять практично без втрат через фольгу і бомбардують плівку. За плівкою розміщено циліндр Фарадея (3) для фіксації альфа-частинок, які пройшли через матеріал.

В результаті такої технічної модернізації на імітаторі ІЯД створена можливість участі в міжнародній програмі розробки нанопористих фільтрувальних матеріалів вітчизняного виробництва.

Процес сенсibilізації досліджується на радіаційній установці з метою регулювання ступеню структуризації полімерів на внутрішніх поверхнях треків. Це досягається регулюванням енергії гама-квантів, інтенсивності радіаційного поля, температури та контролем складу зовнішнього середовища в камері сенсibilізації. Фотонний генератор на основі прискорювача електронів 4 MeV забезпечує регульовану потужність потоку енергії випромінювання майже до 3 кВт, що не доступне іншим вітчизняним джерелам іонізуючого фотонного випромінювання.

### 4.3.2 Теоретичні дослідження і розрахунки

Розраховувалась очікувана початкова енергія альфа частинок з урахуванням усіх втрат на шляху надходження до матеріалу [159]. Була прорахована проникаюча здатність альфа-частинок різної енергії в матеріали різної щільності (рис. 4.20). Для обробки товстих матеріалів виправдано використання циклотрона У-240.

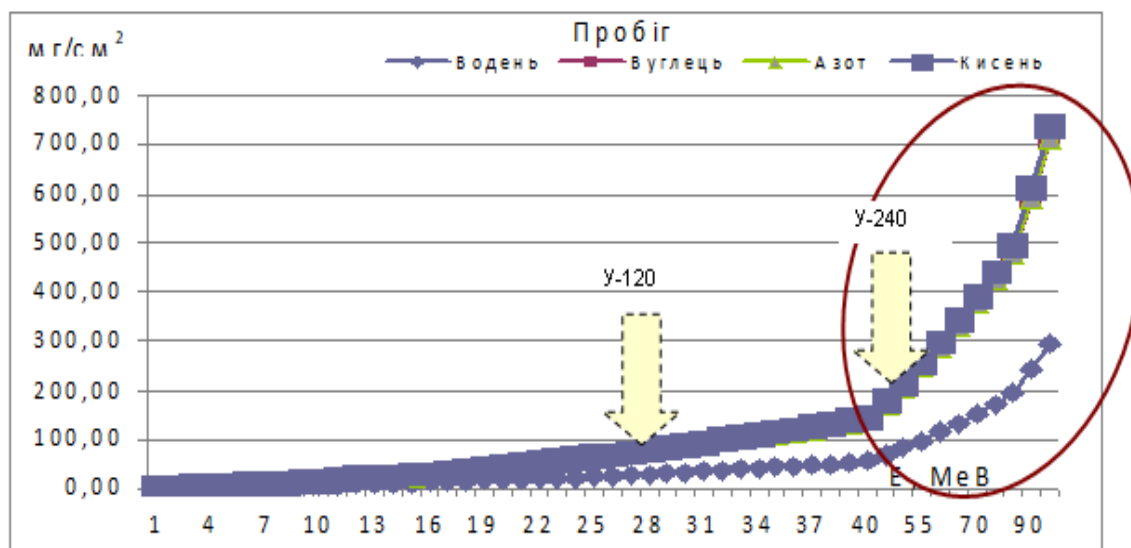


Рис. 4.20 Розрахункові графіки проходження альфа-частинок різних енергій через речовини

Характер втрати енергії для досліджених речовин однаковий і відрізняється лише нахилом похідних кривих на матеріалах різної щільності. Це свідчить, що подальші експерименти з полімерами групи ціануратів доцільно провести на двох прискорювачах – циклотроні У-120 при енергії альфа-частинок 27 MeV та на циклотроні У-240 з енергіями альфа-частинок 40-100 MeV. В таких дослідженнях можна встановити показники лінійності передачі енергії при проходженні через товсті шари полімерів, оцінити форми треків, їх щільність і ефекти активації атомів матеріалу.

Для розрахунків процесу на У-120 було прийнято, що початкова енергія на виході прискорювача дорівнює 27 MeV. Опромінення передбачено здійснювати в системі «фольга Si – повітря – матеріал».

Згідно таких положень вибрано схему опромінення, наведену на рис. 4.21.

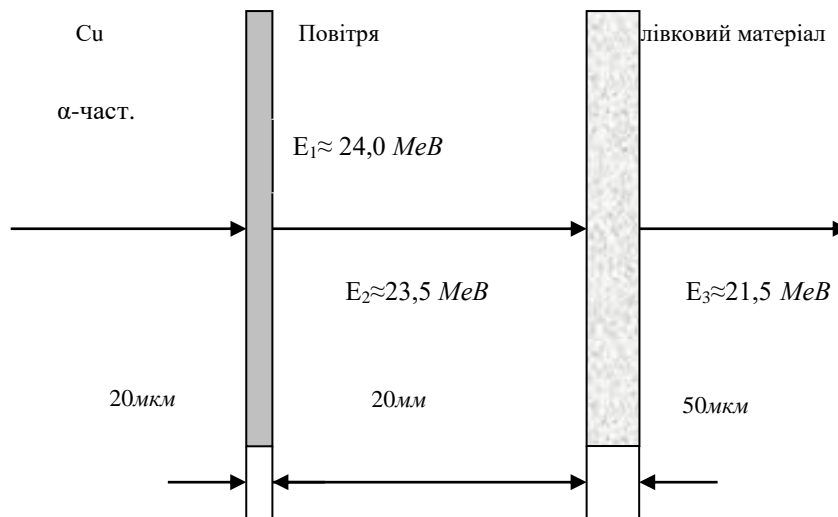


Рис. 4.21 Схема опромінення альфа-частинками плівкових матеріалів на циклотроні У-120 [78]

Було встановлено, що при опроміненні матеріалу на циклотроні У-120 енергія буде не менше 23,0-23,5 МеВ. Розрахунки не враховували реальної щільності матеріалу і вмісту там важких атомів, здатних активуватися. Перевірка розрахунків здійснювалась шляхом моделювання на матеріалах густиною 1,33 г/см<sup>3</sup>. Результати дають підставу стверджувати про можливість на циклотроні У-120 опромінювати товстіші плівки, в порівнянні з традиційними трековими мембранами. Енергії альфа-частинок на циклотроні У-120 достатньо для опромінення в атмосфері плівок завтовшки до 350 мкм. Але для спрощення вимог до оптичних властивостей нових полімерів, сенсibiliзація повинна здійснюватися фотонами високих енергій, здатними глибше проникати в товщу нових матеріалів, навіть якщо вони оптично щільніші. В даній структурі імітатора сенсibiliзація здійснюється високоенергетичним фотонами на радіаційній установці 4 МеВ.

### 4.3.3 Розрахунки геометрії треків

В розрахунках прийнято за мінімальну товщину матеріалу 50 мк, технологічно обмежену можливостями виробників. Глибину проникнення можна теоретично оцінити за формулою:

$$\lambda\xi = 0,1 T_0 / (13,5 \ln T_0 - 20,9 - 821/T_0),$$

де  $T_0$  – енергія іонів, eВ,  $\xi = \rho n/M$ ;  $\rho$  – густина,  $M$  – молекулярна маса,  $n$  – число валентних електронів в молекулі чи одиниці мономеру.

Розрахунки показали, що в матеріалі з такою товщиною альфа-частинки проходять з невеликими втратами енергії, і відповідно, мають незначне до 7-10 % відхилення від початого напрямку [23, 123, 159, 176]. Отже, можна очікувати отримання плівкових трекових мембран високої якості.

А рівномірний розподіл треків в матеріалі забезпечується технічним шляхом – сканування пучком, традиційне для будь-яких трекових технологій.

З цією метою були здійснені розробки спеціального вузла опромінення плівкових матеріалів в експериментальній камері циклотрону У-120.

#### **4.3.4 Експерименти і випробування**

Випробування можливостей імітатора в конфігурації з дейтронним циклотроном У-120 27 МеВ та радіаційною установкою 4 МеВ здійснювались на дослідних зразках поліціануратової плівки різної структури з товщиною 35-50-70 мкм.

Зразки (рис. 4.16) встановлювались в металеві рамки (4), вводилися під опромінення спеціальним пристроєм (8) і там бомбардувались альфа частинками. Процес контролювався спеціальними засобами промислової дозиметрії (5, 6, 7). Після опромінення плівки (8) виводилися з-під опромінення і передавались на сенсibilізацію в камеру (10) радіаційної установки (9) за допомогою гама-квантів різної енергії та різної дози. Після сенсibilізації зразки передавались на травлення і відмивання (11).

Така технологія мало чутлива до товщини плівок, не обмежує оптичні властивості матеріалу, дозволяє опромінювати як експериментальні зразки плівок, так і вже готові вироби з елементами мікрофільтрації. Собівартість виробництва ядерних мембран за даною технологією в декілька разів менша, за технології з використанням важких іонів.

Застосування альфа-частинок тут виправдане, вони прошивають матеріал з мінімальним відхиленням від прямої, важливий і унікальний показник якості ядерних мембран [35].

### 4.3.5 Організація вузла опромінення

Вузол опромінення плівок розташований на іонопроводі під кутом  $\theta=15^\circ$  від «прямого» пучка (рис. 4.22). На відстані 7 м від прискорювача.

Пучок альфа-частинок, прискорених до енергії  $E = 27,2$  МеВ, після виведення з прискорювальної камери циклотрона (Ц), через магнітні лінзи (M1 і M2) потрапляє в поворотний магніт (ПМ), де відхиляється на кут  $\theta = 15^\circ$  і по іонопроводу поступає у камеру опромінення (КО). Кінець іонопроводу закінчується діафрагмою Д, закритою мідною фольгою, для роз'єднання вакуумних об'ємів циклотрона і камери опромінення.

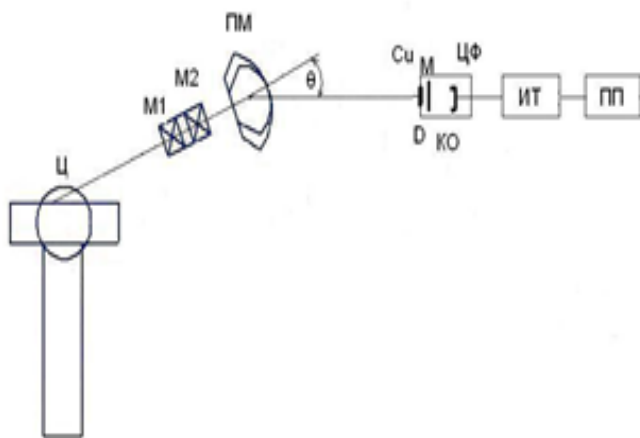


Рис. 4.22 Схема методики опромінення плівок на циклотроні У-120

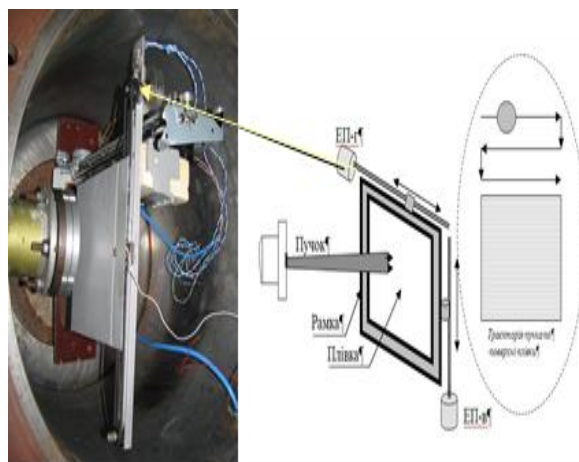


Рис. 4.23 Методика і технічна реалізація скануючого пристрою для опромінення листового полімерного матеріалу великих розмірів

Вузол опромінення доповнювався спеціально створеним електромеханічним сканером (рис. 4.23), який дозволяє опромінювати як „тонкі”, так і „товсті” зразки розміром до  $150 \times 150$  мм<sup>2</sup> [78, 159].

### 4.3.6 Методика експериментів та отримані на імітаторі результати

Плівкові полімерні матеріали опромінювались альфа-частинками 27 MeV при середній величині струму пучка – 20 нА. Діаметр пучка – близько 10 мм. Сканер пересував зразок в горизонтальній площині зі швидкістю  $\approx 0,5$  см/с, величина кроку пересування зразка у вертикальній площині – 5 мм. Кількість альфа-частинок, що пройшли через зразок визначалася за показаннями перерахункового приладу від імпульсів інтегратора струму. Отриманий попередньо коефіцієнт перетворення використовуваного інтегратора струму становив 28,62 відліків/с. Кількість альфа-частинок, що пройшли через зразок і потрапили на ЦФ визначалась як  $N_\alpha = 1,083 \cdot 10^8 N_{\text{пф}}$ , де  $N_{\text{пф}}$  – показники перерахункового приладу. Площа сканування була  $S = 15 \times 15$  см<sup>2</sup>, тому щільність альфа-частинок, що пройшли через зразок становила  $n_\alpha = N_\alpha / S$

Зразки являли собою полімерні плівки, які були синтезовані в ІХВС НАН України з диціанового етеру бісфенола Е, ДЦБЕ, (або бісфенола А, ДЦБА) *in situ* з поліокситетраметиленгліколем, ПТМГ [78]. Товщина зразків розміром 150x150 мм<sup>2</sup> коливалась від 30 до 60 мкм.

Випробувано оригінальну методику отримання термостійких плівкових нанопористих матеріалів з новітніх вітчизняних матеріалів виробництва ІХВС НАН України у рамках виконання міжнародної науково-практичної програми асоційованої європейської лабораторії LIA POLYNANOPOR.

Параметри отриманих на імітаторі мембран досліджувались в умовах європейської лабораторії в університетах Парижу (Франція). Було підтверджено, що отримані ядерні фільтри (рис. 4.24) мають очікувані нами характеристики.



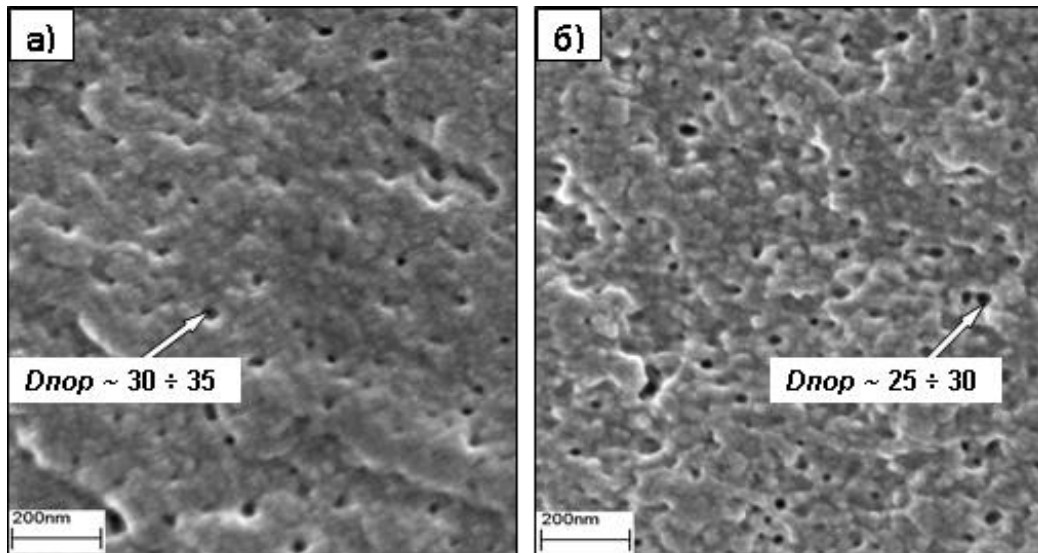


Рис. 4.24 Мікрофото перших мембран з поліціанурату, отримані з використанням імітатора в складі циклотрону 27 MeV та сенсibilізовані гама-квантами на радіаційній установці 4MeV

Випробування плівок в режимі фільтрації газів підтвердив, що утворюються наскрізні отвори з необхідними розмірами.

#### 4.3.7 Розробка методів і засобів оперативної метрології в радіаційних процесах

Для оперативної метрології технологічних результатів на кожному етапі досліджень, запропоновано електронний метод шляхом вимірювання діелектричних параметрів плівок (рис. 4.25) та компактний прилад для здійснення цього методу (рис. 4.26). При розробці методу виходили з того, що будь-який полімер має властиві йому діелектричні показники. При радіаційній обробці в плівці утворюються зони деструктованого полімеру та нагромаджуються заряди в результаті вибивання з зовнішніх оболонок атомів ковалентних електронів. Результуючі діелектричні показники такого насиченого зарядами полімеру навіть теоретично не можуть не змінитися. А вже після травлення в полімері виникають численні пори і змінюються його діелектричні показники [198].

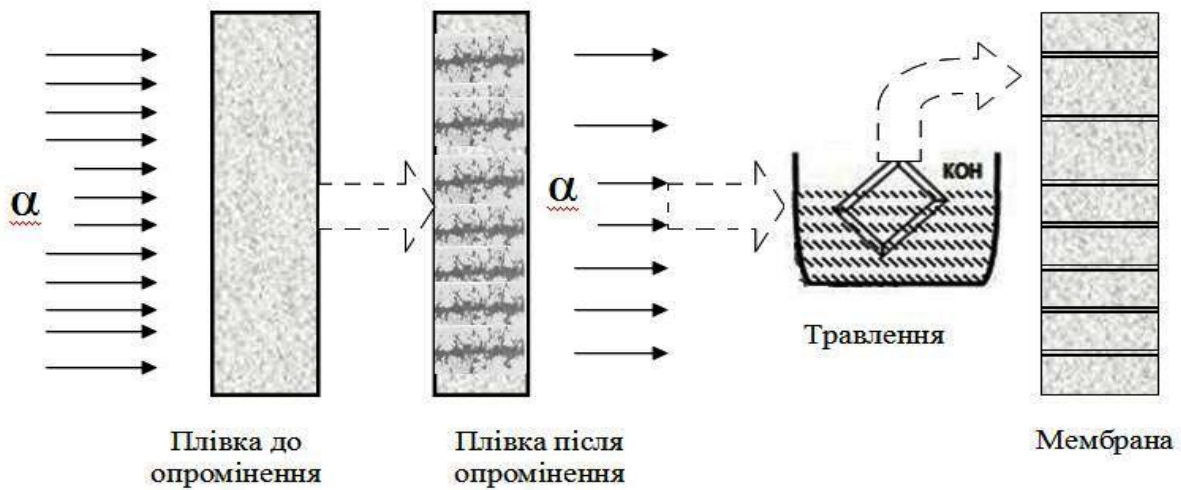


Рис. 4.25 Метод контролю електричних характеристик плівок на різних етапах виготовлення ядерних мембран

Очікується ефект від нагромаджених в плівках електричних зарядів, якщо це не буде полімер з наперед заданими низькими діелектричними показниками.

Для отримання і обробки інформації розроблено спеціалізований пристрій (рис. 4.26).

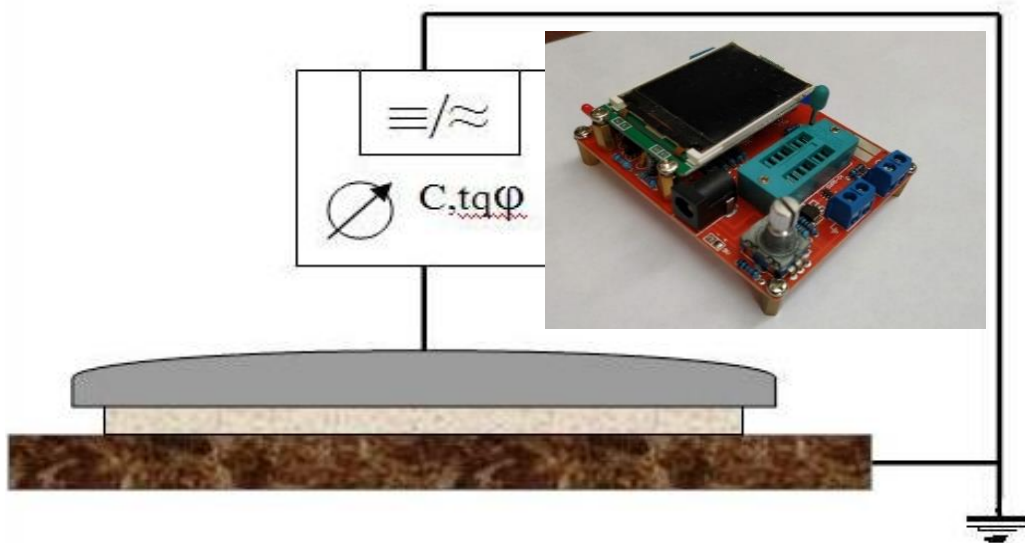


Рис. 4.26 Схема пристрою для оперативного контролю електричних параметрів плівок на усіх етапах виготовлення треківих мембран

Це компактна система, яка складається з вимірювального конденсатора та електронного блоку обробки [176].

### **4.3.8 Технологічні особливості радіаційної сенсibilізації**

Встановлено, що більш легкі іони глибше проникають в полімерні матеріали, однак слабше іонізують атоми вздовж треків. І навпаки, важкі іони іонізують сильніше, але проникають в матеріал менше. В обох випадках, треки утворюються, але різної інтенсивності. Тому при переході на глибоко проникаючі іони необхідно відшукати шляхи підвищення “яскравості” слідів аж до утворення суцільних треків. Цього можна досягнути різними технологіями сенсibilізації з метою забезпечення проникнення розчинів травлення до треку. А на якому етапі це краще зробити при розробці нових нанопористих матеріалів, на етапі виготовлення полімеру чи перед травленням, необхідно з’ясувати окремо. Кінцева мета – зробити слід від іонів суцільним і, по можливості, об’ємним.

Тут бажано реалізувати процес твердофазної полімеризації пошкодженого полімеру в треках, з метою ущільнення розпушеного матеріалу і формування у внутрішніх шарах рівномірної внутрішньої поверхні треків. Це сприяє процесам витравлювання треків, бо сформовані у треках шари матеріалу відрізняються структурою від основного полімеру і менш стійкі до дії лугів.

### **4.3.9 Радіаційні функціональні дослідження і кваліфікація плівок поліціануратів**

З метою встановлення радіаційної стійкості нових термостійких полімерів вітчизняного виробництва необхідно було вирішити ряд завдань:

- Розробити методику, адаптувати технічні засоби і провести радіаційну випробування зразків полімерів групи поліціануратів.
- Провести дослідження радіаційної стійкості наданих полімерів.
- Дослідити можливості кваліфікації тонких плівок поліціануратів на придатність для виготовлення ядерних мембран.

Об’єктом досліджень були нові типи полімерів групи поліціануратів, розроблених фахівцями ІХВС НАН України – композитів, отриманих шляхом *in situ*

поліциклотримеризації диціанового естеру бісфенолу Е, ДЦБЕ, за присутності диметилфталату (ДМФ), складу ПЦ/ДМФ=70/30 мас. %.

Визначалася допустимість радіаційної сенсibilізації плівок високоенергетичними випромінюванням у великих дозах. Радіаційну сенсibilізацію було спрямовано на вирівнювання структури матеріалу в треках для подальшого травлення. В традиційних трекових технологіях це не використовувалось. Виникло запитання про надійність (функціональність) мембран після опромінення великими дозами гама-випромінювання при її сенсibilізації. Попередні оцінки свідчать, що для модифікації щільних структур полімерів в плівках великої товщини можливі варіанти опромінювання дозами до 200 кГр.

Це досліджено на радіаційній техніці в режимі стандартного випробування плівок поліціануратів на радіаційну стійкість [159, 166], де є вимогою виконання певних вимог [123, 125], які наведені в таблиці 4.3.

Таблиця 4.3

Стандарти досліджень полімерів на радіаційну стійкість

| Умови випробувань                          | Нормативні вимоги   | Вимоги до установок  |
|--|---|--|
| Маса зразків (об'єктів)                    | Не регламентується  |  |
| Параметри радіаційних полів                | $\beta$ -випромінювання (електрони),<br>$\gamma$ -випромінювання, та змішані $\beta/\gamma$<br>поля з контрольованим вмістом<br>чинників радіації | регулювання<br>співвідношень<br>чинників радіації            |
| Забезпечення дози<br>опромінення           | до $(1-5)10^6$ Гр   | потужність дози<br>випромінювання до<br>$10^3$ Гр/год.;      |
| Інтенсивність радіаційного<br>навантаження | до $1 \cdot 10^3$ Гр/год.   | від 0,1 Гр/год.<br>до $14,4 \cdot 10^6$ Гр/год.              |
| Контроль процесів<br>опромінювання         | до 8 %  | стандартизовані засоби<br>контролю в складі                  |
| Дозиметрія опромінення                     | до 20 %   | індикаторні фотохімічні<br>плівки: ЦВИД,<br>СОПД(Ф)-5/150 та |
| Час опромінення                            | від 100 до 1000 годин   | до 8 годин безперервної<br>роботи                            |
| Нестабільність опромінювання               | До 8 %  | дрейф радіаційних<br>параметрів установок не<br>більше 20 %  |

Для кваліфікації плівок використовуються інтенсивні потоки іонізуючих випромінювань з широким енергетичним спектром. Для цього використано одне

потужне джерело з пристроями трансформації енергії випромінювання в різні види радіації й одночасного формування їх енергетичного складу в радіаційних полях.

Проведені за допомогою радіації випробування надають об'єктивну підставу кваліфікувати матеріал на придатність застосовувати їх під визначені цілі [166]. Здійснення пов'язане з вирішенням низки проблем опромінювання надзвичайно тонких полімерних плівок великими дозами іонізуючої радіації для контролю можливих радіаційно-хімічних перетворень і структурної деградації.

Проведені попередні дослідження, спрямовані на пошуки оптимальних шляхів використання для кваліфікації плівок єдиного потужного джерела мегавольтних електронів. Поняття «функціональність матеріалу» визначає ефективність експлуатації готових полімерних виробів, а також, прогноз стабільності матеріалу на усіх етапах їх виготовлення та експлуатації. Функціональна придатність полімерів для практичного використання визначається структурою енергетичних зв'язків атомів в органічних сполуках, хімічним складом органіки, фізичними характеристиками (міцністю, термостійкістю, електропровідністю, густиною).

Радіація, як інструмент кваліфікації, приваблює багатокomпонентними процесами поглинання енергії випромінювань в матеріалі, ланцюгами процесів її трансформації в інші види [154] і таким чином впливає на усі функціонально значимі параметри полімерів з переліку тих, що можуть надійно контролюватися.

Для коректного вивчення динаміки функціональних показників полімерних плівок важливо знайти оптимальні методи передачі енергії радіації в досліджувані зразки. Головною є проблема узгодження товщини плівки з довжиною пробігу електронів в ній до повного гальмування. Самим прямим шляхом вирішення цієї проблеми для плівок 15-30 мкм є зниження енергії електронів до 50 - 200 кеВ. Але в складі імітатора такого джерела не передбачено тому було розроблено технологію багатопараметрового кваліфікаційного дослідження полімерних плівок на одному мегавольтному прискорювачі електронів [78, 177].

#### 4.3.10 Розробка методики функціональних досліджень полімерних плівок

Методика радіаційних кваліфікаційних досліджень включає формування необхідних радіаційних полів та створення підпучкового обладнання для опромінювання дослідних зразків. Завданням і специфікою розробки методики було подолання проблеми слабого поглинання енергії мегавольтних електронів полімерними виробами завтовшки усього кілька десятків мікрон. Метою є формування структури і складу радіаційного поля, оптимального для подолання цих проблем.

В основу ідеї формування необхідних радіаційних полів (рис. 4.27) покладена суперпозиція поля прямих мегавольтних електронів  $W$ , електромагнітного пікохвильового випромінювання ( $\gamma$ -квантів  $h\nu$ ) та низькоенергетичних електронів  $W_e$ , які утворюються внаслідок конверсії енергії прямого пучка електронів, що пройшов через плівку, на важкій мішені-підложці.

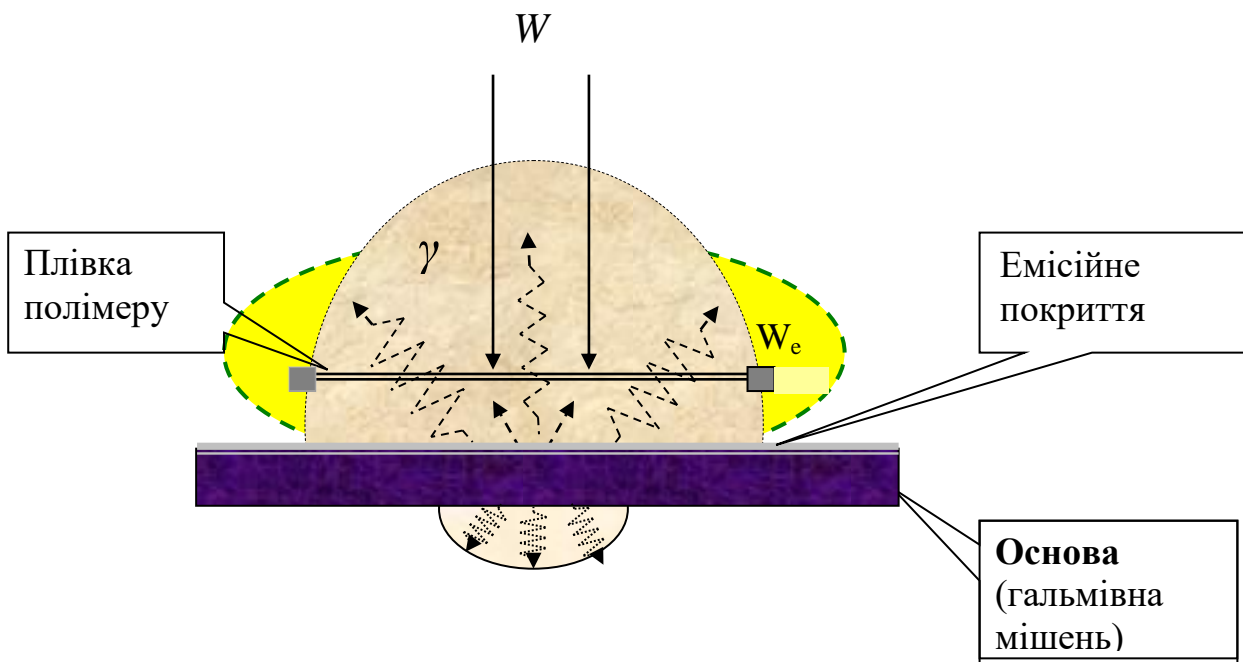


Рис. 4.27 Схема формування комбінованого радіаційного поля для функціональних випробувань полімерних плівок [176]

Ідея реалізується на імітаторі в каналі сенсibilізації спеціальною конструкцією мішеневого вузла, де передбачається закріплення дослідних зразків плівок в рамках. При опромінюванні цього вузла прямими мегавольтними електронами  $e^-$  в місці розташування зразків плівки утворюється вказана суперпозиція полів прямих та вторинних електронів і гальмівного випромінювання.

При розробці конструкції використано канонічну модель передачі енергії електронного випромінювання в матеріали, яку реалізовано шляхом встановлення товстої гальмівної мішені-підложки на шляху мегавольтних електронів прямого пучка після його проходження через досліджувальну плівку рис. 4.27.

При бомбардуванні мегавольтними електронами в мішені генеруються гальмівні випромінювання ( $\gamma$ ) з широким енергетичним спектром в пікохвильовому діапазоні електромагнітних хвиль, вторинні електрони ( $W_e$ ) та інфрачервоне випромінювання (ІЧВ). В залежності від параметрів мішені потужність пучка падаючих електронів між вказаними ефектами розподіляється нерівномірно. При бомбардуванні, наприклад електронами 1 MeV мішені з вольфраму [54, 56], у гальмівне випромінювання (згідно формули  $k = W_e z / 800$ , де  $W_e$  – кінетична енергія електронів, MeV,  $z$  – заряд ядра,  $k$  – коефіцієнт перетворення) трансформується не більше 3% енергії пучка, у вторинні електрони –  $\approx 10\%$ , у ІЧ-випромінювання –  $\approx 87\%$ . Такий же нерівномірний розподіл цих випромінювань у просторі. Теплова енергія в основному поширюється у напрямку первинного пучка електронів, вторинні електрони на товстій мішені в основному генеруються проти напрямку руху первинного пучка в діапазоні кутів до  $0-2\pi$  від точки взаємодії електронів з матеріалом. Гальмівне випромінювання від падаючих електронів цього діапазону енергії поширюються в просторі на кути близькі до  $4\pi$ . Товщину гальмівної мішені збільшено для спрямування основного потоку тепла (інфрачервоного випромінювання – ІЧВ) в сторону досліджуваної плівки, а також для підвищення ефективності емісії вторинних електронів шляхом нанесення на робочу поверхню гальмівної мішені матеріалу з великим коефіцієнтом електронної емісії та ефективним генеруванням зворотно-розсіяних гама-квантів.

Радіаційні випробування електронами за наведеною схемою дозволяють отримувати великий об'єм інформації не тільки про структуру матеріалу, але і про його фізичні характеристики – термостійкість, щільність, густину тощо – усі параметри, що характеризують функціональну придатність матеріалу.

#### 4.3.11 Результати функціональних досліджень плівок поліціануратів

Стійкість до радіаційного опромінення вивчали для композитів, отриманих шляхом *in situ* поліциклотримеризації диціанового естеру бісфенолу Е, ДЦБЕ, за присутності диметилфталату (ДМФ), складу ПЦ/ДМФ=70/30 мас.%. Зміну в хімічній структурі вивчали фахівці ІХВС НАН України за допомогою методу ІЧ-спектроскопії з використанням спектрометра Tensor 37 фірми Bruker з Фур'є перетворенням в діапазоні частот 4000-600  $\text{cm}^{-1}$ . Для кожного спектра усереднено 32 послідовних сканів із розподільною здатністю 4  $\text{cm}^{-1}$ .

На рис. 4.28 наведено ІЧ-спектри вихідного композиту ПЦ/ДМФ і композиту, опроміненого  $\gamma$ -променями дозою 200 кГр – ПЦ/ДМФ<sub>200</sub>.

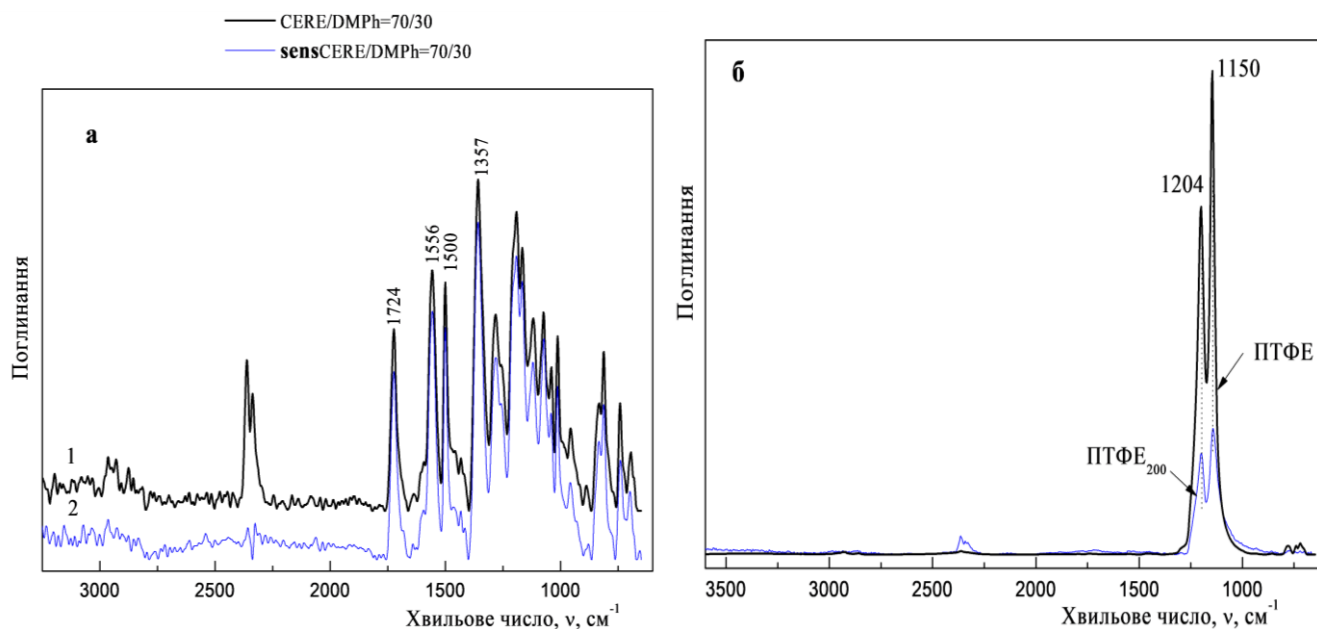


Рис. 4.28 ІЧ спектри досліджуваних композитів: (а) вихідного ПЦ/ДМФ (1) і опроміненого (2) ПЦ/ДМФ<sub>200</sub>; (б) вихідного (ПТФЕ) і опроміненого політетрафторетилену (ПТФЕ<sub>200</sub>) [176]



На спектрах обох композитів присутні смуги поглинання із максимумами  $1357\text{ см}^{-1}$  та  $1556\text{ см}^{-1}$ , що відповідають валентним коливанням N–C зв'язків із N–C–O груп та C=N зв'язків із C=N–C поліціануратних циклів ПЦС, відповідно. Окрім того, смуга при  $1724\text{ см}^{-1}$  відноситься до валентних коливань C=O–груп ДМФ.

Порівняння цих двох спектрів виявило, що застосування опромінення (сенсibilізації) практично не впливає на хімічну структуру досліджуваних ПЦ/ДМФ композитів, оскільки інтенсивності основних смуг поглинання майже не змінюють своєї інтенсивності внаслідок опромінення  $\gamma$ -променями дозою  $200\text{ кГр}$ . Для порівняння було досліджено хімічну структуру зразку політетрафторетилену (ПТФЕ), який використовували як підложку при опроміненні. На рис. 4.28 (б) наведено ІЧ-спектри вихідного ПТФЕ і ПТФЕ<sub>200</sub> (опроміненого  $\gamma$ -променями дозою  $200\text{ кГр}$ ). Чітко видно, що після опромінення різко падає інтенсивність піків при  $1204$  і  $1150\text{ см}^{-1}$ , що відповідають симетричним і асиметричним  $\text{CF}_2$  і C–C валентним коливанням. Причиною таких змін хімічної структури досліджуваних зразків ПТФЕ є руйнування хімічних зв'язків у полімері з наступним обривом полімерних ланцюгів в процесі опромінення.

Методом ІЧ-спектроскопії з Фур'є перетворенням доведено, що термостійкі полімерні композити розроблені в ІХВС НАН України на основі ціанового естеру бісфенолу Е стійкі до дії іонізуючої радіації ( $\beta$ - і  $\gamma$ -променів) дозою  $200\text{ кГр}$ .

Підтверджено, що радіація, як інструмент матеріалознавчих досліджень, приваблює багатокомпонентними процесами трансформації енергії випромінювань у матеріалі. Енергія, передана випромінюваннями, впливає практично на усі функціонально значимі параметри полімерів з переліку тих, що можуть надійно контролюватися сучасними метрологічними засобами. Тому можливості радіації здійснювати дослідження і сертифікацію (кваліфікацію) широкого кола матеріалів і обладнання є недосяжні ніяким іншим відомим методам. Така можливість може бути корисна для виробництва органічних матеріалів, якщо планується їх промислове застосування. В даний час спостерігається зростання об'ємів полімерів для виготовлення вузлів критичного обладнання, наприклад, ядерних мембран, відповідального обладнання атомних енергетичних об'єктів. Особливо високі

вимоги пред'являються до характеристик матеріалів, що використовуються, наприклад, в атомній енергетиці [177].

Враховуючи, що іонізуючі випромінювання відносяться до фізичних факторів сильної дії, такі дослідження повинні передувати вирішенню питань про подальше проектування технології ядерних мембран з даним матеріалом.

Одночасно виявлена і обґрунтована перспектива застосування поліціануратів в обладнанні для критичних галузей економіки. А таке обладнання займає значний об'єм у комплексах ядерної енергетики, авіації, космонавтиці, медицині. Згідно стандартів на радіаційні випробування для найбільш навантажених об'єктів – атомних ядерних енергетичних установок – усе обладнання, яке знаходиться в герметичних зонах ядерних реакторів повинно витримувати дію радіації тривалий час стаціонарної експлуатації, а також при аварійних ситуаціях. В ядерній галузі вважається доцільним випробовувати критичне обладнання на стійкість до тривалої дії радіації з повним набором поглинутої дози до 5000 кГр. В ядерній енергетиці прийнятну для технічного використання точність радіаційних досліджень можна досягти шляхом зменшення пливку потужності дози на результати випробувань радіаційної стійкості полімерів [180]. Такої похибки можна уникнути при інтенсивності опромінення нижче  $1 \cdot 10^3$  Гр/год. Це відповідає практиці опромінення багатьох європейських країн. Результатами таких випробувань є контроль за збереженням матеріалом своїх технічних властивостей. Питання функціональної стійкості (придатності для використання) матеріалу визначає виробник, орієнтуючись на надану йому інформацію про параметри радіаційного процесу.

#### **4.3.12 Висновки**

Проведено радіаційне функціональне випробування нових полімерних матеріалів українського виробництва на стійкість до дії радіації з урахуванням діючих міжнародних стандартів на радіаційну обробку і метрологію радіаційних процесів в полімерах.

*Наукове значення.* Досліджено діапазон радіаційної стійкості нових типів полімерів з групи поліціануратів українського виробництва.

*Практична цінність.* Визначено перспективу технічного використання нового полімеру в конструкціях обладнання АЕС, критичного для надійності функціонування об'єктів.

Встановлено, що поліціанурати на ядерних об'єктах рекомендовано застосовувати у вигляді тонких виробів та плівок, товщина яких суттєво менша за довжину перебігу падаючих електронів (бета-випромінювання). В іншому випадку неодмінно виникатимуть області з нагромадженими зарядами, іонізація і деструкція матеріалу. Масивні деталі з поліціануратів можливо застосовувати при упевненості, що головним чинником іонізації матеріалу будуть гама-кванти і радіаційно-обумовлена деструкція буде відбуватися повільніше та рівномірно по усьому об'єму виробів. В цьому випадку їх надійність повинна забезпечуватися чіткими граничними строками служби в умовах дії радіації та відповідним сервісом обладнання (регламентними роботами).

Структура технічних засобів імітатора надала можливості реалізувати методику досліджень полімерних матеріалів в різному агрегатному стані, в тому числі для випробувань тонких рідких зразків мономерів.

Створення імітатора забезпечило виконання Програми досліджень Міжнародної асоційованої лабораторії при розробці нових нанопористих матеріалів

На практиці доведено, що імітатори на базі різноманітних ядерно-фізичних установок є шляхом до прискореного здійснення великих науково-дослідних Програм, важливих для прискореного розвитку в різних галузях економіки з використанням унікальних властивостей іонізуючих випромінювань модифікувати широку гаму матеріалів.

На даному імітаторі, одночасно з вирішенням основного завдання – розробки інноваційної технології термостійких ядерних мембран підвищеної міцності, вирішено і програму кваліфікації плівкових виробів з поліціануратів, як можливого ізоляційного матеріалу в складі критичного обладнання для ядерної енергетики. Це здійснено за рахунок оригінальної методики радіаційної обробки тонких плівок з полімерних матеріалів мегавольтними електронами.

#### **4.4 Технічний комплекс імітації критичних ситуацій, що пов'язані з проблемами безпечного поводження з ядерною енергією**

Мета розробки – створення сучасного ядерного технічного комплексу для колективного використання фахівцями вітчизняної науки і техніки, оборонної галузі, у промисловому виробництві, медицині та освіті.

Актуальність і важливість визначається необхідністю термінової реакції на динаміку геополітичних процесів та соціально-економічних проблем в Україні. Тут спостерігається відсутність в профільних науково-дослідних і проектних організаціях технічної бази для таких робіт. А ядерна техніка належить до переліку дорогих технічних засобів і в даний час практично недоступна для більшості зацікавлених організацій.

Завданням є створення радіаційного технічного комплексу, який дозволить імітувати уражуючі фактори, властиві ядерному впливу на живу і неживу матерію (матеріали і живі організми), ідентичні тим, що виникають при застосуванні ядерної зброї, в ядерній медицині, при аваріях на ядерних енергетичних установках, ядерних технологіях.

Метою є підключення до практичного використання широким науковим загалом України унікального комплексу ядерної техніки, яка вже є в ІЯД і в яку вже вкладено надзвичайно великі кошти. Перелік і характеристики ядерно-фізичної техніки ІЯД було описано в попередніх розділах роботи. На його основі фахівці різних галузей науки і техніки отримають можливість проводити дослідження і розробки з усіма чинниками ядерної енергії. А відповідно, отримають технічні можливості створення інноваційних методів застосування ядерної енергії та енергії іонізуючих випромінювань для вирішення актуальних проблем сучасного суспільства (ядерної і радіаційної безпеки, охорони здоров'я, новітніх промислових технологій).

#### 4.4.1 Актуальність напрямку

Актуальність здійснення таких досліджень ілюструється рис. 4.29.

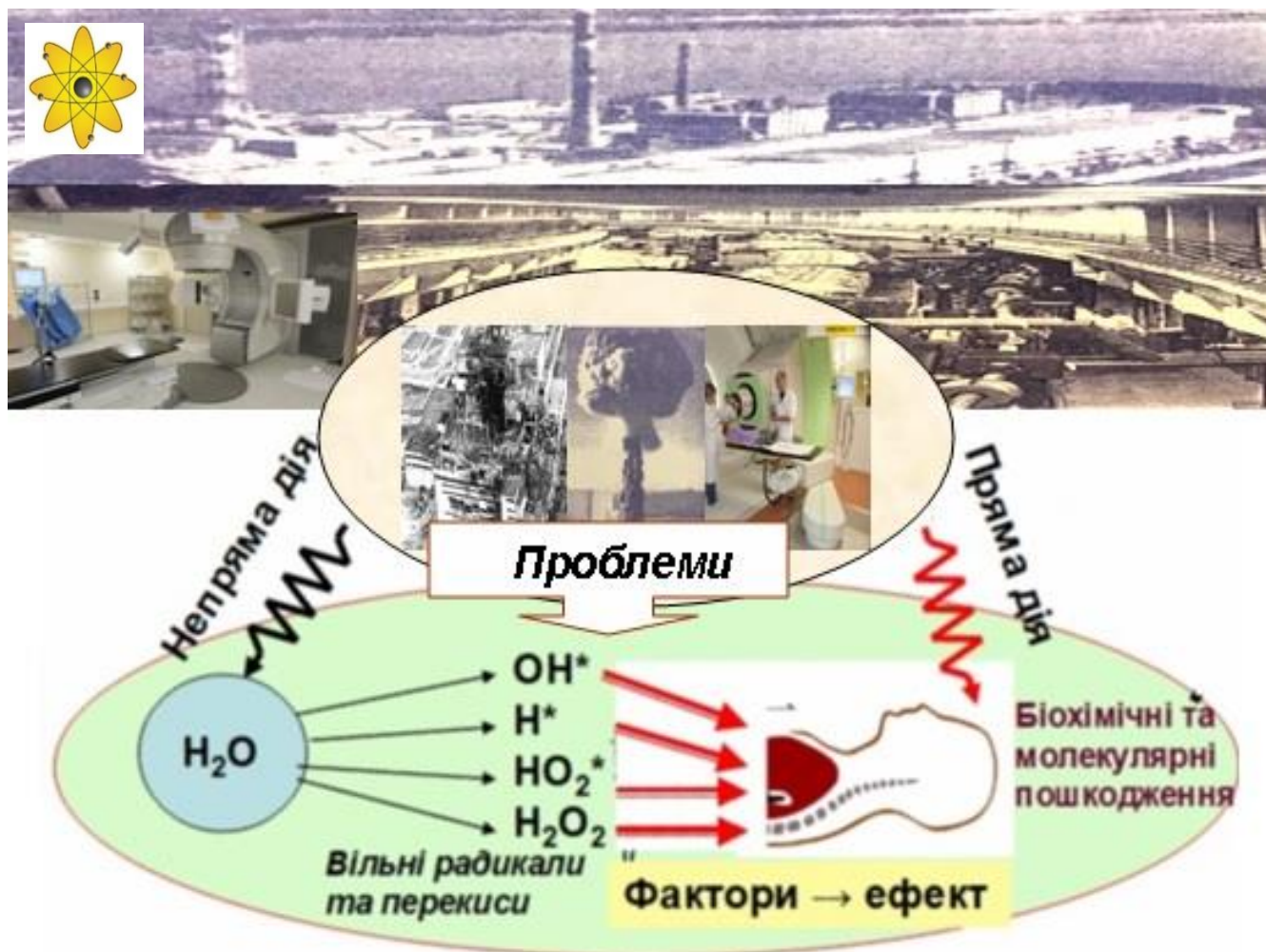


Рис. 4.29 Актуальні проблеми безпечного поводження з ядерною енергією [165]

1. Ліквідація можливих техногенних аварій на сучасних потужних ядерних об'єктах ядерної енергетики – досвід Японії, міністерства охорони здоров'я України, Росії, Білорусії (аварія на ЧАЕС).

2. Досвід лікування наслідків помилок в застосуванні ядерних технологій в онкології та віддалених наслідків професійної діяльності робітників ядерної галузі.

3. У світі de-facto виникла загроза глобальних конфліктів з застосуванням ядерної зброї обмеженої потужності, про превентивну можливість застосування якої офіційно заявили країни, що нею володіють. Надзвичайно актуально мати недорогі

та дієві методи лікування та реабілітації великої чисельності цивільного населення, яке постраждає в таких конфліктах.

*Актуальність економічна.* Даний проект є найбільш простим шляхом досягнення вказаних цілей і є вирішенням складної економічної проблеми в Україні, бо не вимагатиме великих фінансових витрат, які за міжнародними цінами становлять \$160-240 млн. на придбання установок не самої великої потужності.

Створений в ІЯД ядерний технічний комплекс надасть можливість виконання в Україні широкого кола високопрофесійних досліджень і розробок, що сприятиме підвищенню науково-технічного рівня вітчизняної економіки.

Інформації про комплексі програми таких досліджень не знайдено. Є лише наукові роботи по окремих проблемах, пов'язаних з використанням ядерної енергії.

#### **4.4.2 Напрямки розробки**

Розробка ґрунтується на результатах попередніх пошукових науково-дослідних робіт та технологічних розробках, виконаних в ІЯД НАН України та у деяких споріднених медичних закладах. В основу покладена ідея використання усіх видів необхідних іонізуючих випромінювань, отриманих за допомогою електрофізичної техніки, шляхом перетворення електричної енергії в енергію випромінювань замість використання ізотопних джерел випромінювань та ядерної техніки з радіоактивними матеріалами. Метою є створення екологічно-безпечного комплексу ядерно-фізичної техніки високої потужності з глибоким регулюванням характеристик при виконанні самих жорстких вимог промислової та радіаційної безпеки практичного використання.

Передбачено з їхньою допомогою в обмеженому об'ємі експериментального приміщення з потужним протирадіаційним захистом (імітувати) відтворювати уражуючі фактори від різних чинників ядерних випромінювань та суперпозицій радіаційних полів з  $\gamma$ -випромінювання, потоків  $\beta$ -випромінювання,  $\alpha$ -частинок та нейтронних потоків (n) – усі в діапазоні енергій, властивих різноманітним ядерним

процесам при використанні ядерної зброї, в ядерній енергетиці, ядерній медицині, промисловості.

Досліджено і встановлено, що важливою перевагою наведеного методу імітації, наприклад, на прискорювачах електронів є генерація не тільки основних ядерних факторів ураження, а й супутніх процесів радіолізу зовнішнього середовища – іонізованої атмосфери, вологи та інших складових іонізації атмосфери ( $O_2^-$ ,  $O_3$ ,  $N$  та ін. аероіонів). Приваблює можливість утворювати суперпозиції радіаційних полів різного складу відповідним вибором типу і конфігурації підпучкових мішеней.

#### 4.4.3 Дослідження і формування технічних вимог до імітатора

Досліджено опубліковані дані щодо переліку і значимості радіаційних факторів в різних сферах використання іонізуючих випромінювань. Перелік спектрів іонізуючих випромінювань визначено з даних МАГАТЕ, щодо напрацювання ізотопів у реакторах ядерної енергетики (рис. 4.30).

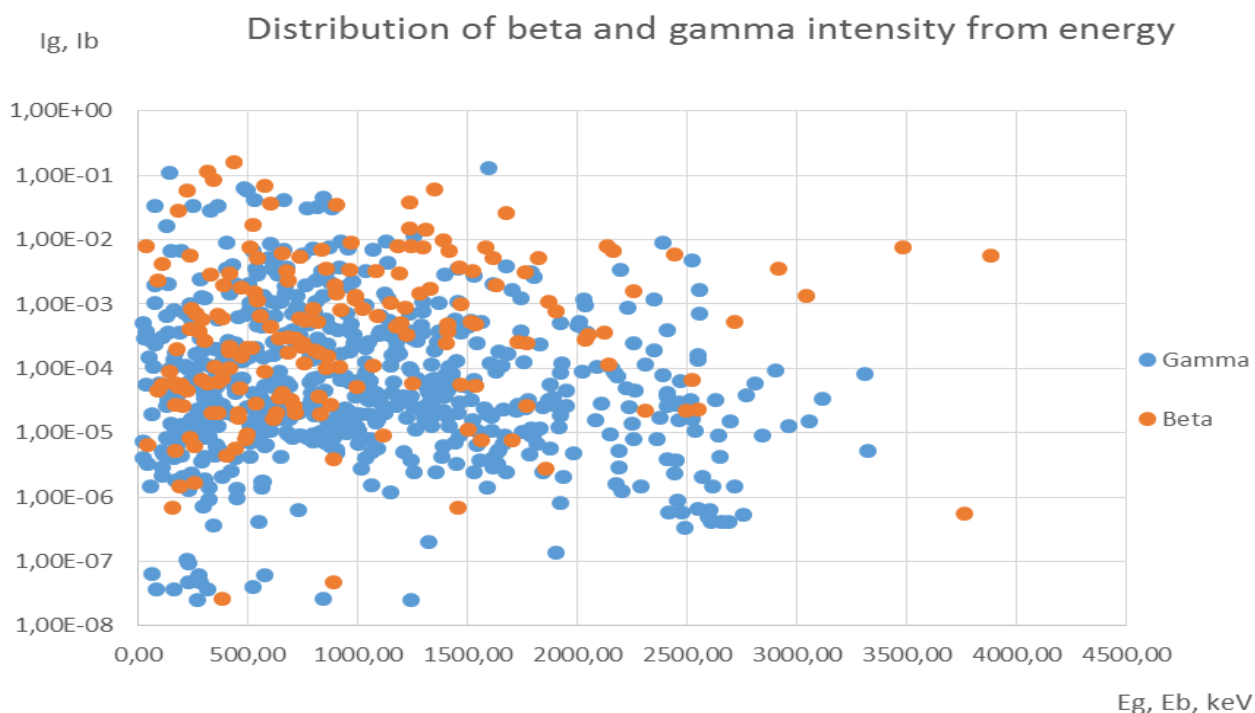


Рис. 4.30 Радіоактивні ізотопи, що напрацьовуються в атомних реакторах

Для імітації необхідних факторів впливу ядерної енергії на людей і довкілля при кризових ситуаціях та аваріях до імітаторів виникають вимоги генерувати спектри іонізуючих випромінювань, які характерні для ізотопів, що відповідають енергіям генерованих в реакторі та у складі радіоактивних відходів атомної енергетики (таблиця 4.4).

Таблиця 4.4

Склад радіоактивних ізотопів що генеруються в атомних реакторах

| Isotope | Dep. (%) | Eg (keV)  | Ig (%)   | Eb endpoint (keV) | Ib (%)   |
|---------|----------|-----------|----------|-------------------|----------|
| KR-85M  | 0,89%    | 151,159   | 83,96832 | 840,81            | 99,59425 |
| KR-87   | 1,84%    | 402,586   | 60,17154 | 3482,41           | 40,91122 |
| KR-88   | 2,57%    | 2392,11   | 25,25949 | 521,85            | 66,41686 |
| XE-133  | 8,70%    | 81,00     | 99,10462 | 346,40            | 99,18091 |
| XE-135  | 3,71%    | 249,77    | 95,76506 | 901,23            | 96,09802 |
| I-131   | 4,05%    | 364,49    | 81,08281 | 606,31            | 89,49637 |
| I-132   | 4,15%    | 667,7180  | 33,44822 | 2136,6700         | 18,81197 |
| I-133   | 4,68%    | 529,8720  | 83,10271 | 1240,1300         | 83,183   |
| I-134   | 4,76%    | 884,0900  | 21,51094 | 1307,6300         | 30,06478 |
| I-135   | 4,07%    | 1260,4090 | 21,49944 | 1387,5800         | 23,88144 |
| RU-103  | 6,28%    | 497,0800  | 89,27635 | 226,5600          | 92,17963 |
| RU-106  | 0,79%    |           |          | 39,4000           | 100,0000 |
| CS-134  | 0,87%    | 604,7210  | 43,79707 | 658,1100          | 70,18136 |
| CS-137  | 0,81%    | 661,6570  | 99,99932 | 513,9700          | 94,39945 |
| CE-141  | 22,80%   | 145,4405  | 100      | 435,2600          | 70,2000  |
| CE-144  | 14,73%   | 133,5150  | 84,994   | 318,7000          | 76,5000  |
| LA-140  | 13,80%   | 1596,2100 | 44,58    | 1349,8900         | 45,21098 |
| SR-90   | 0,51%    |           |          | 546,0000          | 100,0000 |

Невеликий перелік радіоактивних ізотопів характеризує застосування ядерної зброї, хоча туди входять основні ізотопи, які є в складі радіоактивних відходів роботи АЕС.

В ядерній медицині використовують електрони до 8 MeV, нейтрони високих енергій, близькі до термоядерних (до 14 MeV) та теплові. В останніх розробках процеси з захопленням нейтронів атомами бору в спеціально введених фізіологічних препаратах-маркерах ракових клітин та протони з енергіями 80-120 MeV. В промислових технологіях використовують гама-випромінювання ізотопів  $^{60}\text{Co}$  та  $^{137}\text{Cs}$  – усі в області 1 MeV (були пропозиції ізотопів Eu – 5 MeV) та електрони з енергіями до 10 MeV (технологічний діапазон застосування електронів). Промислові



установки характеризуються високими інтенсивностями генерованого випромінювання і є основним джерелом небезпеки для професійного персоналу при використанні радіаційних технологій.

Необхідні параметри комплексу будуть отримуватися шляхом залучення до нього необхідної радіаційної техніки з переліку діючих в ІЯД НАН України. Проект охоплює практично всі встановлені в попередніх розділах напрямки досліджень.

Потенціальні фізичні параметри експериментальної бази ІЯД наведено у таблиці 4.5 [145, 296]

Таблиця 4.5

Радіаційні характеристики експериментальної бази ІЯД

| Параметр                               | Енергія, <i>MeV</i>                             | Потужність дози, Гр/хв | Площа поля, <i>см<sup>2</sup></i> | Діапазон регулювання | Примітка                      |
|--|---|------------------------|-----------------------------------|----------------------|-------------------------------|
| Поле $\gamma$ -випромінювання          | 0,2-4   | 1 -10                  | 5 -10000                          | 100                  |                               |
| Поле $\beta$ -випромінювання           | 2-5   | 0,1-10                 | 2-10                              | 1000                 |                               |
| Фон побічного $\gamma$ -випромінювання | 0,05-5  | 0,01                   |                                   |                      | В об'ємі технологічного боксу |
| Акустичний шум                         |   | 78 <i>дб</i>           |                                   |                      | В об'ємі технологічного боксу |
| Продукти радіолізу атмосфери           | $O^2$<br>$O^3$<br>$N^+$<br>$N_xO_x$<br>$H_xO_x$ |                        |                                   |                      | В об'ємі технологічного боксу |
| Нейтрони                               | 30– 0,1   | 1                      | 900                               |                      | На об'єкті                    |
| Дейтрони                               | 12-70   | 35 <i>мкА</i>          | 25                                |                      | На мішені                     |
| $\alpha$ -частинки                     | 24-100  | 36 <i>мкА</i>          | 25                                |                      | На мішені                     |
| Протони                                | 6-75  | 50 <i>мкА</i>          | 25                                |                      | На мішені                     |

Реалізація проекту ядерного комплексу досліджень уражуючих факторів ядерної енергії для колективного користування зацікавленими вітчизняними фахівцями здійснюється модернізацією наявної техніки ІЯД під нові напрямки досліджень.

Усі параметри знаходяться в діапазоні енергій і інтенсивностей, властивих різноманітним ядерним процесам при використанні ядерної зброї, в ядерній енергетиці, ядерній медицині, промисловості.

Реальні можливості ефективного використання цього потенціалу на даному етапі формування комплексу імітатора обмежуються першочерговими завданнями.

Насамперед, нагромадженні в дослідженнях знання повинні бути узгоджені з попередніми експериментами в цьому напрямку.

Згідно діючих зараз стандартів на експериментальній базі медико-біологічні роботи з цього напрямку заплановано розпочинати з бази для опромінення гама-квантами та бета-променями (електронами). Але з огляду на сучасні потреби досліджень цієї проблеми розробляється проект для можливості суттєвого розширення масштабів досліджень. В повному обсязі структура імітатора планується як перспектива подальшої технічної модернізації наявної техніки ІЯД.

#### **4.4.4 Технічне втілення**

Першим етапом створення комплексу є модернізація та реконструкція радіаційної установки з електронним прискорювачем з метою адаптації її під медико-біологічні дослідження. На радіаційній установці ІЯД, як і на будь-якій установці з потужним прискорювачем мегавольтних електронів, найбільш значимими проблемами адаптації до медико-біологічних досліджень є небажаний вплив радіаційного фону від 9 МВт магнетронного генератора НВЧ енергії, гальмівного випромінювання від системи випуску пучка та фону від розсіяних і вторинних електронів, які попадають на конструкції обладнання в реакційній камері установки. З хімічних супутніх факторів найбільш шкідливим є озон та окисли азоту, що у великих кількостях генеруються по всій траєкторії руху електронів в атмосфері від прискорювача до об'єкта.

На рис. 4.11 була показана схема доукомплектування установки додатковим обладнанням для коректної організації медико-біологічних робіт з електронами і подолання вищезгаданих проблем. Технічною основою адаптації є експериментальна камера для розташування дослідних об'єктів. Ця експериментальна камера (фактично локальна установка), зображена на рис. 4.11 справа. Вона являє собою щільний корпус-каркас із коробчастими стінками, які можуть заповнюватися захисним матеріалом (свинцева цегла та бетонні блоки). Камера ізолює внутрішній об'єм від зовнішнього середовища боксу і виключає

можливість надходження до дослідних об'єктів небажаних факторів. Життєдіяльність біологічних об'єктів підтримується локальною вентиляційною системою з аспірацією повітря від сторонніх домішок. При необхідності повітря може нагріватися до певної температури. Ця система є автономною від радіаційної установки і забезпечує ламінарний потік свіжого повітря в експериментальну камеру завдяки вхідному багат шаровому сітчастому фільтру. Відпрацьоване повітря видаляється в простір реакційної камери установки.

Камера вирішує проблеми здійснення на прискорювачі електронів медико-біологічних досліджень в умовах роботи потужної електрофізичної техніки генерації інтенсивних потоків іонізуючих випромінювань, яка супроводжується низкою радіаційних і супутніх факторів, а саме:

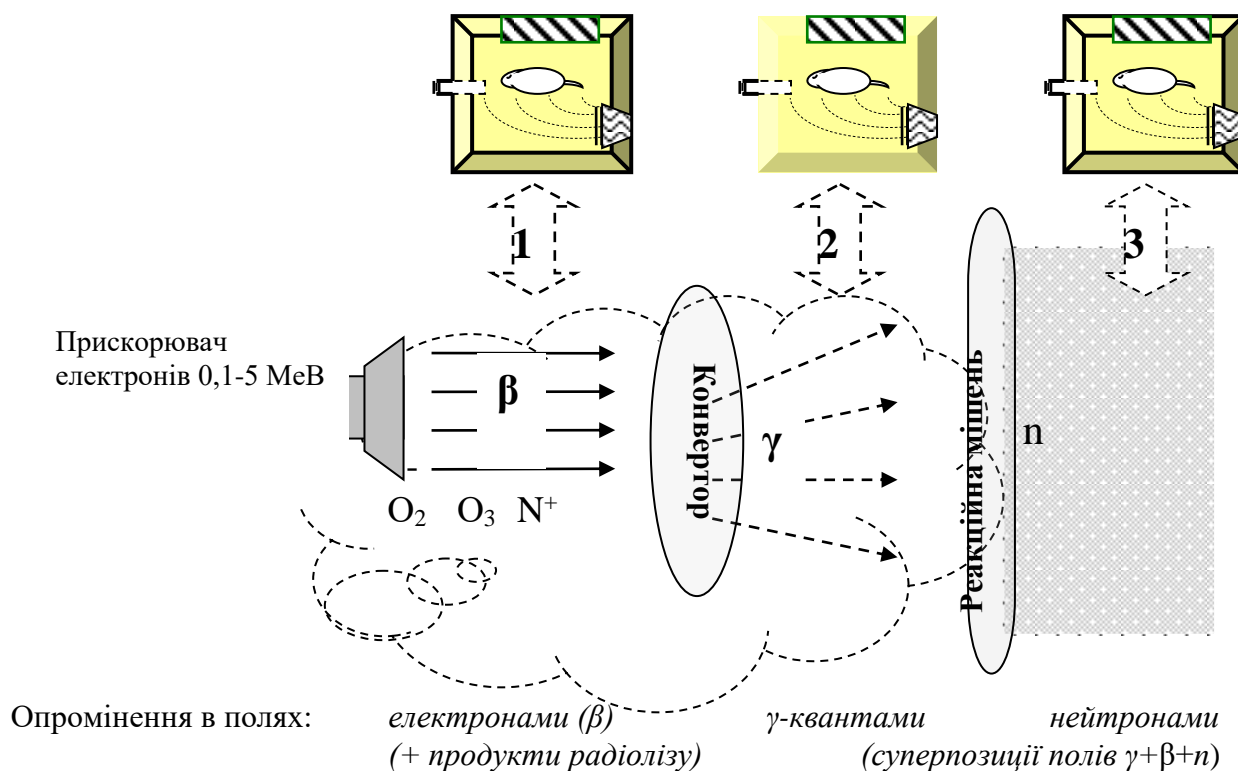
|   |  |
|---|--|
| 1. Блок прискорення                     | до 10 Гр/хв  |
| 2. Блок виводу                          | до 3 Гр/хв   |
| 3. Продукти радіолізу атмосфери в боксі | O <sub>2</sub> , O <sub>3</sub> , NO <sub>2</sub> , NO, H, H <sub>2</sub> , HxOx |
| 4. Акустичний шум                       | 78 - 85 дБ   |
| 5. Потік повітря                        | 1500 м <sup>3</sup> /год   |
| 6. Температура                          | 12 - 35 °С   |

Адаптація радіаційної установки здійснюється встановленням вищеописаної експериментальної камери та системи формування пучка випромінювання заданого перерізу. Експериментальна камера монтується в реакційній камері установки на майданчику з внутрішніми засобами дозиметрії та відеоспостереження і фактично є модернізацією підпучкового обладнання установки. При цьому передбачається точне формування потоку радіації на досліджувані об'єкти в цій камері.

Потік радіації формується слоїстою системою захисту від гама-випромінювання з шару парафіну завтовшки 10-12 см та 5 см блоків свинцю з відповідним вікном-коліматором для проходження електронного пучка. Далі електронний пучок колімується трубчастим коліматором з легкого полімерного матеріалу, а розсіяні електрони поглинаються парафіновими захисними блоками відповідної товщини. Формування поля опромінення необхідного діаметру (в межах 2-4 см) передбачено

вибором внутрішнього діаметру трубчастого коліматора в стінці експериментальної камери. При знятому коліматорі в камері формується поле опромінення з діаметром близько 25-30 см з нерівномірністю близько 30%.

Проаналізовано три основні різновиди електрофізичних технологій формування полів опромінення різними видами випромінювань та їх суперпозицій. В найпростішому випадку – це можна організувати на одній ядерно-фізичній техніці, шляхом реконфігурації структури підпучкових технічних засобів. Основою такого комплексу може служити електрофізичне джерело електронів (прискорювач). Електрони мають технологічні переваги, бо далі їх енергія може конвертуватися у інші види іонізуючих випромінювань, властивих ядерним процесам. Принципові можливості використання прискорювача електронів як найбільш зрозумілого шляху утворення універсального джерела радіації в імітаторі наведено на рис. 4.31.



1. Технологія з безпосереднім опроміненням електронами;
2. Технологія з конверсією електронів в  $\gamma$ -випромінювання;
3. Технологія опромінення нейтронами. При необхідності енергія нейтронів формується за рахунок парафінових або літєвих сповільнювачів.

Рис. 4.31 Схема можливих методів конверсії енергії електронів в інші види радіації для імітації уражуючих факторів ядерної енергії

На лівій частині схеми (1) наведено структуру установки для досліджень з  $\beta$ -випромінюванням (електронами) в режимі прямого опромінення об'єктів потоками електронів різних енергій [129, 165].

Середня схема (2) ілюструє електрофізичну технологію опромінювання об'єктів гальмівним електромагнітним випромінюванням пікометрового діапазону –  $\gamma$ -випромінювання, яке виникає при гальмуванні електронів на металевій мішені (конверторі). Підбором ступеню прозорості конвертора (товщини гальмівної мішені) можна формувати змішані в потрібних співвідношеннях  $\beta+\gamma$  поля опромінювання. Ці процеси ґрунтовно вивчені та вже тривалий час використовуються в практичних радіаційних технологіях на установці ІЯД НАНУ і забезпечують високі технологічні показники.

Права частина схеми (3) відображає технологію опромінення нейтронами. Останні виникають в результаті збудження фотоядерних реакцій ( $\gamma, n$ ) на мішенях з відповідного матеріалу. Як і в попередньому варіанті, можна формувати і «чисті», і змішані ( $\gamma+\beta+n$ ) радіаційні поля.

Важливою перевагою наведеного методу генерації радіаційних полів на прискорювачах електронів є генерація не тільки основних ядерних факторів ураження, але і супутніх процесів радіолізу зовнішнього середовища – іонізованої атмосфери, вологи та інших складових іонізації атмосфери ( $O_2^-$ ,  $O_3$ ,  $N$  та ін. аероіонів). Приваблює і можливість утворювати суперпозиції радіаційних полів різного складу відповідним вибором типу і конфігурації підпучкових мішеней.

Наведені принципові схеми методики отримання різних уражуючих факторів ядерного впливу, вказують на реальну можливість навіть на одному прискорювачі електронів організувати багатопланові медико-біологічні дослідження і відповідність результатів виконання роботи поставленому завданню. Останню (третю) схему доцільно реалізовувати в перспективних роботах лише при умові радикального удосконалення системи протирадіаційного захисту введенням в її склад слоїстих поглинаючих структур.

Розширення переліку доступних видів радіації вирішується подальшим включенням до складу імітатора дейтронного циклотрона і утворення складної структури технічних засобів. Загальна схема цієї структури наведена на рис. 4.32.

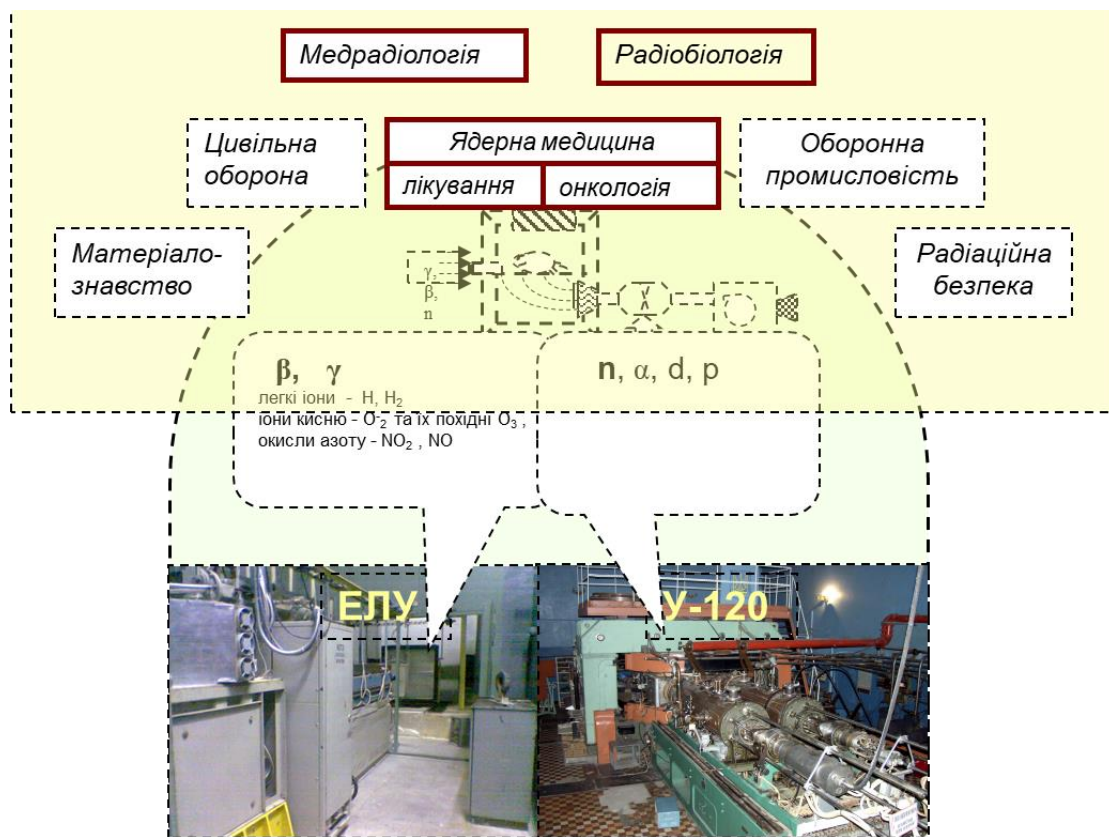


Рис. 4.32 Конфігурація розширеного технічного комплексу імітатора уражуючих факторів ядерної енергії [129]

Вона організована з використанням попереднього досвіду імітатора для інноваційної технології ядерних мембран, але з залученням широких можливостей циклотрона У-120. А саме – використання його як джерела високоенергетичних нейтронів, поширених в ядерній медицині.

#### 4.4.5 Перспектива розвитку комплексу

Перспективою, подальшого розвитку цього технічного напрямку радіаційного машинобудування є ядерний технічний комплекс за складнішою структурою з декількох ядерно-фізичних установок ІЯД для збільшення обсягів прикладних

досліджень. Це сприятиме підвищенню науково-технічного рівня вітчизняної науки та економіки у високопрофесійних галузях високих технологій.

З урахуванням виявлених перспективних і корисних напрямків прикладних досліджень розроблена повна структура імітатора, яка забезпечує експериментаторам увесь необхідний асортимент іонізуючих випромінювань і діапазон регулювання їх енергії. Це досягається розширенням структури імітатора, як це показано на рис. 4.33.

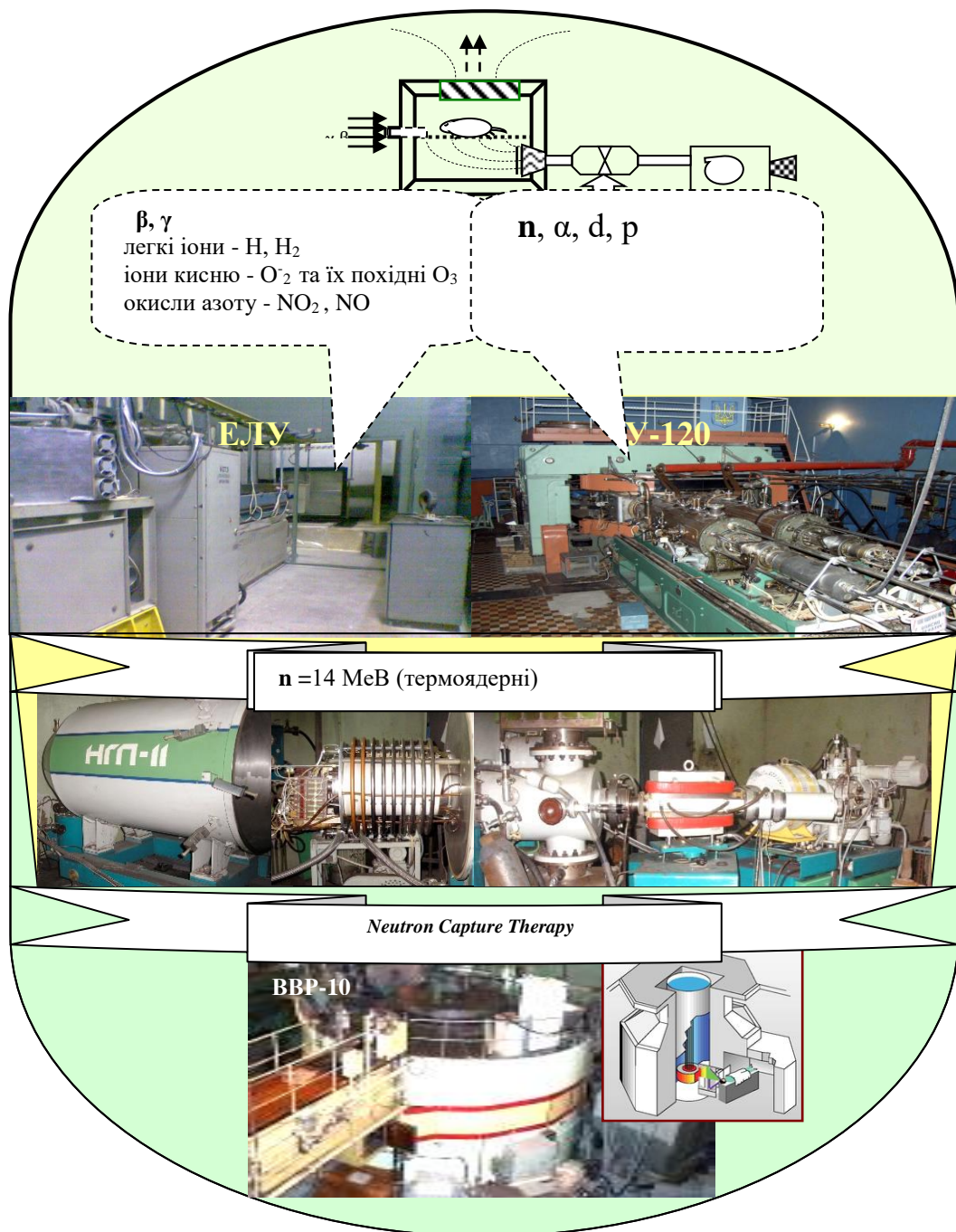


Рис. 4.33 Перспектива удосконалення структури імітатора [129]

#### **4.4.6 Адаптація електрофізичного генератора термоядерних нейтронів**

Одним з детально досліджених перспективних напрямків розвитку структури електрофізичного ядерно-фізичного комплексу імітатора уражуючих факторів ядерної енергії є залучення нейтронного генератора НГП-11. Для цього необхідна його глибока модернізація та доведення до структури, яка зараз використовується в зарубіжних дослідницьких центрах. Вона стосується модернізації апаратної частини генератора та технологічного приміщення (боксу). Головна проблема – відсутність на установці реакційної камери. А усе генеруюче і підпучкове обладнання розташоване в єдиному боксі. Необхідно встановити поворотну мішень для можливості направляти потоки нейтронів в горизонтальний чи вертикальний експериментальні канали. Для проведення експериментів у внутрішньому об'ємі боксу генератора необхідно встановлювати захисні стіни комбінованої шарової конструкції. Для проходження нейтронів до експерименту в захисті передбачаються наскрізні горизонтальний та вертикальний канали.

Крім медико-біологічних експериментів, наявність двох каналів надає можливість проведення сеансів нейтронної терапії раку, аналогічно діючим сьогодні зарубіжним терапевтичним центрам нейтронної терапії.

Попередні оцінки показують, що така модернізація НГП може бути здійснена впродовж 2 років при додатковому фінансуванні близько €300,0 тис. В ІЯД вже нагромаджено тривалий досвід прикладних ядерних досліджень для таких соціально-значимих напрямків як медицина, екологія, сільське господарство. Слід зазначити, що взагалі для потужної радіаційної техніки такі дослідження завжди є актуальною проблемою, бо вона створюється з розрахунку на максимальну технологічну користь і високу рентабельність промислового використання унікальних можливостей ядерної енергії.



#### 4.4.7 Результати технічних розробок імітатора

Розроблено структуру і розпочато формування багатоцільового радіаційного комплексу імітації уражуючих факторів ядерної енергії [172].

В структурі імітатора технічним шляхом вирішено непросту проблему використання наявної потужної ядерно-фізичної техніки ІЯД, оскільки «біологічний» діапазон інтенсивностей радіаційних полів повинен бути в тисячі разів менший за прийняті в традиційних ядерних дослідженнях і радіаційних технологіях [177].

Опановано технології формування і контролю не тільки «чистих» радіаційних полів опромінювання, але і їх суперпозицій в заданих співвідношеннях [298].

Технічно вирішено низку методологічних проблем:

- глибоке регулювання параметрів радіаційного поля в діапазоні низької інтенсивності та малих поглинутих доз (промислові радіаційні технології);
- отримання імпульсних радіаційних полів підвищеної інтенсивності;
- регулювання параметрів радіаційного поля в широкому діапазоні інтенсивності;
- метрологію радіаційних процесів в діапазоні високих, малих і наднизьких поглинутих доз;
- технології отримання «чистих» потоків гама-випромінювання широкого спектру енергій до 7 МеВ;
- розробка оригінальної техніки для реалізації методик експериментів *in-vivo*;
- отримання «чистих» потоків електронів для імітації бета-опромінювання;
- розроблена техніка для моделювання *in-vivo* тотального і місцевого опромінення всіма видами радіації.

З аналізу фізичних параметрів комплектуючих ядерно-фізичних установок імітатора видно, що експериментальна база ІЯД взмозі реалізувати усі напрямки прикладних медико-біологічних досліджень.

#### 4.4.8 Висновки

1. Потужна ядерно-фізична техніка наукового призначення для досліджень фундаментальних ядерних процесів, що є в ІЯД НАН України, а також наявність вже готових приміщень з протирадіаційним захистом є надійною основою для успішної реалізації технічного комплексу імітації уражуючих факторів ядерної енергії для колективного користування та технічного забезпечення виконання актуальних напрямків вітчизняної науки й економіки. Запропонований варіант виключає необхідність великих фінансових витрат і підключає до практичного використання широким науковим загалом України унікального комплексу ядерної техніки, яка вже є в ІЯД і в яку вже вкладено великі кошти.

2. Імітатор запропонованої структури забезпечує відтворення (імітацію) в обмеженому об'ємі існуючих в ІЯД експериментальних приміщень з потужним протирадіаційним захистом уражуючих факторів від різних чинників ядерної енергії

3. Комплекс ліквідує дефіцит вітчизняної дослідницької радіаційної технічної бази для відтворення (імітації) уражуючих факторів від різних видів іонізуючих випромінювань та їх суперпозицій. Це дозволить одночасно вирішити низку сучасних соціальних і економічних проблем стратегічної безпеки й економічного розвитку.

6. Розроблено низку технічних засобів модернізації радіаційної установки з електронним прискорювачем для адаптації її під виконання медико-біологічних експериментальних робіт.

7. Проаналізовано можливості використання законсервованого електрофізичного генератора термоядерних нейтронів і обґрунтована перспективна схема модернізації нейтронного генератора для адаптації до медико-біологічних досліджень та терапії раку.

Імітатор є оригінальною розробкою і аналогів поки що не має.

## **РОЗДІЛ 5. ІННОВАЦІЙНІ РОЗРОБКИ**

### **5.1 Аероіонні технології харчових продуктів**

#### **5.1.1 Дослідження стану проблеми**

Формування сучасного напрямку прогресу аероіонних технологій Насамперед спрямоване на використання їх для харчової галузі при виробництві харчових продуктів з риби.

Вперше розглянула перспективність та доцільність використання низькоенергетичних заряджених частинок (аероіонів) для модифікації складних органічних систем, характерних для харчової моресировини з метою отримання високоякісних делікатесних харчових продуктів зробила старший науковий співробітник ТИПРО (Владивосток, РФ) Горшкова М.М. [115].

Перші зразки такої продукції було отримано нею в Києві в лабораторіях ІЯД [115, 210, 212, 213]. Для неї, співробітниками ІЯД М.Коломійцем та В.Сахно, було створено спеціальну установку з використанням ізотопних генераторів уніполярних іонів атмосферних газів ИВА-2 (СКТБ з ЕВ ІЯД НАН України) [286]

Вже перші експерименти показали різке зростання інтенсивності тепломасових процесів в опромінюваній органічній сировині та глибоку перебудову структури органіки [96, 135, 252, 276]. Характеристики харчової продукції, отриманої з тріскової сировини всього за 12 годин в камері з іонізованим повітрям при кімнатній температурі і практично без витрат електроенергії, виявилися надзвичайно високим [75, 249]. Продукт відповідав усім показникам сублімованої продукції, мав приємні смакові та високі хімічні показники, і виявився надзвичайно стійким у зберіганні. Єдиною проблемою цієї технології була наявність ізотопної техніки в технологічному процесі, що було небажаним і викликало негативний резонанс через аварію на ЧАЕС. На даний час, через вказані соціальні обмеження, аероіонні технології виробництва харчів із залученням ізотопних джерел іонів поки що залишаються недосяжними для прогресу технологій [90, 96].

Для сприяння прогресу іонних технологій були проведені дослідження можливостей заміни тритієвих ізотопних іонізаторів на більш прийнятні електрофізичні апарати такого типу [213]. Їх почали розробляти в 90-х роках у СРТ ІЯД в спільному проєкті з РФ щодо створення ефективних технологій морепродуктів. Насамперед, для сировини пікового надходження (лососевих) і масової прибережної сировини сезонного періодичного вилову (далекосхідного терпугу) [75, 90, 115, 293].

Для цього фахівцями ІЯД НАН України в ТИНРО було створено комплекс експериментальних електрофізичних установок для роботи з негативними, позитивними іонами та їх поєднанням в режимах експериментальних досліджень і дослідно-лабораторних випробувань продукції [115, 293]. Отриманий науковий доробок цих двох провідних установ дав нові знання про незвичні для технологів процеси структурної модифікації моресировини, біохімічних процесів визрівання риби та особливості побудови відповідної електрофізичної техніки. В результаті було створено, сертифіковано і захищено патентами низку оригінальних технологій виробництва рибних харчових продуктів [76, 150, 151, 211, 212].

Головне – було доведено, що заряджені частинки можна використовувати як ефективний інструмент рибних технологій і цей напрямок дозволяє створити комерційно вигідну делікатесну продукцію з високими споживчими характеристиками. Була затверджена технологія виробництва продукції з терпугу далекосхідного [234, 293]. Для цієї технології в ІЯД НАНУ було розроблено промисловий варіант електрофізичної техніки, яку було успішно виготовлено на підприємстві Дальрибтехцентр [293]. Нові технології, продукція і установка отримали ряд відзнак на міжнародних галузевих виставках.

### **5.1.2 Дослідження механізмів модифікації структури природної органічної сировини в електрофізичних аероіонних установках**

Технологічні результати перших випробувань були отримані на ізотопних генераторах уніполярних іонів. Останні забезпечують практично еталонні

характеристики іонізованої атмосфери (виключно іонізований газ). Виявилось, що низькоенергетичні іони атмосферних газів забезпечують неочікувано високу ефективність модифікації структури та властивостей складних органічних матеріалів [168].

Для прогресу таких технологій і впровадження їх в сектор реальної економіки необхідно було сформувати наукову базу про закономірності та механізми структурної перебудови органіки під впливом іонів без додаткових хімічних реактивів чи механічної переробки.

З аналізу теоретичних положень було встановлено, що звичний для сучасних технологій хіміко-механічний, хіміко-термічний механізм модифікації структури органічної сировини неможливо застосувати для аналізу і проектування напрямків модифікації за допомогою заряджених частинок. Водночас вимагала доопрацювання і методика аналізу радіаційно-хімічних механізмів модифікації, оскільки їх взаємодія з матеріалом через невисоку енергію іонів атмосферних газів може відбуватися тільки на поверхні опромінюваних об'єктів, що виключає пряму дію іонів на структури молекул та атомів в органічному матеріалі. Некоректним є припущення про стимулювання хімічної активності атомів через вплив іонів низьких енергій на зовнішні оболонкові структури атомів та формування нових ковалентних зв'язків між атомами та молекулами в модифікованій органічній сировині. В доступних публікаціях інформація, на жаль, відсутня.

Експерименти показали, що процес модифікації протікає інтенсивно і в усьому об'ємі опромінюваної органічної сировини. Для встановлення можливих механізмів інтенсивної структурної перебудови органічних сполук і систем під впливом опромінення аероіонами було здійснено експериментальні дослідження цього феномену орієнтуючись на подальше використання результатів для створення нових технологій виробництва.

Перш за все необхідно отримати ефективну (як і на ізотопних джерелах) модифікацію органіки за допомогою установок з електрофізичними генераторами іонів. Для цього проведено ряд експериментів з використанням і позитивно заряджених іонів, і негативно заряджених, і їх поєднанням з уніполярністю до 1,6.

Експерименти здійснювались за універсальною методикою на спеціальній добре відпрацьованій лабораторній установці по схемі, наведеній на рис. 5.1.

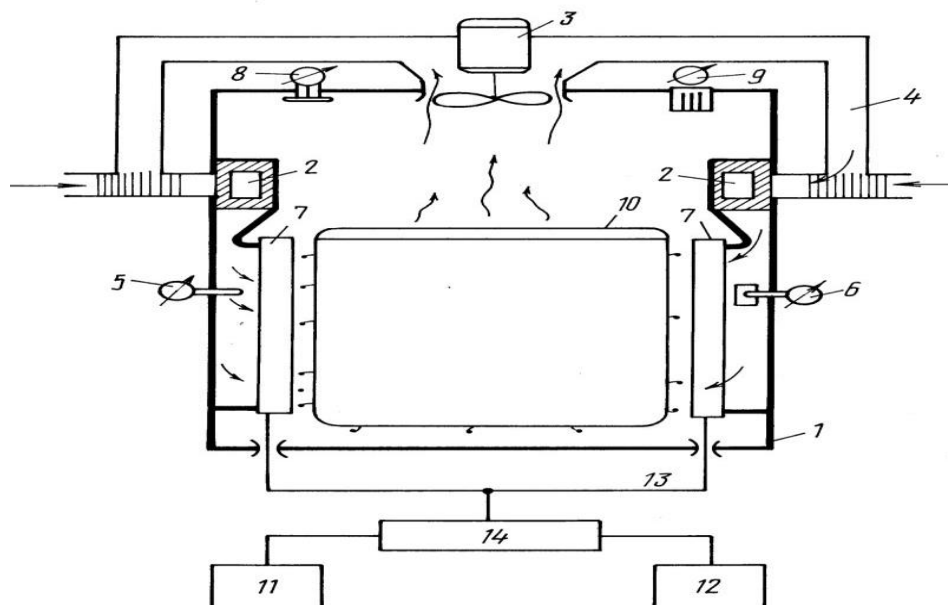


Рис. 5.1 Схема лабораторної установки досліджень процесів модифікації структури органічних матеріалів під дією іонів різної полярності

Від ізотопних установок електрофізичні суттєво відрізняються наявністю ще одного потужного фактору – електричного поля високої напруги. Очікувалось, що одночасне прикладення електростатичних сил (вектора електричного поля) в іонізованій атмосфері дасть різкий вплив на процеси модифікації органіки.

Атмосфера з високою концентрацією іонів газів формується за допомогою панельних електророзрядних іонізаторів з коронуючими електродами (7). Їх живлення здійснюється від системи високовольтних джерел (11, 12, 14) і може регулюватися в широких межах аж до величини 50 кВ.

Циркуляція повітря в робочому об'ємі камери та для подачі свіжого повітря здійснюється через двоступеневі фільтри (2).

Метрологія установки складається з вимірювачів потенціалу живлення панелей розрядного іонізатора (4, 5), вимірювачів температури повітря на вході іонізатора (6), вимірювачів концентрації іонів в камері установки (9), вимірювачів температури повітря в камері (8).

Підготовлені зразки оброблялись негативними і позитивними аероіонами з концентрацією  $1 \cdot 10^7 - 10 \cdot 10^7$  іон/см<sup>3</sup>. Температура і вологість не регулювались.

Тепломасові процеси залежать від температури, а вологість впливає лише на ефективність процесів генерування аероіонів в електророзрядних іонізаторах, а тому автоматично враховується при контролі реальної концентрації іонів в робочій камері. Експерименти здійснювались при вологості зовнішнього повітря не більше 70%.

Була встановлена мета структуризації – прискорення процесів перерозподілу в опромінюваній масі харчової сировини води, жиру, солі, та отримання продукту, що відповідає вимогам харчових з заданими фізико-хімічними та харчовими властивостями. Підґрунтям для формування цієї мети є отримані в експериментах дані про те, що обробка зразків з складних органічних матеріалів (моресировина, сировина тваринництва тощо) потоками негативно заряджених іонів кисню призводить до зміни полярності хімічних сполук, що є структурними складовими м'язових тканини [168]. Спостерігалось інтенсивне видалення вологи, а біохімічні дослідження показали зміну структури білків, інтенсивний перерозподіл ліпідів у м'язових волокнах та тканинах.

В дослідженнях встановлено, що оброблена аероіонами структура продукту позитивно відрізняється від структури сировини [96, 136, 194]. Було зроблено припущення, що такі технології можуть ефективно використовуватися в харчовій галузі для приготування широкого асортименту структурованих сформованих харчових продуктів, а також для делікатесної продукції з малоцінних видів риби з високим вмістом води [96]. Такі припущення отримали підтвердження в дослідженнях динаміки структурних змін різних композицій складної органіки. Такі дані дають підставу формулювати механізм впливу аероіонів як багатокомпонентного процесу модифікації органічної сировини за рахунок енергії іонів атмосферних газів.

На рис. 5.2 наведено динаміку видалення незв'язаної води з внутрішніх шарів органічної сировини. На лівому фото – моресировина до обробки аероіонами, справа – після обробки. На фото чітко візуалізується розподіл м'язових волокон (темні ділянки) і води (світлі ділянки). Після аероіонної обробки проміжки між м'язовими волокнами суттєво зменшились, а структура м'язової тканини стала щільнішою. Процес під дією аероіонів відбувається досить швидко, через розміщення зразків в

сильному електричному полі, що супроводжується процесом електризації молекул води у вологому пористому органічному середовищі.

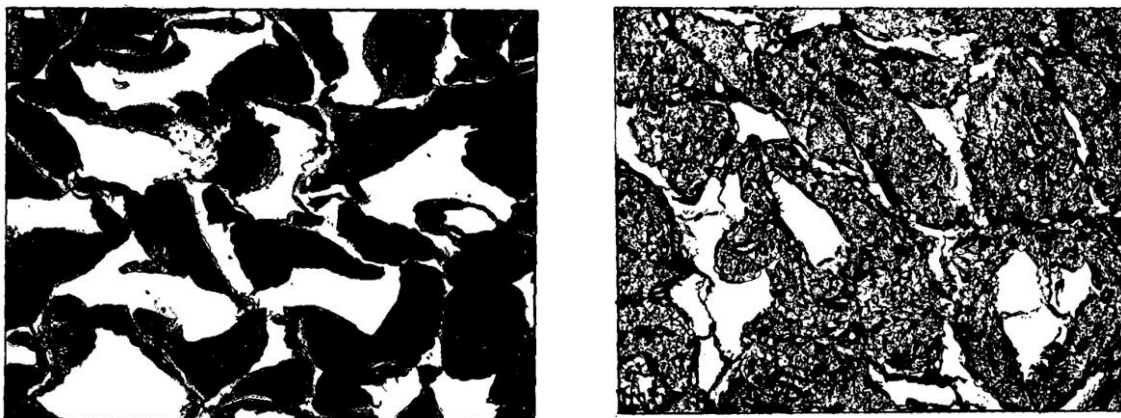


Рис. 5.2 Динаміка структури органічної сировини за рахунок тепломасових процесів видалення вологи

Процес розпочинається з активного видалення води з поверхні. Далі, за рахунок осмотичних сил, на місце видаленої вологи по капілярах надходить вода з внутрішніх шарів і знову видаляється [30, 96]. Процес безперервний і відбувається поки осмотичні сили можуть долати сили капілярного опору. Інтенсивне видалення вільної води створює в органічному матеріалі умови для подальшого заміщення видаленої води в'язкими компонентами сировини. Така модель найповніше пояснює механізм модифікації органіки під впливом заряджених частинок низької енергії [72, 184]. Ці процеси добре видно на рис 5.3.

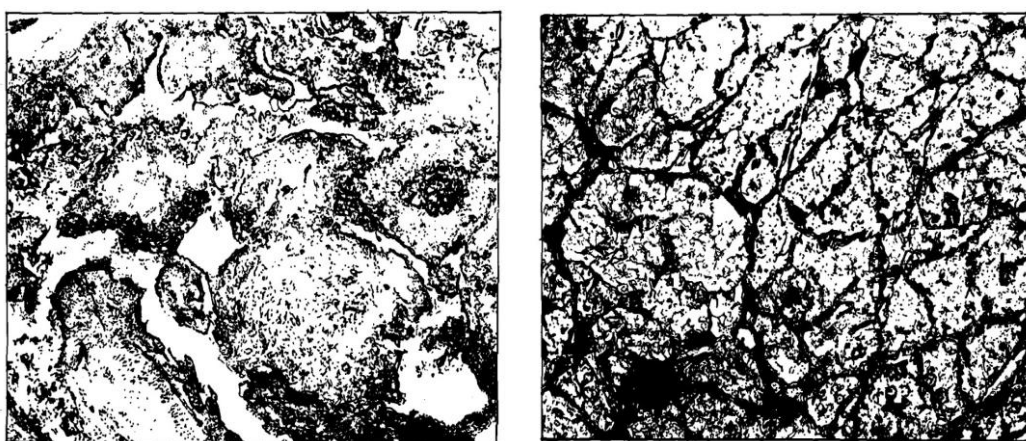


Рис. 5.3 Динаміка перерозподілу в'язких складових в масі опроміненого аероіонами зразка природної органічної сировини (моресировини)

При подальшому опроміненні обезводнених біомас спостерігається надходження у звільнені від води порожнечі в'язких мас жирів, які поступово



заповнюють усі мікропустоти та формують щільну структуру продукту. Такий процес повністю відповідає технологічній меті переробки моресировини в харчові продукти, що дає підставу стверджувати, що аероіонні технології здатні замінити, або покращити традиційні технологічні процеси не тільки стерилізації продукції, але служити технологічним інструментом виробництва [30, 150, 151, 194, 195, 249].

Показовим для ілюстрації ефективності аероіонних технологій є дослідження процесів структуризації складних біомас після попередньої фізико-механічної обробки. Такі процеси характерні для деяких видів харчової продукції з фаршу [96, 135, 302]. Високоякісні види цих харчових продуктів передбачають інтенсивну механічну деструкцію харчової сировини (утворення диспергованої маси напівфабрикату – фаршу) з утворенням чітко структурованих сформованих кінцевих продуктів. На рис. 5.4 наведено фото подрібненої біосировини (фаршу) та кінцеві результати її обробки аероіонами. Усі процеси відбуваються під дією аероіонів при кімнатній температурі та не контрольованій вологості.

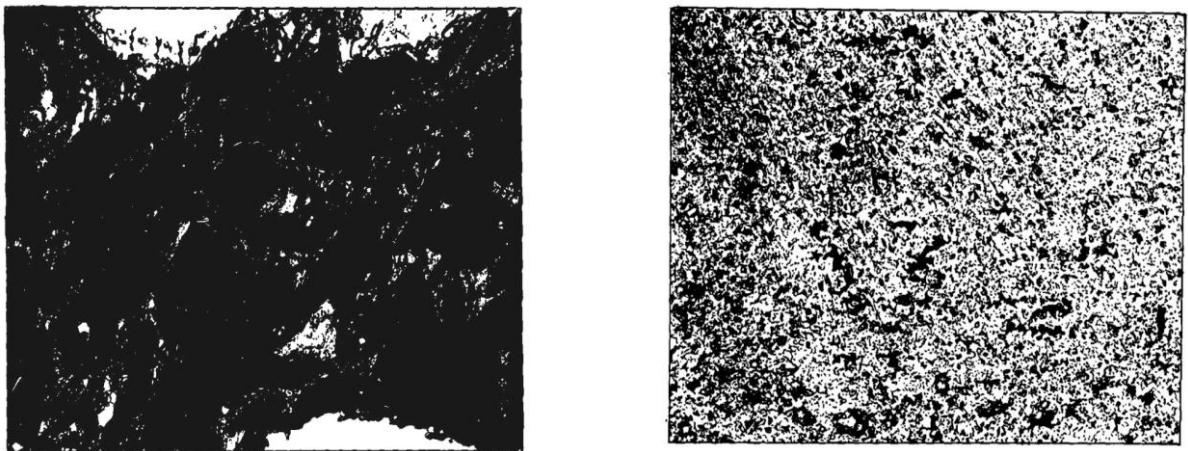


Рис. 5.4 Динаміка структуроутворення ковбас з рибного фаршу

На лівому фото – фарш до опромінення, справа – продукт в результаті опромінення позитивними аероіонами фаршу інтенсивними ( $5 \cdot 10^7$  іон/см<sup>3</sup>) потоками аероіонів впродовж 5 діб. Така обробка призвела до утворення численних молекулярних зв'язків між фрагментами оболонок м'язових волокон та формування структури продукту, де практично відсутні проміжки між окремими фрагментами. Результатом є формування продукту з щільною рівною і суцільною консистенцією.

Експериментально встановлено, що для модифікації структури складних композицій органічних матеріалів доцільно використовувати аероіони різних знаків. Наприклад, видалення вільної води відбувається більш ефективно під дією негативно заряджених аероіонів. А перерозподіл в'язких фрагментів (жиру) в органічному матеріалі інтенсивніше відбувається при опроміненні позитивними аероіонами [96].

Експерименти з іншими видами природної органічної харчової сировини тваринного походження виконувались в менших об'ємах, однак дали позитивний результат та підтвердили можливість поширення аероіонних технологій до виробництва м'ясних продуктів. Різниця з технологіями рибних продуктів полягає в інших режимах опромінення та термінах здійснення етапів технологічного процесу. Такі дані можна отримати на створеній в ІЯД експериментальній базі для будь-якого конкретного виду сировини і продукту [96].

Наведені вище результати досліджень дають підставу сформулювати основні науково-обґрунтовані положення суті радіаційних технологій з використанням іонів атмосферних газів низьких та наднизьких енергій (аероіонних технологій).

1. Аероіонні технології надають можливість цілеспрямованої структурної модифікації органічних сполук, корисних для новітніх виробничих процесів. В основі усіх етапів іонної модифікації органіки лежить процес інтенсивного видалення вільної води, який приводить до біохімічних та бактеріостатичних ефектів, збуджує процеси фізико-механічного структурування і формування продукту з заданими властивостями.

2. Аероіони є транспортерами енергії від джерела іонізації до сировини, під впливом якої відбувається паралельно декілька фізичних процесів.

3. Сировина, що є середовищем з певними діелектричними показниками накопичує заряди від аероіонів і на її поверхні утворюються області з надзвичайно високим потенціалом, здатним здійснювати власну іонізацію (хоча і в обмежених об'ємах). Іонізовані органічні молекули сировини за законами радіаційної хімії стимулює різні хімічні реакції, в тому числі і необхідні для модифікації структури органіки.

4. Іони, які осідають на продукті утворюють сильні електричні поля між продуктом і іншими предметами, що супроводжуються іонізацією середовища, яка стимулює появу вологи на поверхні сировини гідратованих електронів, як і при опроміненні іонізуючими випромінюваннями, але в меншій кількості (у 100 – 1000 разів). Цей радикал охоче приєднується до молекули кисню, і якщо ця молекула кисню входить до складу води, то в свою чергу і молекула води отримує заряд. Дослідження довели, що один гідратований електрон здатен приєднати до себе цілий ряд молекул води – до 10 і більше. Якщо таку «іонізовану» краплю води помістити в електричне поле, то під дією електростатичних сил такий молекулярний ансамбль приходить в рух (рис. 5.5), утворюючи додатковий механізм тепломасових переносів в сировині та між сировиною і зовнішнім середовищем

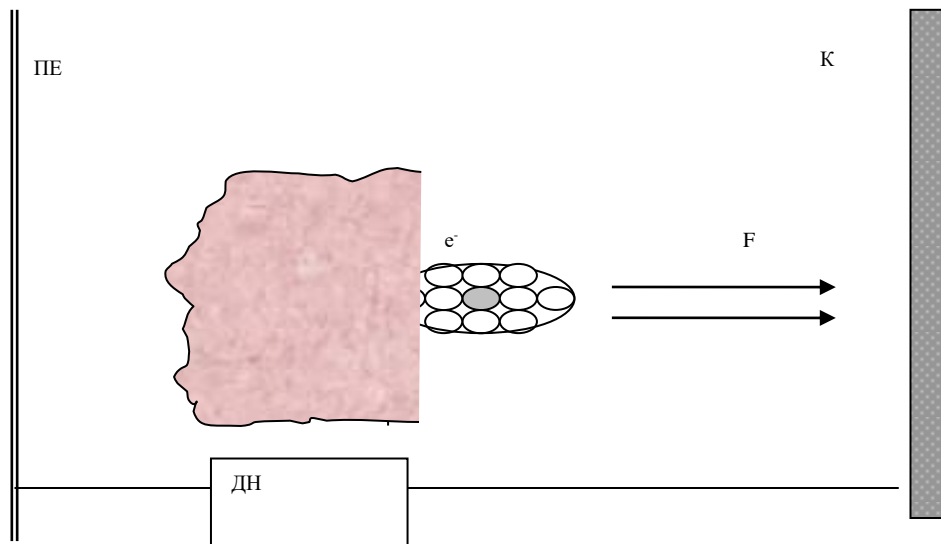


Рис. 5.5 Схема процесу видалення вільної води з органічного матеріалу

Приєднання цього процесу до природного випаровування інтенсифікує усі складові динаміки руху вільної води в товщі органічного матеріалу. Такий комплексний процес перебігає інтенсивно при температурі навколишнього середовища без додаткового підведення теплової енергії.

6. Через те, що вода відіграє вирішальну роль і в біохімічних процесах, і в розвитку мікрофлори (з усіма супутніми ефектами ферментації та протеолізу), ці ефекти суттєво впливають на весь комплекс процесів модифікації органічної сировини в харчовий продукт.

7. Ніяких «специфічних» процесів в органічній сировині під дією аероіонів не відбувається. В аероіонних технологіях за допомогою енергії заряджених частинок запускаються звичайні природні біохімічні та фізичні процеси, як це показано на рис. 5.6, але їх інтенсивність значно вища і може легко регулюватися технологами завдяки керованій швидкості передачі енергії аероіонами [233, 279].

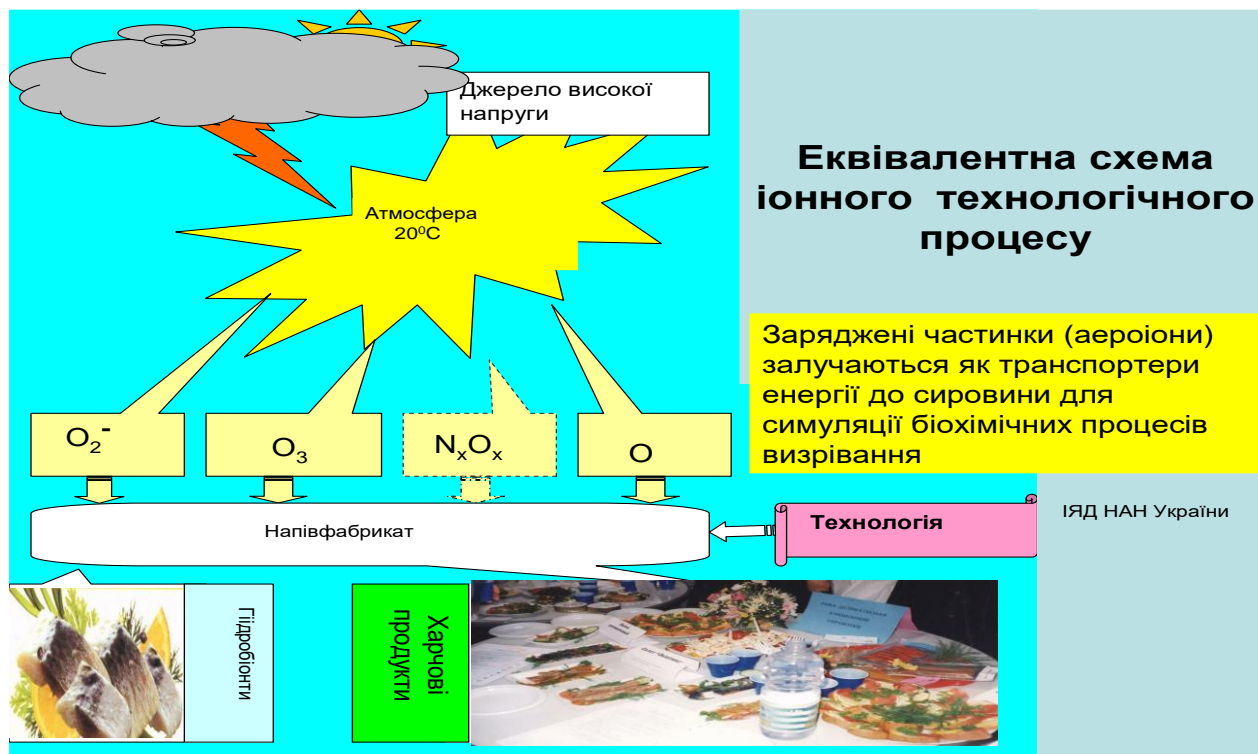


Рис. 5.6 Еквівалентна схема технологічних процесів з аероіонами

Зростання інтенсивності та керованість біологічними процесами забезпечує можливість здійснювати раніше недосяжні технології, такі як високоекономічне виробництво структурованих харчових продуктів, стійких при зберіганні, оригінальної кулінарної продукції тощо [76, 96, 189].

8. Досягнутий рівень науково-технологічного опрацювання аероіонних технологій дозволяє стверджувати про можливість організації масового виробництва делікатесних харчових продуктів (баликових, в'ялених, сушених, кулінарних) доступних для споживачів середнього статку [30, 76, 96, 157 189].

9. Можливості структурної модифікації обмежуються щільністю опромінюваного матеріалу. Для твердої синтетичної органіки – полімерів, сумнівно рекомендувати аероіонні технології структуризації. Але з урахуванням, що полімери

відносяться до переліку матеріалів з високими діелектричними властивостями, можна розраховувати на ефективність застосування аероіонів для хімічної активації і отримання сильної бактеріостатичної дії аероіонів в технологічних процесах знешкодження мікрофлори на поверхні твердих матеріалів та упаковок продукції [96, 176].

### 5.1.3 Дослідження фізичних основ технологічної структуризації органічних матеріалів

Досліджено найбільш виражені та суттєві для аероіонних технологій фізичні процеси. Насамперед ті, які визначають тепло-масовий обмін в сировині та продукції. Було встановлено, що не існує принципових обмежень навіть для повного видалення молекул води з продуктів. Досліджені також шляхи її повного видалення та моделі ефектів, які гальмують цей процес.

На рис. 5.7 наведено попередні результати динаміки зменшення маси обробленої моресировини.

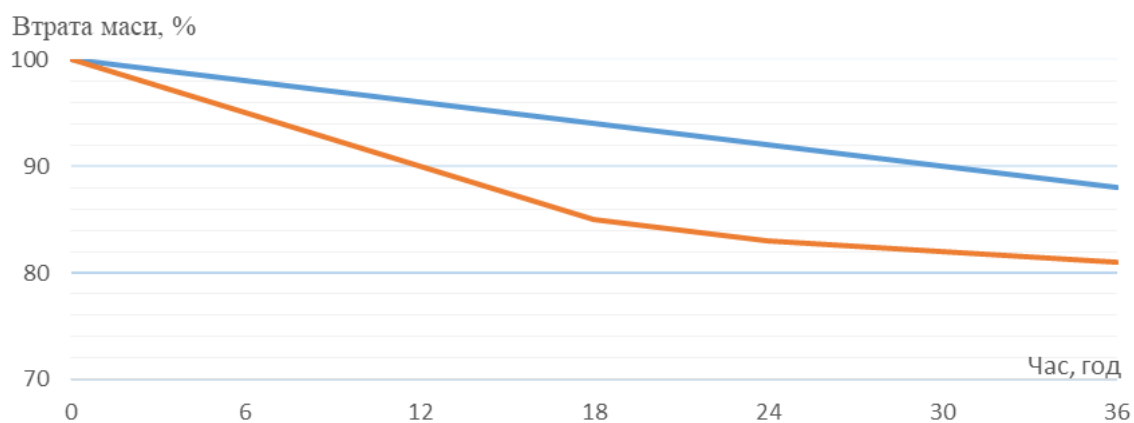


Рис. 5.7 Експериментальні результати інтенсифікації аеронами процесу зневоднення багатокомпонентної органічної сировини (риби з обмеженим вмістом жиру 10-12 %)

Остання відноситься до переліку складних композицій з крупних і дрібних органічних молекул, численних складних органічних сполук (ліпідів, білків), їх об'єднань в групи (м'язові мікро фібрили та сполучні тканини), мінералів.

Зразки опромінювались потоками аероіонів різної інтенсивності та в різних напрямках прикладеного електричного поля. Це дозволило зробити припущення, що однією з можливих причин поступового зниження інтенсивності перерозподілу маси зразків є зміна структури поверхні обробленої сировини. Спостерігається виразна залежність процесу від напрямку прикладеного електричного поля на користь технологій опромінення іонами при горизонтальному векторі поля.

Мікрофотографії, раніше наведені на рис. 5.4 свідчать, що відбувається ущільнення продукції та зникнення пор, раніше заповнених водою. Такі ефекти суттєво сповільнюють динаміку тепломасових процесів в багатокомпонентних органічних матеріалах (рибній сировині) для сучасних технологій. Тому для отримання технологічних рекомендацій застосування аероіонів, досліджувались різні за складом композиції. Цей показник в проведених експериментах визначався вмістом ліпідів в зразках.

На рис. 5.8 наведено експериментально отримані функції втрати маси зразків сировини з вдвоє більшим вмістом ліпідів у її складі, ніж це було в попередньому дослідженні.

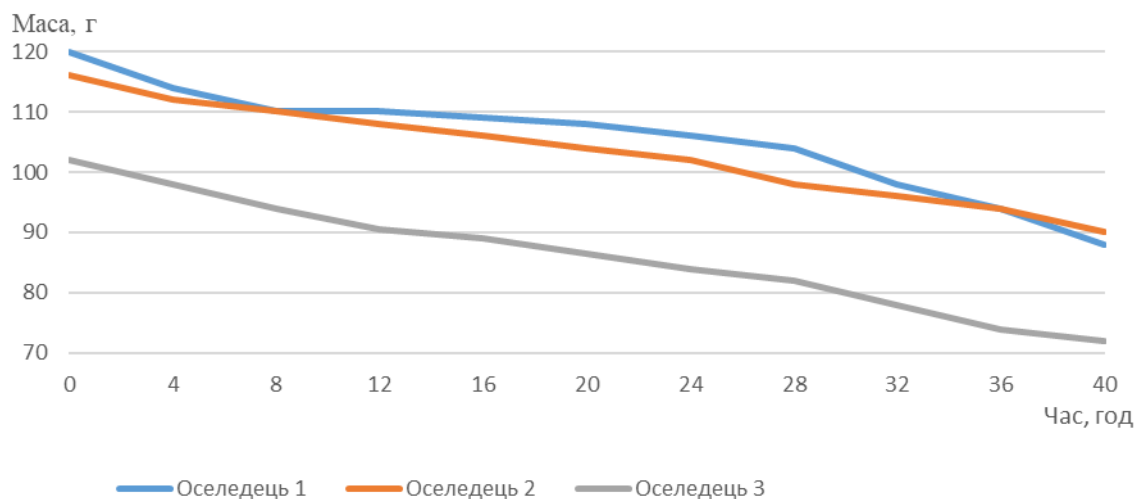


Рис. 5.8 Динаміка зміни маси природного органічного матеріалу зі значним вмістом жиру під дією іонів кисню

Графіки (рис. 5.8) ілюструють динаміку втрати маси багатокомпонентної органічної маси – рибної сировини (філе оселедців атлантичних) з високим (20-21%) вмістом жиру. Процес відбувається інтенсивніше, ніж у попередньому експерименті.

Похідна процесу в будь-якій точці має стабільну величину. Це вказує на те, що при високому вмісті ліпідів опір мікро-капілярів увесь період залишається незмінним. Це підтвердило припущення про те, що на кінцевому етапі мікропори заповнюються в'язкими масами ліпідів. За рахунок більш високих значень їх парціального тиску в органічному матеріалі, вони витискають залишки вільної води з мікропустот аж до їх заповнення жиром.

Цей ефект пояснює феномен модифікації структури органічних матеріалів навіть при поверхневій обробці зразків іонами. В іонних технологіях ліпіди є структурним фактором сприяння модифікації сировини. Тому для органічних матеріалів з високим вмістом ліпідів динаміка маси стабільна і не вимагає додаткових заходів для інтенсифікації процесу. Однак для органічної сировини з невисоким вмістом ліпідів, або і взагалі при їх відсутності спостерігається інша динаміка. Для ефективності такого технологічного процесу треба розробити необхідні заходи. З огляду на вищенаведену модель процесів під дією іонного опромінення, для сировини з обмеженим вмістом ліпідів, необхідно стабілізувати рух води через систему капіляр між міофібрилами. Досвід показав доцільність здійснення перерв у процесі опромінювання, що дало змогу вирівнювати вміст води в матеріалі. Для ефективності таких заходів було проведено серію експериментів з органікою різного складу. Результати наведено на рис. 5.9.

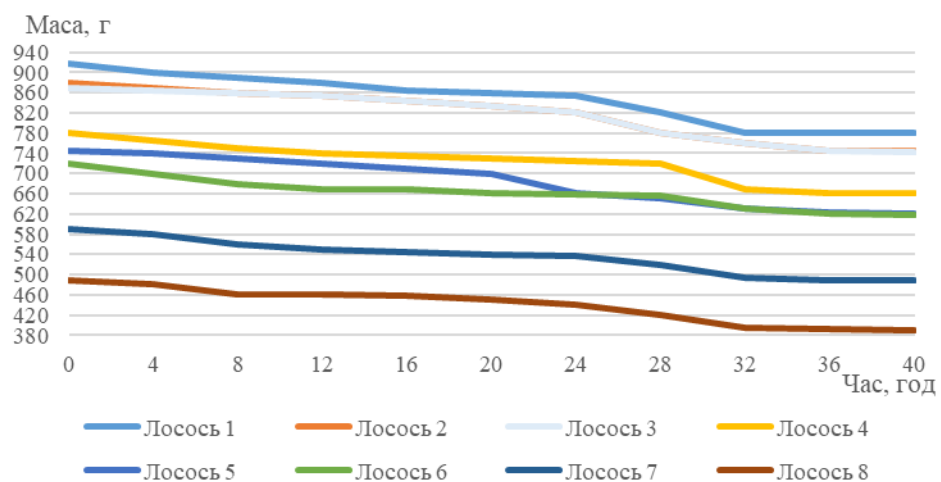


Рис. 5.9 Графік зміни маси рибної сировини, отриманий в оптимізованому режимі обробки іонами кисню

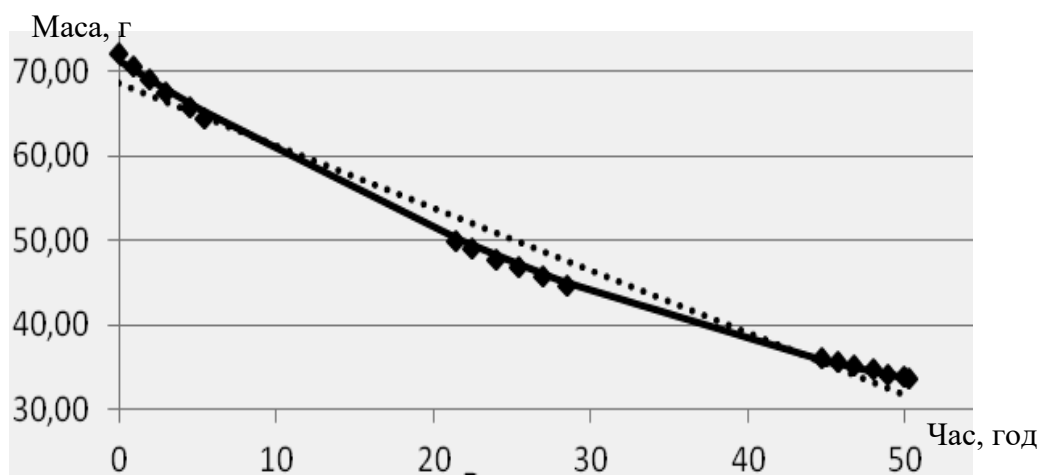
Процеси, відображені на усіх попередніх рисунках досліджувалися в звичайних температурних умовах та при нерегульованій вологості.

Джерелом аероіонів був високовольтний електророзрядний генератор, тому в робочій камері установки одночасно з процесами іонізації та рекомбінації іонів, було сильне електричне поле з напругою 0,5-1,0 МВ/м.

Оптимізація тепломасових процесів здійснювалась перериванням обробки на 5 годин через 20 годин безперервного опромінювання. З результатів видно, що після цього динаміка втрати маси суттєво зростала, як це і очікувалось. Причому, такий метод інтенсифікації обезвожування виявився придатним для усіх видів органічної сировини, що випробовувалася, і дозволив скоротити загальний термін технологічного процесу.

Окремого дослідження вимагали процеси обезвожування рибної сировини, що взагалі не містить жиру. Було експериментально досліджено динаміку тепломасових процесів, що відбуваються при її опроміненні щільними потоками аероіонів (до  $2 \text{ нА/см}^2$ ) з горизонтальним і вертикальним вектором прикладеного зовнішнього електричного поля [302].

Графіки функції тепломасових процесів в цій сировині [76] наведено на рис. 5.10 та 5.11.



Рівняння моделі процесу зневоднення:  $Y=7,96 \times 10^{-3} \times X_1^2 - 1,29 \times X_1 + 0,04 \times X_2 + 2,82 \times 10^{-3} \times X_1 \times X_2 + 69,18$   
Де Y – вміст води в продукті, %;  $X_1$  – час обробки аероіонами, год. (0-51);  $X_2$  – початкова маса зразка, г

Рис. 5.10 Графік залежності маси від часу обробки органічної речовини без жиру аероіонами з щільністю до  $2 \text{ нА/см}^2$  і потенціалі на кондукторі до  $35 \text{ кВ}$  (суцільна) та попередньо розрахованого (штрихова)



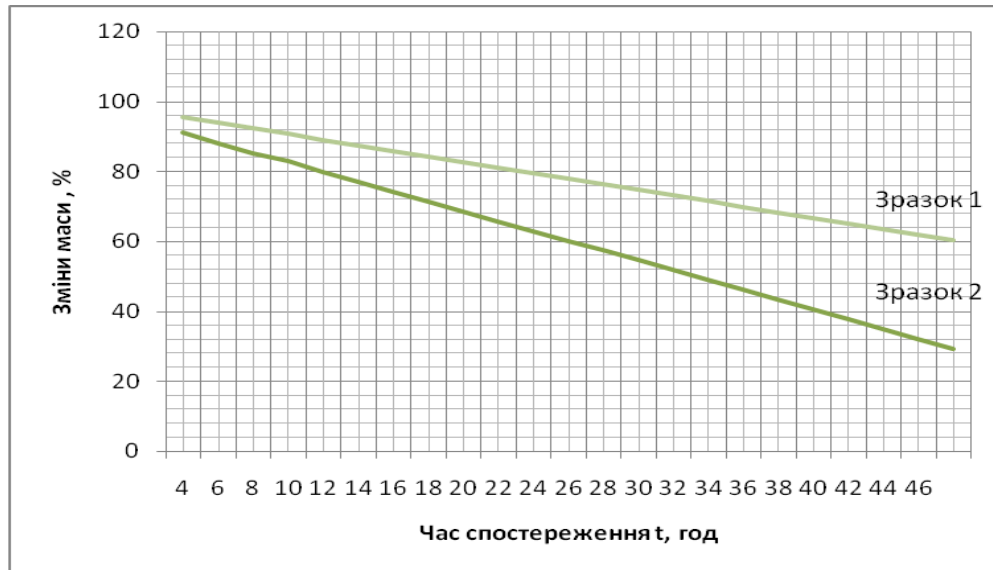


Рис. 5.11 Залежність маси від часу обробки органічної речовини аероіонами

На графіку видно, що в зразку 2 за рахунок опромінення аероіонами зменшення маси майже вдвічі інтенсивніше, ніж для зразка 1, який висушувався без впливу аероіонів і електростатичного поля [76].

З графіків видно, що зневоднення нежирної харчової сировини під дією іонного опромінювання є практично лінійним процесом, який можна попередньо розраховувати за існуючими методиками з певними похибками. Хід функції плавний, що свідчить про можливість її безперервного опромінювання понад 50 годин до отримання необхідної технологічної вологості.

Також виявлено вплив вектора поля. При вертикальному векторі електричного поля процес відбувається інтенсивніше (час обезводнення скорочується на 15-20%). На органолептичних показниках це не позначається

Такий суперечливий результат вимагає тлумачення і визначення факторів, які цьому сприяють. З аналізу проведених експериментів, можна стверджувати, що основним фактором є мала маса зразків, бо лише цей параметр відрізняється від усіх попередніх експериментальних досліджень. Можливо впливає і структура у співвідношенні різних її компонентів (м'язова тканина, сполучна тканини, кістки, шкіра).

#### 5.1.4 Аналіз результатів експериментів

Аналіз результатів експериментальних досліджень з різними складами органічних матеріалів свідчить, що фізичний процес зневоднення проходить в декілька послідовних етапів. На першому – активно видаляється вільна вода. Через нелінійний розподіл електростатичних сил в матеріалі видалення відбувається з поверхні зразків. Видалення води з поверхні заміщується водою з глибинних шарів і поступає через мікропустоти між фрагментами органічної сировини. Проникання гідростатичних сил в сировину сприяє поступовому збільшенню опору руху води і швидкість її видалення зменшується. Сильне гальмування цього процесу настає, коли пори на поверхні зразків зменшуються.

Тому режим аероіонної обробки необхідно узгоджувати з природним процесом капілярного руху рідини в пористих матеріалах. Для цього режим опромінювання необхідно оптимізувати для усіх стадій зневоднення пористої органічної сировини шляхом введення пауз 1-4 години, коли темп зневоднення стає недостатнім для технологічних цілей.

Відзначається залежність інтенсивності процесу модифікації від складу сировини та її геометрії (маси). Оптимізація режимів обробки за цими показниками суттєво покращує динаміку процесу навіть при зменшенні маси на 40-45%.

Результати досліджень свідчать про можливість залучення іонізуючих опромінювань для створення нової високоінтенсивної технології виробництва продуктів харчування.

Виявлено, що після видалення вказаної масової частки води з поверхні починають видалятися жирові компоненти сировини, які перешкоджають подальшому видаленню води через звужені та заповнені жиром пори. Біомаси, які видаляються разом із водою становлять до 10% маси завантаженої сировини. Ці маси мають в'язку консистенцію, прозорі, злегка пахнуть рибячим жиром без ознаку окислення. Була виявлена висока активність цих мас в процесах розкислення металу для видалення іржі з їх поверхні. Це відкриває перспективу розширення асортименту продукції та отримання додаткових прибутків [76, 96].

### 5.1.5 Висновки

Досліджено процеси, якими характеризується взаємодія заряджених частинок низької та наднизької енергії з живою матерією, органічними матеріалами та системами. В обсязі даної роботи:

1. Досліджено фізико-хімічні процеси модифікації складних органічних систем під дією щільних пучків іонів та випромінюваннями наднизьких енергій [302].

В дослідження було доведено, що при високих концентраціях полів іонного опромінювання розпочинаються процеси, які близькі до вже вивчених процесів модифікації матерії під впливом іонізуючої радіації (структурно-механічні біохімічні, хімічні та ін.) – ті процеси, які і є основою технологій виробництва. Встановлено, що для запуску процесів модифікацій необхідно формувати потоки аероіонів (або стаціонарні поля опромінювання) з концентраціями понад  $10 \cdot 10^7$  іон/см<sup>3</sup>. У вказаному діапазоні щільності (концентрації) взаємодія інтенсивних іонних пучків близька до тієї, яка є при використанні високо-енергетичної радіації [136].

Експериментально досліджені ефекти структурної модифікації складних органічних речовин природного походження і встановлено, що вони можуть відбуватися під впливом іонів кисню наднизьких енергій (до 17 кеВ) [76, 96, 136].

Встановлено основні закономірності перебігу процесів модифікації органічних композицій в залежності від інтенсивності та енергії потоків аероіонів. Показано, що іони низьких енергій не здійснюють прямої модифікації органічних композицій, але вони забезпечують ефективне транспортування електричної енергії безпосередньо на молекулярний, а в біомолекулах – на клітинний рівень структури органічних матеріалів [302].

Встановлено, що з використанням ефектів взаємодії низькоенергетичних заряджених частинок можна створити інтенсивні та придатні для практичного використання процеси структуроутворення та модифікації структур органічних систем і їх композицій. Виявлений ефект, очевидно, пов'язаний з інтенсивним

видаленням з опромінюваного матеріалу вільної води, а відтак з перерозподілом ліпідного комплексу по усьому об'єму опромінюваного зразка.

Встановлено, що за рахунок передачі іонами енергії до матеріалу, там інтенсифікуються не тільки тепломасові процеси, а відбувається модифікація біохімічної структури опромінюваних матеріалів.

2. Досліджено біофізичні процеси в інтенсивних потоках заряджених частинок наднизької енергії [302].

Встановлено, що при високій концентрації заряджених частинок в камері аероіонної технологічної установки проявляються ефекти дії аероіонів не тільки на фізико-механічну структуру матеріалів, а відбувається активний вплив на хід хімічних процесів в біомасах. Виявлено основні закономірності біохімічних процесів в багатокомпонентній органіці під впливом потоків аероіонів (4-8 нА/см<sup>2</sup>). Результати досліджень свідчать на користь їх використання для подальшого розвитку радіаційних технологій з низькоенергетичними іонами атмосферних газів, насамперед для потреб харчової галузі.

Встановлено, що в частині впливу на біохімічні процеси в органіці концентровані поля іонів атмосферних газів (сильно іонізованого повітря) є проміжним етапом між біохімічними та радіаційними технологіями. Зберігаючи усі переваги відомої радіаційної обробки, аероіони здійснюють це з меншими матеріальними і соціальними витратами, не вимагають особливих засобів протирадіаційного захисту і не виникає проблем з спеціальною дорогою технологічною дозиметрією.

Проаналізовано і узагальнено практичний досвід технологічного використання біофізичної дії іонів низьких і наднизьких енергій при виробництві різноманітних промислових виробів. Теоретично і експериментально встановлено, що перспективними напрямками прогресу іонних технологій є обробка органічних матеріалів різної структури з метою стимулювання і керування біофізичними реакціями в їх структурі.

В дослідженнях встановлено, що біохімічні реакції в складних органічних матеріалах, наприклад, в харчовій сировині, під впливом аероіонного

опромінювання відбуваються більш прискорено, ніж в звичайних умовах, коли джерелом енергії модифікації є тепла або хімічна енергія. Це спостерігається практично для усіх випробуваних видів харчової сировини.

Під дією іонізованого повітря суттєво підвищується активність ферментів. Експериментально доведено, що при аероіонному опроміненні біохімічні реакції зростають і забезпечують цілеспрямовану модифікацію сировини в органічній сировині навіть з мінімальним вмістом ферментів.

З результатів досліджень впливу аероіонів на перебіг біохімічних реакцій і модифікацію хімічної структури складних органічних матеріалів природного походження випливає, що на цій основі можна створювати новітні технології виробництва харчових продуктів.

3. Досліджено механізми утворення та деградації структур складних органічних матеріалів природного походження під дією концентрованих потоків заряджених частинок низької енергії [302].

Показано, що обробка концентрованими потоками іонізованого повітря, насамперед, різко збільшує інтенсивність тепломасових процесів в природній органіці та швидке видалення вільної води з матеріалу. Це проявляється у деградації структури сировини і її модифікація в матеріал (кінцевий продукт) іншої структури. Мікрофотографії структури опромінених аероіонами матеріалів з переліку природної органічної сировини харчової галузі свідчать, що в результаті дії аероіонів відбувається ущільнення структури органіки та утворення нових модифікованих структур, інколи не характерних для органічних речовин.

Доведено, що модифікація органіки відбувається завдяки здатності аероіонів передавати енергію безпосередньо молекулам органічних систем. Передана енергія стимулює в матеріалі процеси іонізації та збудження молекул, які далі розряжаються по радикальному механізму до утворення елементарних вільних зарядів – гідратованих електронів. Останні, маючи високу спорідненість з молекулами кисню, в тому числі в складі води, формують компактні кластери, здатні приходити в рух під дією прикладеного зовнішнього електричного поля. Це вказує на

двохкомпонентний механізм збудження й інтенсифікації тепломасових процесів – вільних електронів та електричного поля.

5. Досліджено взаємодію заряджених частинок низької енергії з багатокомпонентними системами зі складних органічних сполук та живої матерії.

Показано, що іонні технології можна віднести до електрофізичних радіаційних технологій, для яких характерним є ефективний вплив та контроль за процесами на усіх етапах. При досягненні певної концентрації іонів в одиниці об'єму атмосфери в реакційній камері установки спостерігається в усіх експериментах в твердому тілі та в природній органіці. В аероіонних і радіаційних технологіях відбуваються однакові результуючі ефекти і відрізняються вони лише меншою інтенсивністю.

За рахунок надійної добре опрацьованої метрології, притаманної електрофізичній радіаційній техніці, вона здатна забезпечити виробництво нової високоякісної продукції зі стабільними параметрами. Стабільними в процесі випуску і впродовж усього терміну їх використання (зберігання).

Розроблено і реалізовано в лабораторних умовах аеріонні технології отримання нових видів кулінарних і кондитерських виробів з комбінації різної за властивостями сировини в інтегрований продукт. Експериментально доведена перспектива використання інтенсифікуючої дії аероіонів для взаємного доповнення в кінцевому продукті корисних властивостей різних видів харчової сировини.

Експериментально доведена можливість використовувати аероіони в технологіях виробництва, пов'язаних з природними органічними матеріалами. Показано, що при аероіонній обробці природної сировини детекторами ефектів можуть служити галузеві метрологічні методики, а вимірювання здійснюються на сертифікованому обладнанні цих галузей.

Здійснено експериментальні дослідження взаємодії аероіонів з органічними системами, що містять білково-ліпідні композиції, характерні для природної органічної харчової сировини. Експертні висновки робились порівнянням отриманих експериментальних даних з параметрами еталонних зразків, оброблених за традиційними технологіями. Показано, що опромінення аероіонами забезпечує модифікацію хімічного складу природної органічної сировини і процес модифікації

надійно детектується за параметрами кислотного числа (КЧ) і перекисного числа (ПЧ). Встановлено, що аеріонна обробка інтенсифікує біохімічні процеси в різних сполуках не однаково. Виявлено, що процеси окислення жиру в аеріонах відбуваються м'якше та без утворення летючих сполук. Виявлено, що опромінена рибна сировина практично не має звичного «рибного запаху» і таке дезодорування притаманне лише двом методам обробки – опроміненню іонізуючою радіацією і аеріонами, а це вагомий доказ, що аеріонні технології являються фактично одним з видів радіаційних, але здійснених в самій низькоенергетичній області.

Встановлено, що білки модифікуються найенергічніше, тому, незважаючи на короткочасну обробку аеріонами, харчова цінність кінцевого продукту практично не поступається продуктам з тривалою тепловою обробкою.

З урахуванням цього було запропоновано і експериментально перевірено технологію виробництва з опроміненої сировини кулінарних і кондитерських виробів з риби. В основі технології – використання ефектів інтенсифікації аеріонами біохімічних процесів в органіці. Показано, що можна здійснювати оригінальні технології харчових продуктів, які іншим способом не можна об'єднати в кінцевий продукт, наприклад, ввести рибу в склад солодких фруктових тортів чи інших кулінарних виробів.

Вивчено малодосліджені механізми впливу низько енергетичних іонів атмосферних газів на живі клітини. Виявлено прямий бактерицидний ефект дії аеріонів.

Показано, що опромінення іонами суттєво знижує вміст мікроорганізмів на поверхні опромінюваних органічних зразків. Встановлена ефективність непрямой бактериостатичної та бактерицидної дії аеріонів, яка проявляється при інтенсивному висушуванні органічної сировини навіть при звичайній температурі.

Експериментальні роботи з природною сировиною показали, що в реальних технологічних процесах, наприклад, в'ялені продукти за аеріонними технологіями мають більші терміни зберігання і повніше відповідають санітарним нормам споживання харчових продуктів.

Отримані наукові і практичні результати даної роботи суттєво розширюють знання і сприяють подальшому прогресу фундаментальної і технологічної науки щодо процесів, які відбуваються в органічних матеріалах під дією заряджених частинок низької енергії [76, 96, 189, 302].

## **5.2 Розробки і випробування інноваційних іонних технологій цілеспрямованої модифікації структур органічних матеріалів**

Аероіонні технології для структурної модифікації моресировини були започатковані в 1996 році спеціалістами ІЯД НАН України та ТИПРО-центр на замовлення рибопереробної галузі. Було створено ряд унікальних технологій переробки риби, які відрізнялися від традиційних і привблювали дуже малим енергоспоживанням, вони екологічно безпечні і дозволяють отримувати із звичайної морської сировини ряд делікатесних продуктів. На перших етапах енергія заряджених частинок використовувалась для виготовлення в'яленої рибної продукції. Мінімальні енерговитрати, простота процесу переробки при звичайній кімнатній температурі без нагрівання чи охолодження, надала можливість виробництва високоякісної рибної харчової продукції навіть з малоцінної риби. Висока оцінка такої продукції на Міжнародних галузевих конференціях спонукала до розгортання дослідно-конструкторських робіт по створенню промислової техніки для здійснення нових технологій. Була поставлена і реалізована задача створення промислових технічних засобів різного призначення для широкого впровадження аероіонів до переробки морепродуктів.

Разом зі співробітниками технологічних центрів рибної галузі Далекого Сходу 1994-1998 рр. було створено низку оригінальних і захищених патентами технологій високоякісних харчових продуктів з терпуга, яка важко піддається звичайним методам обробки і має чітко виражену сезонність вилову. Перша в світі аероіонна ехнологія приготування провісної риби в цехових умовах була зареєстрована в 1996 році об'єднаним колективом співробітників ТИПРО та ІЯД НАН України.



З кінця 2000 рр. усі дослідження та технологічні розробки аероіонних технологій здійснювалися лише в ІЯД НАН України. Було розроблено низку іонних технологій приготування оригінальної рибної продукції. Вперше в світовій практиці було розроблено і реалізовано аероіонні технології кулінарної продукції та готової упакованої рибної продукції.

З 2011 року до досліджень та технологічних експериментів на аероіонних установках в ІЯД було залучено фахівців-технологів, аспірантів та магістрів кївського Національного університету природокористування і біоресурсів (НУБіП) з потужною метрологічною базою біохімічних досліджень.

В ІЯД і НУБіП виконано комплексні дослідження можливостей і шляхів застосування аероіонів для переробки сировини з прісноводної риби вітчизняного виробництва з метою зниження залежності виробників України від імпорту морської сировини. Розроблялись кулінарні та кондитерські вироби.

Головні напрямки досліджень і розробок – виробництво пресервів з прісноводної риби, розширення асортименту кулінарних виробів, нові оригінальні технології копченої та сушеної продукції. Було встановлено, що харчова продукція, виготовлена за допомогою опромінення аероіонами, переважає існуючі види аналогічних продуктів за своїми якісними показниками. Вона не містить ніяких хімічних консервантів чи стабілізаторів, але при цьому тривалий час може зберігатися при позитивних температурах без втрати своїх споживчих характеристик.

### **5.3 Аероіонна технологія рибних рулетів з різної сировини**

#### **5.3.1 Дослідження процесів використання енергії іонів для гомогенізації гетерогенних структур органічних матеріалів**

Технологічна актуальність – поширення в харчовій галузі методів виробництва харчових продуктів за принципами доповнення характеристики однієї сировини іншою. Ці методи дозволяють виробляти високоякісну гастрономічну продукцію,

комбінуючи склад напівфабрикатів або з метою компенсації недоліків компонентів, або взаємного доповнення властивостей для отримання нового оригінального продукту. Типовими представниками є ковбасні вироби, рулети тощо.

З цією метою було досліджено здатність аероіонів запускати механізми структурної та біохімічної модифікації комбінованої органічної маси напівфабрикатів з двома чи більше видами харчової сировини з різними показниками. Була встановлена виробнича можливість використання такого методу, яку наведено на рис. 5.12. Перспектива успішного застосування аероіонів для виробництва складних композицій харчової органічної сировини підтверджена результатами перших експериментів по аероіонній обробці ковбас. Раніше було показано ефективність технології з використанням аероіонів для виготовлення сиров'ялених ковбас. Зазначимо, що це найпростіший з технологічних процесів, в якому шляхом зневоднення і структуризації фаршу забезпечується максимальна площа контакту складових. Водночас, це надійний аргумент на користь поширення і на інші технології комбінованих продуктів з двох та більше видів сировини, в тому числі з різними фізико-хімічними властивостями.

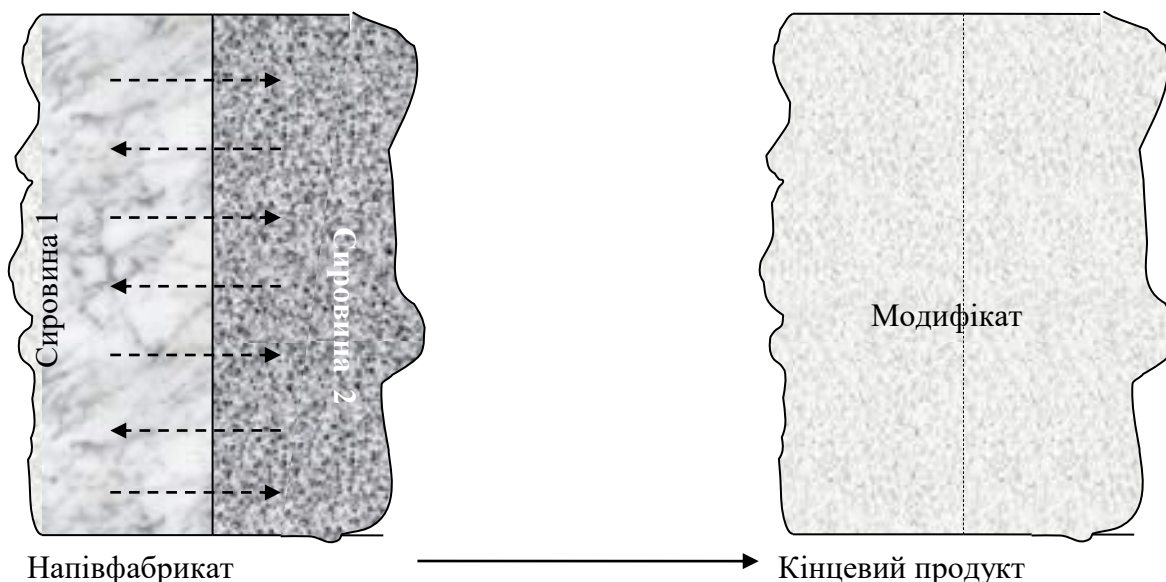


Рис. 5.12 Схема формування складних композицій органічних сполук для отримання кінцевого продукту з оригінальними властивостями

Перспектива успішного застосування аероіонів для виробництва складних композицій харчової органічної сировини підтверджена результатами перших

експериментів по аероіонній обробці ковбас. Раніше було показано ефективність технології з використанням аероіонів для виготовлення сиров'ялених ковбас. Зазначимо, що це найпростіший з технологічних процесів, в якому шляхом зневоднення і структуризації фаршу забезпечується максимальна площа контакту складових. Водночас, це надійний аргумент на користь поширення і на інші технології комбінованих продуктів з двох та більше видів сировини, в тому числі з різними фізико-хімічними властивостями.

Раніше застосування аероіонів розглядалось в площині залучення ефектів інтенсивного обезвожування завантаженої фаршевої маси для її структуривання. Хоча було відзначено, що при тривалому опроміненні (понад 10 діб) з цієї маси формувалася високоякісний ковбасний продукт з усіма необхідними структурними і біохімічними показниками. При аналізі було прийнято відомі на той час ефекти, які спостерігалися і трактувались як структуризація дрібнодисперсної маси, де одним з головних механізмів враховувались сили змочування і взаємного притягування подрібнених міофібрильних складових.

Проведені зараз дослідження підтверджують припущення, що вказаний вище ефект в процесі тривалого опромінювання зарядженими частинками поступово підсилюється електростатичними силами притягування. Ці ефекти добре досліджені в радіаційних технологіях переробки каналізаційних стоків і відомі під назвою електростатичної коагуляції. Завдяки цьому ефекту процес виготовлення ковбас фактично керований електрофізикою і дозволяє ефективно сприяти її біофізичній модифікації (в'яленню-визріванню).

На певному етапі обезвожування взаємний контакт між різними компонентами дрібнодиспергованого матеріалу (фаршу) відбувається на великій поверхні та під дією електростатичних сил притягування. За таких умов біохімічні процеси в цій масі відбуваються ефективно і за зрозумілими механізмами.

Реально випробувані технології аероіонного в'ялення ковбас підтвердили, що при інтенсивних тепломасових процесах (структуризації) дрібнодисперсних органічних мас паралельно відбувається біохімічна модифікація.

Традиційні технології досягають цих результатів шляхом високотемпературного впливу на перебіг біохімічних реакцій та його тривалого часу. Тому комбіновані продукти за цими технологіями відносяться до дорогих процесів, а виготовлений продукт має об'єктивно високу вартість.

Метою досліджень було створення технології виготовлення кулінарних виробів типу варено-копчених рулетів комбінацією сировини з різних видів риби.

Особливістю даного дослідження є пошук шляхів на підвищення загальної якості продукту і безпеки його споживання. В цьому напрямку викликає сумнів доцільність процесу копчення, який є нормативним для традиційних технологій.

З метою детального вивчення шляхів створення новітніх інноваційних технологій комбінованих продуктів з використанням заряджених частинок були здійснені спеціальні дослідження усіх складових аероіонного процесу формування готового продукту шляхом комбінації різнорідних компонентів. Об'єктом досліджень було вибрано технологію варено-копчених рибних рулетів, спеціально ускладнену використанням різнорідних матеріалів для створення однорідного кінцевого продукту. Ці дослідження виконувались з орієнтацією на подальше використання результатів для створення нових електрофізичних технологій комбінованих харчових продуктів. Такий процес складніший за модифікування фаршевих сумішей, але його позитивні результати створили оптимістичні перспективи реалізації новітніх методів виробництва широкого переліку матеріалів. Еталоном були зразки, виготовлені за стандартними технологіями з використанням добре розвинених методів метрології та керування процесами. Результати технології виготовлення такого ж продукту, але вже з широким залученням електрофізики й іонних технологій, порівнювались з еталоном і оцінювались за шкалою параметрів, прийнятих в харчовій галузі, де добре опрацьовано методи метрологічного контролю за процесом на всіх етапах.

Це обумовило вибір саме методики варено-копчених рулетів для дослідження можливості її удосконалення шляхом застосування опромінювання іонами атмосферних газів з невеликими енергіями. Експертні висновки щодо ефективності застосування аероіонів формувалися на підставі порівняння результатів біохімічних

перетворень, отриманих на всіх етапах модифікування сировини/напівфабрикатів і порівняння їх з еталонним процесом.

Огляд наявних літературні матеріалів свідчить, що виробництво рулетів, особливо комбінованих з різної сировини є задачею мало привабливою. Для отримання достовірних результатів було вирішено експериментально випробувати найбільш складний варіант – спробувати виготовити рулет з неоднорідної сировини, де очікувались значні проблеми. Насамперед через різку відмінність характеристик вибраної для цих випробувань сировини – прісноводного коропа та морської скумбрії [303].

За рахунок того, що скумбрія – це морська риба, в її м'ясі вміст вітамінів та мінералів більший, що привабливо використати для підвищення якості рулетів, хоча є і технологічна проблема отримання якісного філе, яке б не містило кісток.

Удосконалення технологічного процесу було необхідне через те, що традиційні технології виготовлення рибних рулетів мають цілий ряд особливостей, які обмежують можливості виготовлення рулетів з комбінації різної рибної сировини.

Для вибору стратегії такого удосконалення було проаналізовано попередній і сучасний досвід наукоємних технологій з урахуванням електрофізики, хімії харчових продуктів, вимог торгівлі та дієтичних вимог. В результаті було встановлено, що досягти поставленої мети можна лише застосувавши сучасні методи модифікації сировини, насамперед, аероіонні технології (визрівання та формування напівфабрикатів, копчення), радіаційні електрофізичні технології (ІЧ-випромінювання) варення продукту, оптимального методу соління.

Схема досліджень наведена на рис. 5.13 включає основні технологічні рекомендації на виготовлення традиційних копчених рибних рулетів. Але в неї включені додаткові технологічні стадії – обробка аероіонами, обробка ІЧ-випромінюванням, а традиційне тривале димне копчення здійснюється методом електрокопчення.

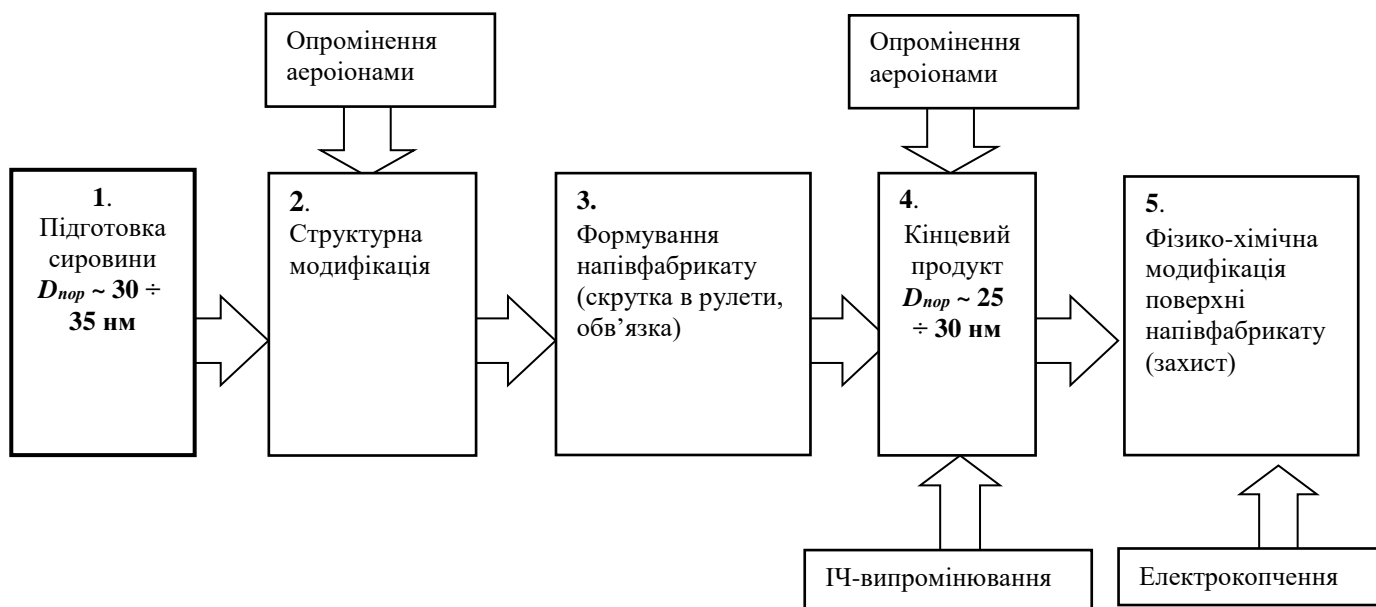


Рис. 5.13 Схема дослідження ефективності іонного опромінення в технологічному процесі модифікації двокомпонентного органічного матеріалу

Новації спрямовані на отримання можливості поєднувати в кінцевому продукті компоненти з різними фізико-хімічними характеристиками – щільністю, вмістом вологи, консистенцією, біохімічним складом. Для даного експерименту використано сировину, яка суттєво відрізняється за своїми основними показниками. Біохімічні показники після попередньої обробки наведено в таблиці 5.1.

Таблиця 5.1

Біохімічні параметри компонентів для досліджень після попередньої обробки

| Сировина            | Показники, % |         |               |                         |                                |                     |
|---------------------|--------------|---------|---------------|-------------------------|--------------------------------|---------------------|
|                     | Волога, %    | Сіль, % | ФТА, мг/100 г | Перекисне число, % йоду | Кислотне число, мг КОН/1г жиру | Альдегідне число, % |
| Скумбрія атлантична | 64           | 2,3     | 0,135         | 0,121                   | 2,175                          | 2,54                |
| Короп звичайний     | 74           | 2,3     | 0,133         | 0,115                   | 2,125                          | 2,37                |

В сировині з коропа практично відсутні м'язові ферменти і він відноситься до поганозріючих продуктів. Через це в традиційній технології біохімічну модифікацію

такої сировини здійснюють високотемпературною обробкою (відварюванням або смаженням).

В нашому експерименті біохімічну модифікацію здійснено вже на першому етапі. При підготовці матеріалів для напівфабрикатів здійснюється примусова ферментація сировини з коропа комплексом кишкових ферментів скумбрії шляхом їх попередньої переробки (розробки, соління, ароматизації).

За своїми фізичними параметрами компоненти кардинально відрізняються. Сировина зі скумбрії має драглисту консистенцію, тому важко піддається механічній обробці, важко видалити кістки та шкіру для підготовки пластин для складових напівфабрикатів. В той же час заготовка сировини з коропа є жорсткою пластиною зі щільною консистенцією. Тому поєднання їх в рулет без додаткової обробки практично неможливе.

Для усунення вказаних проблем запропоновано передбачати додаткові стадії іонної обробки для ущільнення структури заготовки зі скумбрії, та для часткового визрівання комплектуючого з коропа. Процес формування рулетів здійснюється вже після того, як структура заготовок модифікована до стану, придатного для подальших механічних операцій скручування пластин в рулети.

Окремо здійснюється етап модифікації матеріалу в скручених напівфабрикатах. В даному випадку, через те, що одна зі складових рулетів належить до важковизріваючої сировини, зразки піддаються дії ІЧ-випромінювання для інтенсифікації біохімічних процесів визрівання та процесів взаємного проникнення органічних сполук в обидва компоненти рулету. І здійснюється це при опроміненні аероіонами напівфабрикатів для стимулювання тепломасових процесів переміщення ліпідів в готовому продукті.

### **5.3.2 Методика експерименту**

Дослідження здійснювались на повнорозмірному макеті промислової аероіонної установки для обробки харчових продуктів. Методика експерименту розроблялась на основі та за рекомендаціями діючих зараз типових технологічних

регламентів виробництва комбінованих харчових продуктів з риби (рис. 5.14). З урахуванням особливостей їх здійснення з запропонованим фізичним фактором хімічної та структурної модифікації.



Рис. 5.14 Лабораторна установка для експериментів

Опромінювання іонами здійснювалось при кімнатній температурі 12-20 годин до отримання необхідної якості комплектуючих напівфабрикатів (щільність, еластичність, визрівання, % обезводнення).

Опромінювання закінчувалось при досягненні зразками необхідної структури (міцності на розрив, еластичності), необхідної для формування рулетів. Ці показники було встановлено експериментально. Було виявлено, що ознакою готовності компонентів є підсихання поверхні м'яса коропа та легке видалення шкіри з філе скумбрії, яка використовується як природний плівковий матеріал для загортання рулету. На відміну від синтетичних плівок та пергаменту, шкіра скумбрії має властивості наномембрани і забезпечує вільний доступ кисню до сировини в подальших біохімічних процесах визрівання і надійно перешкоджає проникненню мікрофлори.

Ступінь біохімічної модифікації складу органічної речовини в заготовках-пластинах контролювався органолептично. При досягненні необхідних показників готовності комплектуючих, здійснювалось механічне формування з них рулетів. Пластини накладались одна на одну в один шар, скручувались в рулончик та загортались в зняту шкіру скумбрії та механічно скріплювались шпагатом.



Холодне електрокопчення проводилося впродовж декількох хвилин до моменту отримання зовнішнього вигляду рулетів та їх органолептичних показників, регламентованих діючими стандартами на цей вид харчової продукції. Для випробувань можливості нанесення товстих захисних шарів, електрокопчення здійснювали тривалий час (15-20 хв), опромінювали рулети ІЧ-променями 5-10 хв для фіксації захисної плівки.

Процес закінчували, коли кінцевий продукт набував властивостей, регламентованих діючою нормативною документацією на харчову продукцію гарячого копчення. Кінцевим результатом експериментів вважався придатний (за органолептичними параметрами) до споживання готовий рибний рулет. Перевірка досягнутих результатів здійснювалась шляхом витримування готового продукту в стандартному пергаменті та у вакуумній упаковці.

Зразки модифікатів (готових рулетів) зберігали в звичайних побутових умовах впродовж 14 днів і з щоденним контролем біохімічних і мікробіологічних показників.

### 5.3.3 Результати досліджень

Показники якості контрольного (еталонного) зразка, виготовленого за стандартним технологічним регламентом харчових продуктів гарячого копчення наведені в табл. 5.2.

Таблиця 5.2

Біохімічні показники якості еталонного зразка

| Назва   | Кислотне число, мг<br>КОН/1г жиру | Перекисне число, %<br>йоду | ФТА, % |
|---|-----------------------------------|----------------------------|--------|
| Контрольний зразок<br>(стандартний рулет г/к) | 3,652                             | 0,029                      | 0,273  |

Біохімічні показники якості на різних етапах виготовлення рулетів з використанням аероіонів та променевих фізичних методів обробки наведено в таблиці 5.3.

Таблиця 5.3

Біохімічні показники якості рибних рулетів з використанням фізичних методів обробки

| Технологічна операція                       | Кислотне число, мг<br>КОН/1г жиру | Перекисне число,<br>% йоду | ФТА, % |
|---|-----------------------------------|----------------------------|--------|
| Підготовлена сировина                       | 2,152                             | 0,005                      | 0,131  |
| Напівфабрикат                               | 1,289                             | 0,009                      | 0,136  |
| Напівфабрикат після<br>аероіонної установки | 1,596                             | 0,016                      | 0,225  |
| Обробка інфрачервоним<br>випромінюванням    | 2,147                             | 0,024                      | 0,239  |
| Упакований продукт                          | 2,953                             | 0,025                      | 0,241  |

Аналіз результатів проведених досліджень доводить перевагу електрофізичних технологій модифікації складних композицій органічних сполук низькоенергетичними іонами повітря та перспективу їх застосування для виробництва комбінованої копченої продукції в харчовій галузі. За дослідженими методиками можна виробляти продукцію стандартної якості навіть з комбінації різнорідної сировини, яку звичайними методами здійснити неможливо.

Про це свідчать експериментально отримані показники якості дослідних зразків варено-копчених рулетів, виготовлених виключно електрофізичними методами, що за діючими стандартами відносяться до продуктів гарячого копчення. Були визначені: кислотне число, перекисне число та значення ФТА. Ці показники є значно нижчими в виготовлених зразках, аніж це регламентується контрольними цифрами діючих стандартів.

Нижче наведені графічні дані про динаміку біохімічних параметрів в процесі виготовлення харчової продукції групи варено-копчених рулетів шляхом модифікації структури композитної сировини за електрофізичними методами (рис. 5.15 та 5.16).

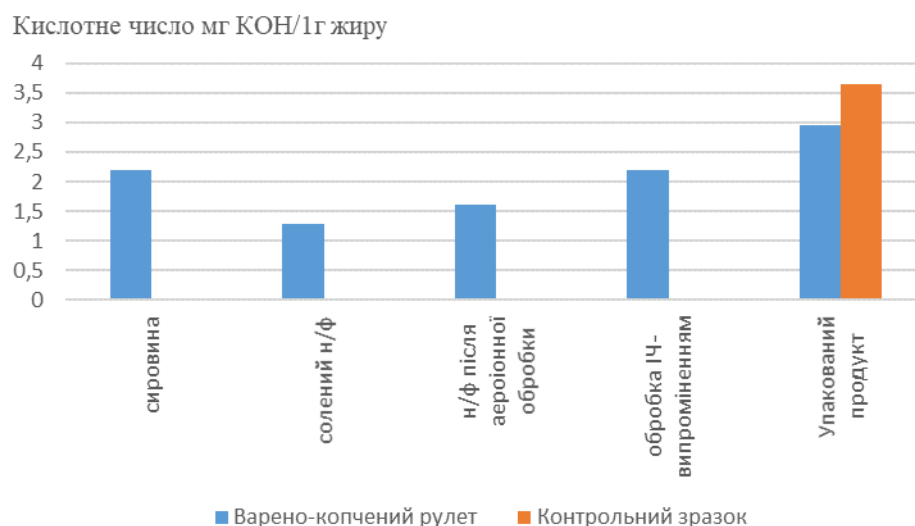


Рис. 5.15 Зміна кислотного числа в матеріалі рибних рулетів, виготовлених з аероїонною обробкою, на різних етапах виготовлення

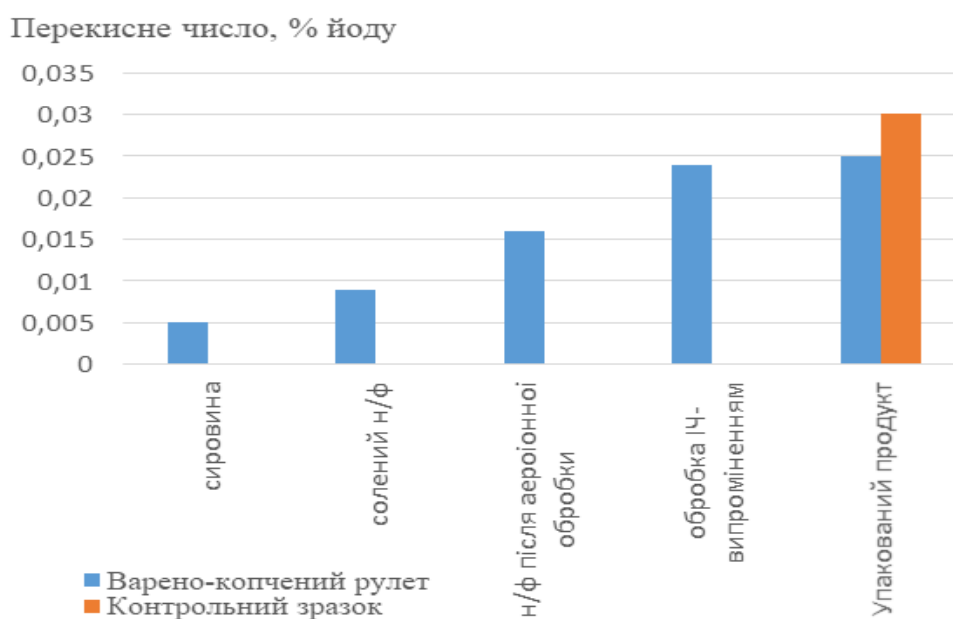


Рис. 5.16 Динаміка показника перекисного числа, на різних етапах виготовлення рибних рулетів з залученням аероїонів

З наведених на рис. 5.16 результатів досліджень видно, що перекисне число в масі сировини було в межах норми – 0,03. Як і очікувалось, в технологічному процесі воно зросло, але не перевищило допустимого рівня, регламентованого діючими стандартами на ці продукти.

Це свідчить про ефективність запропонованого електрофізичного методу виробництва рибних рулетів.

Ще одним аргументом на користь електрофізичних технологій є результати досліджень ФТА (рис. 5.17), виконаних на усіх етапах виробництва нової комбінованої продукції. Тому формування цього параметру в складі дослідженого кінцевого результату іонної модифікації є показником того, що опромінення аероіонами забезпечує взаємне проникнення продуктів біохімічних реакцій в біомасу готового продукту.

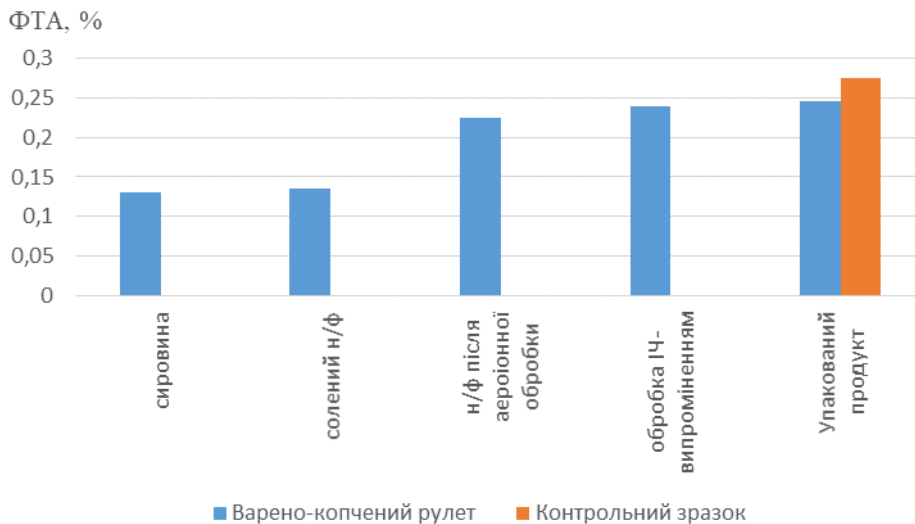


Рис. 5.17 Динаміка ФТА в процесі виробництва рибних рулетів з залученням аероіонів

З вищенаведених результатів видно, що значення ФТА в кінцевому продукті суттєво нижчі за межу, регламентовану діючими стандартами якості на даний вид харчових продуктів. Динаміка біохімічних показників в процесі зберігання кінцевого продукту свідчить про ефективність усього електрофізичного технологічного процесу, в основі якого вплив іонів низької енергії на структуру складних органічних сполук.

З цією метою були здійснені дослідження динаміки основних біохімічних показників якості та безпеки експериментальних зразків комбінованих рулетів з різної сировини в процесі нормативного терміну зберігання. Контролювались кислотне та перекисне числа. Вони характеризують ступінь гідролізу й окиснення ліпідів в процесі зберігання продукції. Зразки згідно типових правил зберігались при температурі 0-1°C протягом 14 діб. Отримані дані зведено в таблиці 5.4.

Зміна показників якості кінцевого продукту в процесі зберігання, виготовленого за допомогою аеріонів

| Доба | Контрольний зразок стандартної технології |                         | Зразки рибних рулетів електрофізичних технологій |                         |
|------|---|-------------------------|--|-------------------------|
|      | Кислотне число мг КОН/1 г жиру            | Перекисне число, % йоду | Кислотне число мг КОН/1 г жиру                   | Перекисне число, % йоду |
| 1    | 3,652                                     | 0,029                   | 2,953  | 0,025                   |
| 3    | 3,895                                     | 0,034                   | 3,113  | 0,029                   |
| 6    | 3,968                                     | 0,045                   | 3,252  | 0,034                   |
| 10   | 4,125                                     | 0,058                   | 3,641  | 0,041                   |
| 14   | 4,561                                     | 0,69                    | 4,012  | 0,05                    |

З результатів проведених досліджень видно, що в процесі зберігання виготовленого і контрольного зразка, спостерігається динаміка значень кислотного та перекисного чисел, особливо помітна на 10 добу зберігання. Це говорить про перебіг природного процесу модифікації жиру в складі органічних матеріалів. Ці параметри використовують для оцінки комплексних показників біохімічних процесів при розробці технологій і в процесів виробництва.

Для оцінки результатів випробувань запропонованого метод модифікації органічних композицій, на рис. 5.18 наведено вказані дані в порівнянні з допусками діючих стандартів якості та безпеки в харчовій галузі.

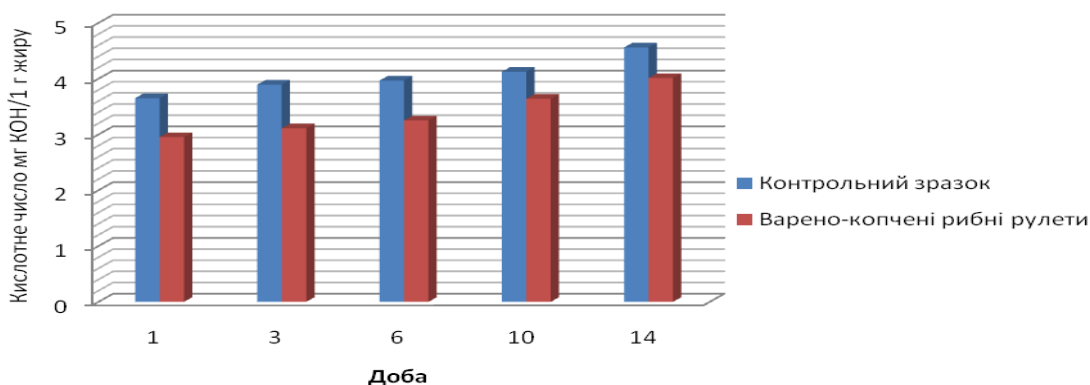


Рис. 5.18 Зміна кислотного числа в процесі зберігання кінцевого продукту з складною структурою органічних сполук, модифікованих за допомогою аеріонів

Видно, що в модифікованому аеріонами зразку кислотне число суттєво менше, за допустимі контрольні границі стандартного продукту. Це свідчить про нижчі темпи небажаної модифікації жирів і про перевагу електрофізичних методів виробництва харчової продукції з використанням іонного опромінювання.

Зміна перекисного числа в процесі зберігання виготовлених зразків на повітрі наведено на рис. 5.19.

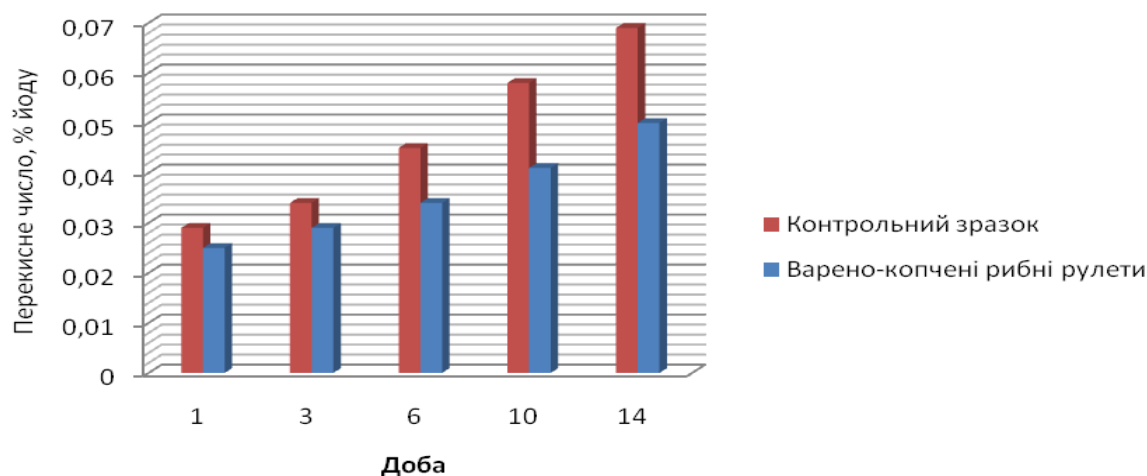


Рис. 5.19 Динаміка перекисного числа в процесі зберігання на відкритому повітрі

З наведених графіків видно, що на початку зберігання значення кислотних і перекисних чисел було невеликим, що свідчить про якісний стан ліпідів.

В процесі зберігання їх кількість очікувано збільшується. Але інтенсивніше цей показник збільшується в контрольних зразках. Тому можна стверджувати про суттєво вищу якість кінцевого продукту виготовленого з використанням аероіонних методів модифікації такої комбінованої органічної сировини.

Для порівняння рулети, виготовлені за допомогою аероіонів, одночасно зберігалися і у вакуумній упаковці. Результати дослідження показників якості після регламентованого зберігання вакуумних зразків наведені в таблиці 5.5.

Фізико-хімічні показники кінцевого продукту після 14 діб зберігання у вакуумній упаковці

| Зразки                              | Показники |          |         |         |      |   |
|-------------------------------------|-----------|----------|---------|---------|------|---|
|                                     | Волога, % | Білок, % | Жири, % | Зола, % | pH   | Енергетична цінність 100 г продукту, Ккал |
| Контрольний зразок                  | 60,7      | 24       | 13      | 2,3     | 5,42 | 213                                       |
| Рулетти за аероіонними технологіями | 61,7      | 23,1     | 12,9    | 2,3     | 5,21 | 209                                       |

Результати досліджень свідчать, що комбінована харчова продукція, навіть виготовлена з різних за складом компонентів, при використанні іонних електрофізичних технологій за своєю харчовою та біологічною цінністю майже не поступається контрольному зразку стандартної якості.

### 5.3.4 Висновки

Досліджено шляхи модифікації складних композицій органічних сполук низькоенергетичними іонами повітря та перспективу їх застосування для виробництва варено-копченої продукції в харчовій галузі. Показано, що одночасно з структуруванням органіки, опромінення іонами стимулюють природні біохімічні процеси модифікації молекулярних структур складної органіки в природній харчовій сировині. Причому, ці процеси відбуваються без будь-якого прикладення теплової чи хімічної енергії, при звичайних температурах, нерегульованому тиску і вологості. А відтак увесь процес модифікації опромінених мас відбувається при надзвичайно малих енергозатратах і в короткий проміжок часу.

Отримані експериментальні дані привабливі для прогресу технологій в харчовій галузі. Таким чином можна виробляти продукцію стандартної якості навіть з комбінації різномірної сировини, які звичайними методами здійснити неможливо. Про це свідчать отримані в експериментальних дослідженнях показники якості одного з видів такої харчової продукції – рулетів.

## **5.4 Дослідження технологічних проблем**

За рахунок енергії, яку переносять заряджені частинки, відбувається стимулювання і різке прискорення природних процесів модифікації сировини (визрівання рибної продукції). І всі ці процеси відбуваються при надзвичайно малих витратах електроенергії, чим і визначається їх привабливість для технологічного застосування. В літературі також вказується, що одночасно на поверхні продукції знешкоджується шкідлива мікрофлора, з розрядного проміжку активно видаляються усі небажані включення (волога, пил, газ, тощо), чим одночасно забезпечується покращення санітарно-гігієнічних умов для технологічного процесу, важливого для харчових продуктів.

Зараз запатентована низка винаходів, а також багато різноманітних технологій переробки риби й інших гідробіонтів за допомогою аероіонів. Тривалий досвід їх промислового використання показує, що цей шлях є надзвичайно перспективним і найменш енерговитратним способом виробництва продукції з високою і стабільною якістю. Існує технологічна документація на виробництво ряду в'яленої продукції.

### **5.4.1 Удосконалення технології**

Була розроблена й експериментально випробувана інша технологія виготовлення рулетів. Її схема, а також традиційна, наведені на рис. 5.20, де відтінено ті з складових технологічного процесу, які є новими і розроблені для досягнення поставленої мети досліджень. Цим вони відрізняються від типових процесів [303].

Відмінності в структурі та складі сировини, неприпустимі в традиційних технологіях рулетів, в удосконаленій технології усуваються шляхом аероіонної обробки просоленої сировини. Термін цих двох етапів не є довгим, бо однією з надзвичайно цінних властивостей аероіонної обробки є одночасна модифікація органічних молекул в складі сировини, її просолювання та структурування. Тому загальний термін цього процесу не перевищує 12 годин, а втрата маси не повинна



перевищувати 6-8%. Цей показник добре контролюється по фактичній вазі зразків і є частиною системи НАССР в даній технології.

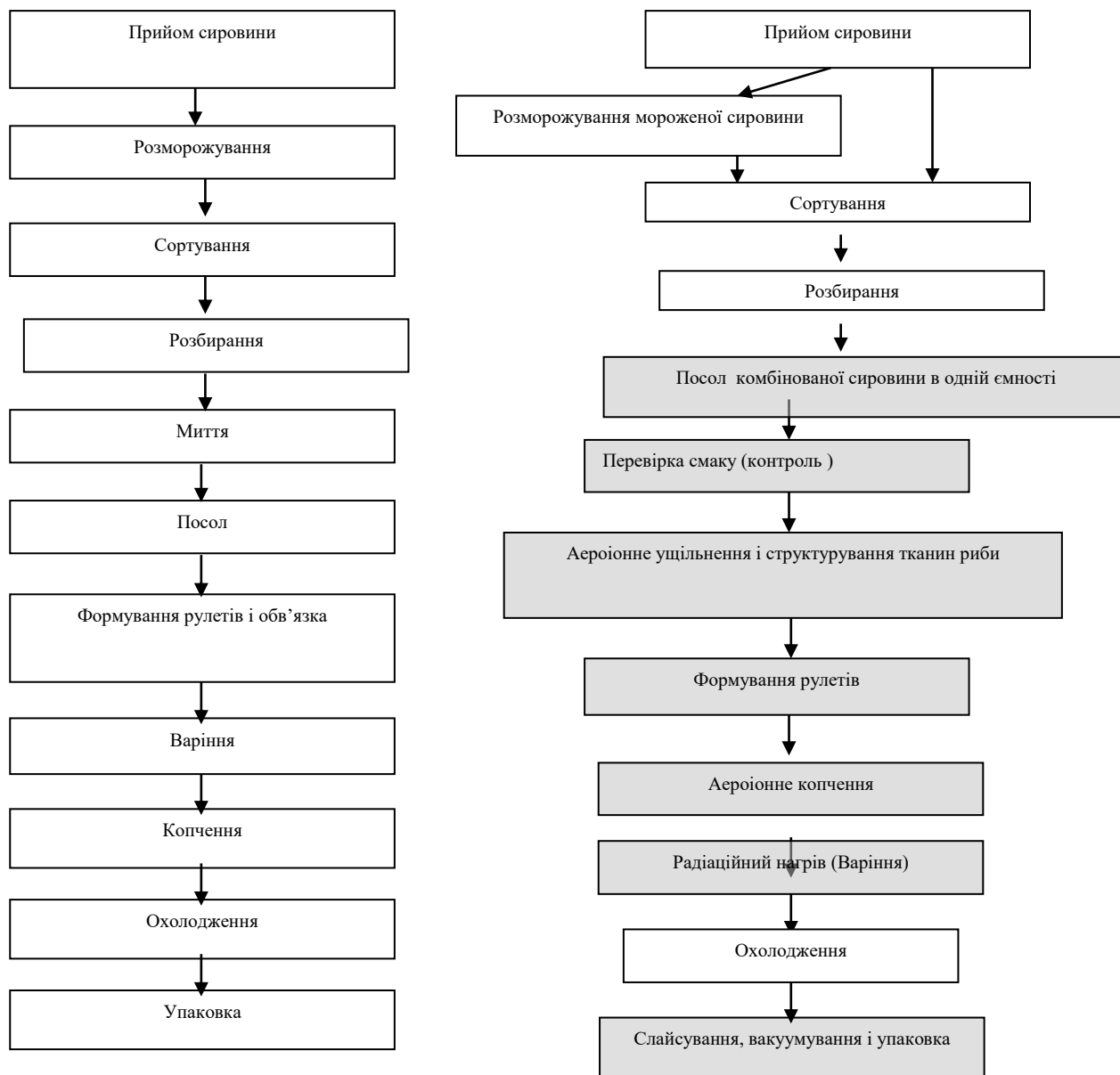


Рис. 5.20 Традиційна і удосконалена технологія комбінованих рулетів

Формування рулетів також суттєво відрізняється від типового. Цьому сприяє аероіонна обробка, після якої з скумбрії можна легко видаляти шкіру і отримувати щільне філе, придатне для формування рулетів. Це саме стосується і коропа. Також слід зауважити, що шкіра скумбрії знімається без підшкірного жиру, який в неспотвореній формі залишається на поверхні філе. А тому відкривається можливість формувати однорідну консистенцію рулетів.

Отримана чиста шкіра скумбрії є хорошим матеріалом для обертання рулетів, виключаючи необхідність застосування звичних синтетичних матеріалів, а і за своїми властивостями знята шкіра фактично є мікрофільтраційною плівкою – наномембраною, яка не пропускає небажаних органічних молекул (мікроорганізмів, вірусів тощо), однак не перешкоджає надходженню кисню для здійснення біохімічних процесів модифікації сировини у готовий продукт.

Тому копчення в удосконаленій технології спрямоване лише на придання певного присмаку продукту і відповідного естетичного вигляду (золотистого кольору). електромеханічним пристроєм, що генерує «холодний» дим і формує стійкий запах свіжої копченості. А наявність шкіри скумбрії сприяє отриманню звичного кольору копченої риби.

Для отримання яскравого кольору термічна обробка здійснюється радіаційним нагрівом сформованих рулетів випромінюванням інфрачервоного діапазону. Тепло, яке при цьому виділяється в продукт і забезпечує прискорений рівномірний розподіл жиру по усій його товщині, додатково видаляє вологу, ущільнює продукт і забезпечує екологічно безпечний процес його короткочасного проварювання у власному соку. Кінцевий продукт за такими електрофізичними технологіями має суттєво кращі властивості, відбувається його фактична стерилізація, що дозволяє говорити про подовжені терміни зберігання і реалізації створеного продукту.

#### **5.4.2 Постановка експерименту**

Підготовлену та просолону сировину (рис. 5.21) звільняють від залишків кісточок, шкірочок та залишків солі та спецій.

Відібрані зразки навішуються в аероіонну установку для визрівання і структурування. Цей процес показано на рис. 5.22. В аероіонній установці зразки опромінюються потоками іонів при звичайній кімнатній температурі з нерегульованою вологістю. Час опромінювання визначається за показником втрати маси. Він контролюється періодичним зважуванням еталонного зразка. Втрата маси при цьому не може перевищити 6 %.



Рис. 5.21 Підготовлене філе



Рис. 5.22 Філе в аеріонній установці

Після знаття з аеріонної установки, на препарувальному столику лабораторії виконується етап формування рулетів (рис. 5.23). Після опромінення аеріонами відбувається відшарування шкірки, яка легко знімається без відриву з нею підшкірного жиру. Зняті, практично зрілі філейки коропа і скумбрії туго скручуються між собою і вже в такому вигляді загортають в зняту шкіру скумбрії (рис. 5.24).



Рис. 5.23. Формування рулетів



Рис. 5.24 Філе, обгорнуті шкірою скумбрії

Далі усі скручені рулети туго перев'язують шпагатом, залишаючи петельки для навішування в лабораторну коптильню аеріонну установку, як це показано на рис. 5.25. Підготовлені таким чином напівфабрикати рулетів піддають копченню, також з використанням електрофізики. Час копчення не перевищує 4 хвилин і здійснюється в сильному електростатичному полі (рис. 5.26)



Рис. 5.25. Рулети, скріплені шпагатом



Рис. 5.26 Процес електрокопчення рулетів в лабораторному пристрої

Після декількох хвилин знаходження в копильному пристрої, напівфабрикати виймають і опромінюють інфрачервоними променями. Час опромінення визначається моментом закипання жиру і заповнення усіх проміжків в тілі рулету до утворення рівномірної консистенції (рис. 5.27). При виробничій необхідності, рулети можна розрізати на шматочки і вкласти у вакуумну полімерну упаковку так, як це показано на рис. 5.28.



Рис. 5.27 Готовий рулет з комбінованої сировини, виготовлений за аероіонною технологією



Рис. 5.28 Слайсеровані рулети вакуумні в дрібній розфасовці

Отримані зразки оригінальних комбінованих рибних рулетів досліджено за стандартними методиками в лабораторіях НУБіП.

Результати органолептичної оцінки отриманих рулетів зведено в таблиці 5.6.

Порівняльна органолептична оцінка рибних рулетів

| № п/п | Показник             | Створені рибні рулети | Стандартні рулети г/к |
|-------|----------------------|-----------------------|-----------------------|
| 1     | Готовність продукту  | 4,6                   | 4,5                   |
| 2     | Зовнішній вигляд     | 4,8                   | 3,8                   |
| 3     | Зовнішні пошкодження | 4,4                   | 4,2                   |
| 4     | Колір                | 4,6                   | 4,5                   |
| 5     | Консистенція         | 4,5                   | 4,3                   |
| 6     | Смак                 | 4,8                   | 4,5                   |
| 7     | Запах                | 4,9                   | 4,8                   |

З наведеної таблиці даних органолептичної оцінки видно, що кращі показники має продукт, виготовлений за електрофізичними методами.

В графічній формі оцінка якості зроблена порівнянням багатокутників якості нового та стандартного рулету. Вона наведена на рис. 5.29.

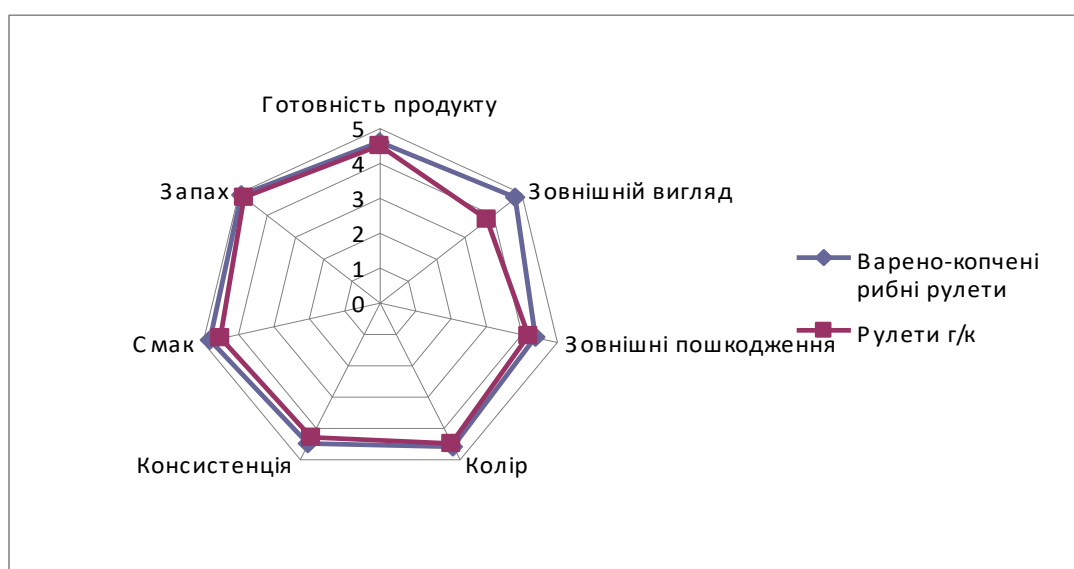


Рис. 5.29 Багатокутники якості комбінованих рибних рулетів.

Зовнішній багатокутник - виготовлених за електрофізичними технологіями.

Внутрішній - еталонний зразок рулетів традиційного виготовлення.

Отримані рулети відповідають високим дієтичним вимогам і вимогам безпеки споживання, діючим в харчовій галузі. Терміни безпечного зберігання відповідають таким вимогам до рибної кулінарії, а у вакуумній упаковці перевищують 14 діб.

## 5.5 Вплив іонів низької енергії на живі клітини

Досліджувався вплив аероіонів на складні органічні молекули та на живі біологічні молекули (мікроорганізми різних видів), хоча вирішення біофізичних задач не передбачалось. Мікробіологічні дослідження є основою для декларування якості та безпеки продукції і термінів її зберігання.

Вивчення ефектів впливу низькоенергетичних іонів на живі клітини здійснювався виключно в практичних цілях для забезпечення розробок аероіонних технологій модифікації органічних матеріалів природного походження (сировина для харчових продуктів). Мікробіологічні дослідження виконувались в сертифікованих лабораторіях НУБіП виключно в нормативних межах на всіх етапах розробки іонних технологій та їх випробуваннях в реальному виробництві.

Найбільша увага приділялась дослідженням іонних технологій рибних продуктів і морепродуктів, бо останні належать до найменш стійких до мікробіального псування продуктів і відрізняються природно високим вмістом мікроорганізмів.

Вивчена біологічна дія негативно заряджених іонів кисню на чисту культуру тест-мікроорганізмів і бактеріальну забрудненість риби і напівфабрикатів. В якості тест-штамів використовували 18-годинні культури бактерій групи кишкової палички *Escherichia coli* M-17 і спороутворюючі штами форм *Bacillus subtilis*. На поверхні твердого спеціального живильного середовища в чашку Петрі дозовано вносили по 0,3 мл мікробної наважки, яка містить 100 клітин тест-штаму, і рівномірно розтирали по поверхні щільного живильного агару. Чашку Петрі із засіяними на аквакультурами ставили під потік аероіонів і обробляли різними дозами при різній експозиції. В таблиці 5.7 показана біологічна дія негативно заряджених аероіонів на мікроорганізми в залежності від їх дози і тривалості процесу опромінювання.

Встановлено, що при обробці мікробних культур аероіонами дозою  $6,0 \cdot 10^6$  іон/см<sup>3</sup> впродовж 8 хв. чи менше, біологічні дії на клітини та різні мікроорганізми не спостерігається. Обробка ж впродовж 16 хв. і більше обумовлює стабілізаційний вплив на життєдіяльність грам негативних мікроорганізмів.

Біологічна дія негативно заряджених аероіонів на мікроорганізми

| Час обробки, год. | Число клітин <i>Escherichia coli</i> M-17 при концентрації іонів, $\text{іон}/\text{см}^3$ |                   | Число клітин <i>Bacillus subtilis</i> при концентрації іонів, $\text{іон}/\text{см}^3$ |                   |
|-------------------|--|-------------------|--|-------------------|
|                   | $6,0 \cdot 10^6$   | $60,0 \cdot 10^6$ | $6,0 \cdot 10^6$   | $60,0 \cdot 10^6$ |
| 4                 | $1 \cdot 10^3$   | $1 \cdot 10^3$    | $1 \cdot 10^3$   | $1 \cdot 10^3$    |
| 8                 | $1 \cdot 10^3$   | $1 \cdot 10^3$    | $1 \cdot 10^3$   | $1 \cdot 10^3$    |
| 16                | $1 \cdot 10^3$   | $5 \cdot 10^2$    | $1 \cdot 10^3$   | $8 \cdot 10^2$    |
| 32                | $1 \cdot 10^3$   | $1 \cdot 10^2$    | $1 \cdot 10^3$   | $6 \cdot 10^2$    |
| 64                | $1 \cdot 10^2$   | 3                 | $1 \cdot 10^3$   | $5 \cdot 10^2$    |

При концентрації іонів  $60,0 \cdot 10^6$   $\text{іон}/\text{см}^3$  забезпечується виражений бактерицидний ефект і у відношенні аспоргенних форм бактерій. Зі збільшенням часу обробки біологічна дія потоку аероіонів значно збільшується.

На спорові форми бактерій аероіони негативно впливають при обробці дозою  $60 \cdot 10^6$   $\text{іон}/\text{см}^3$  впродовж 16 хв. і більше, але значного інгібуючого ефекту, як при дослідженні на вегетативних клітинах, не встановлено.

Вплив аероіонів на мікробне засмічення риби і напівфабрикатів вивчали шляхом спостереження за змінами загальної кількості бактерій в м'язовій тканині і на поверхні шкіри. Для цього філе риби обробляли аероіонами концентрації  $60,0 \cdot 10^6$   $\text{іон}/\text{см}^3$  впродовж 24 год. Аналіз отриманих даних свідчить про те, що під дією аероіонів на поверхню риби відбувається інгібування значної частини мікроорганізмів. Кількість бактерій, яка знаходиться на поверхні шкіри риби, за 24 год. зменшилась більше, ніж в 10 разів ( $P < 0,05$ ). Дослідження внутрішніх шарів філе риби, обробленої аероіонами впродовж 24 год. показало незначне зниження загальної кількості мікроорганізмів.

Зменшення кількості бактерій обумовлено смертю клітин, які знаходяться тільки на поверхні філе риби. При зіткненні іону з тілом риби його заряд і проникна здатність втрачаються, в зв'язку з чим бактерії, які знаходяться всередині філе, не піддаються дії аероіонів. А помічений додатковий бактериостатичний ефект обумовлюється значним зниженням вмісту вологи в тканинах риби при обробці аероіонами за рахунок втрати вільної води (табл. 5.8).

Вміст вологи в тканинах риби при обробці аероіонами

| Вода     | Минтай     |               | Терпуг     |               |
|----------|------------|---------------|------------|---------------|
|          | до обробки | після обробки | до обробки | Після обробки |
| Зв'язана | 55,8       | 57,7          | 55,1       | 56,8          |
| Вільна   | 24,4       | 15,5          | 22,1       | 9,1           |

Вода входить до складу структурних елементів м'язової тканини риби і утримується нею з міцністю різного ступеню. Вид чи форма зв'язку води, тобто відношення зв'язаної чи вільної води з іншими хімічними компонентами в продукті, визначають його технологічні властивості та якісні показники, в тому числі мікробіологічні.

Зміни форм зв'язку води вивчали по методу О.М. Мельникова. Виявлено значне зниження кількості капілярної води і води змочування, яка має властивості вільної води в м'язовій тканині філе риби, обробленого впродовж 24 год. негативно зарядженими аероіонами кисню при концентрації  $60,0 \cdot 10^6$  іон/см<sup>3</sup>.

Було зроблено висновок, що аероіони через відсутність проникної здатності інгібують життєздатність мікроорганізмів в основному на поверхні морепродуктів і напівфабрикатів. Потенціал, який супроводжує обробку риби аероіонами сприяє видаленню вільної води і, відповідно, зміні її активності, що дає додатковий бактеріостатичний ефект.

Результати досліджень свідчать про виражену бактерицидну і бактеріостатичну дію аероіонів. Такі ж висновки неодноразово підтверджувались в роботах Тихоокеанського інституту риболовства і океанографії (ТИНРО-центр), ряду медичних видань.

Доцільність повторення таких досліджень в даній роботі визначалась тим, що у відомих роботах було наведено результати досліджень на окремих штаммах мікроорганізмів, якими інокулювались досліджувані зразки органічних матеріалів. А в таких дослідженнях залишається поза увагою синергетичний ефект опромінення суміші мікроорганізмів різного виду, які в складі органічного матеріалу реально знаходяться в певній рівновазі за механізмами їх взаємної конкуренції. Тому



прогнозування та моделювання мікробіологічних процесів в реальній сировині за наявними даними є сумнівним.

### 5.5.1 Методи і техніка експериментів

Оцінка можливих похибок і практичної користі показала, що необхідно вибрати більш доступний шлях для комплексної оцінки інтегральних ефектів впливу аероіонів на мікрофлору в біомасах опромінюваної органіки (з урахуванням вологості, біохімічного складу, структури, температури та інших параметрів, характеризуючих органічні зразки), як експериментального матеріалу для реальних технологій.

Матеріал досліджень подається у вигляді аналізу мікробіологічної ситуації на різних етапах аероіонних технологічних процесів модифікації структури та хімічного складу зразків органічних матеріалів природного походження.

Дослідження по визначенню мікробних показників сировини, зокрема рибної сировини, напівфабрикатів і продукції проводилися на базі Кафедри мікробіології, вірусології та біотехнології, факультету харчових технологій та управління якості продукції АПК.

Мікробіологічні дослідження виконували згідно ISO 4832-91, ГОСТ 28805-90, ГОСТ 30519-97. Ці стандарти поширюються на харчові продукти і встановлюють методи культивування для виявлення присутності/відсутності або визначення кількості мікроорганізмів відповідних груп, родин, родів або видів.

Такий аналіз має на меті встановлення наявності та вмісту:

- мезофільних аеробних та факультативно-анаеробних мікроорганізмів (МАФАНМ);
- бактерій груп кишкової палички (БГКП);
- золотистого стафілококу;
- бактерій роду *Proteus*;
- патогенних мікроорганізмів, в тому числі виду *Сальмонели* та бактерії роду *Listeria monocytogenes*.

Правила відбору зразків та підготовки проб для аналізу мікробіологічних показників проводились згідно з ГОСТ 26668-85 та ГОСТ 26669-85.

Методи базуються на посіві продукту, розведенні наважки продукту або осаджених на мембранному фільтрі клітин мікроорганізмів у поживні середовища, з подальшим культивуванням посівів в умовах, сприятливих для зростання мікроорганізмів.

Санітарно-мікробіологічний контроль зразків проводився відповідно до Інструкції з санітарно-мікробіологічного контролю сировини та продукції хачового виробництва.

### 5.5.2 Мікробіологічні дослідження в розроблених технологічних процесах

*Комплексні аероіонні технології комбінованих рулетів.* Мікробіологічний контроль проводився на усіх стадіях технологічного процесу виробництв комбінованих рибних рулетів за аероіонними технологіями.

Результати наведені в таблиці 5.9

Таблиця 5.9

Мікробіологічний контроль процесу виготовлення рибних рулетів

| № | Назва технологічної операції             | Кількість МАФАНМ, КУО/1г. |
|---|--|---------------------------|
| 1 | Сировина                                 | $5 \cdot 10^4$            |
| 2 | Солений напівфабрикат                    | $2 \cdot 10^4$            |
| 3 | Напівфабрикат після аероіонної установки | $1 \cdot 10^3$            |
| 4 | Скручений рулет                          | $1 \cdot 10^4$            |
| 5 | Обробка ІЧ випромінюванням               | $2 \cdot 10^2$            |
| 6 | Упакований продукт                       | $5 \cdot 10^2$            |

Графічна форма представлення результатів мікробіологічних досліджень на усіх етапах аероіонних технологій виготовлення рулетів наведена на рис. 5.30. Спостерігається виразна динаміка цього показника на всіх стадіях структурної та хімічної модифікації цього органічного композиту різнорідної сировини в харчовий продукт.

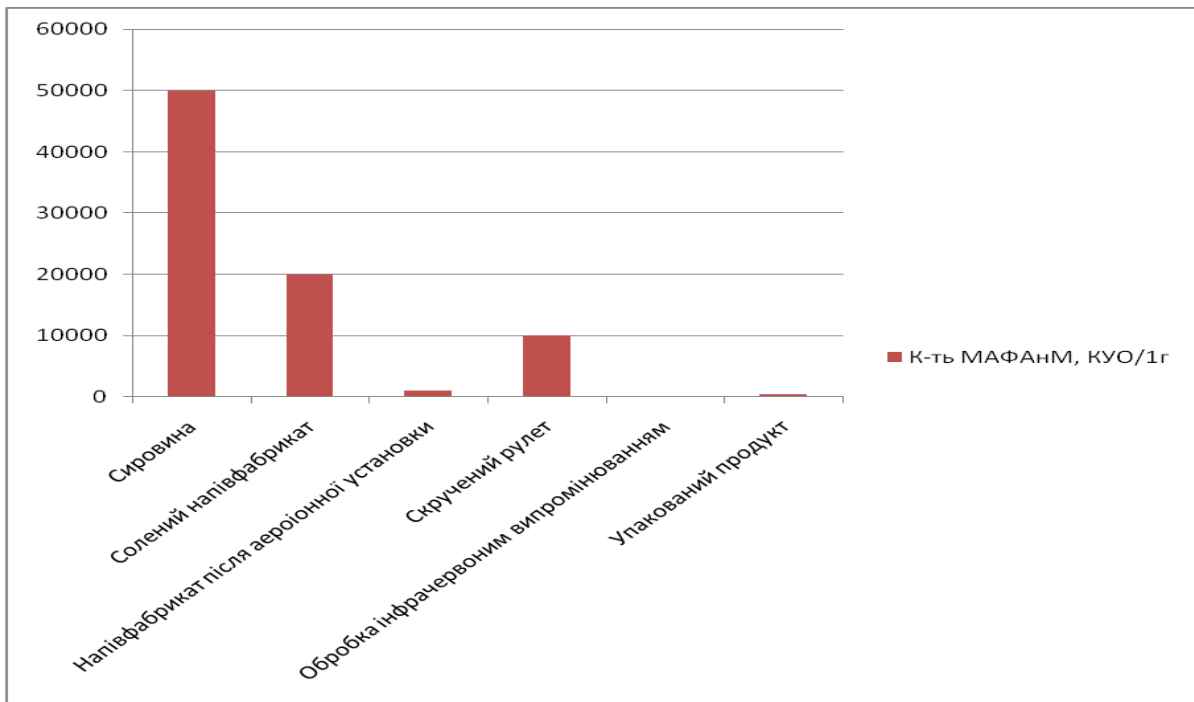


Рис. 5.30 Мікробіологічний контроль на стадіях виготовлення рибних рулетів

*Контроль мікробіологічних показників готового рулету, виготовленого з використання іонів на усіх етапах.* Мікробіологічні дослідження було проведено з метою порівняння виготовлених за аеріонними технологіями рулетів з традиційними рибними рулетами гарячого копчення. Результати дослідження наведені в таблиці 5.10

Таблиця 5.10

Порівняльний мікробіологічний контроль рибних рулетів традиційних і іонних електрофізичних технологій виготовлення

| Об'єкт контролю           | Кількість МАФАНМ, КУО/1г. | БГКП, 10 г      | Золотистий стафілокок, 1 г | Патогенні, в т. ч. сальмонели, 25 г. |
|---------------------------|---------------------------|-----------------|----------------------------|--------------------------------------|
| Вимоги МТБ                | $1 \cdot 10^4$            | Не допускається | Не допускається            | Не допускається                      |
| Контрольний зразок        | $1 \cdot 10^3$            | Відповідає      | Відповідає                 | Відповідає                           |
| Електрофізична технологія | $5 \cdot 10^2$            | Відповідає      | Відповідає                 | Відповідає                           |

З досліджень видно, що аеріонна технологія забезпечує виробництво продукту самої високої якості, придатного для тривалого зберігання.

Показовими є результати мікробіологічних досліджень при зберіганні нових видів рибних рулетів впродовж двох тижнів. Рибні рулети належать до кулінарних

виробів, тому рекомендований термін зберігання складає при температурі від -2 до +2 °С не більше 72 години. Результати досліджень наведено в таблиці 5.11

Таблиця 5.11

Зміна кількості мікроорганізмів в процесі зберігання рулетів

| Зразок                           | Тривалість зберігання, доба |                |                |                |                |                |
|----------------------------------|-----------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
|                                  | Вимоги МТБ                  | 1-а            | 5-а            | 7-а            | 11-а           | 14-а           |
| Контрольний зразок               | $5 \cdot 10^4$              | $9 \cdot 10^2$ | $5 \cdot 10^3$ | $8 \cdot 10^3$ | $5 \cdot 10^4$ | $1 \cdot 10^5$ |
| Рулети за аероіонною технологією | $1 \cdot 10^4$              | $5 \cdot 10^2$ | $9 \cdot 10^2$ | $1 \cdot 10^3$ | $5 \cdot 10^3$ | $5 \cdot 10^4$ |

За результатами мікробіологічних досліджень можна зробити висновок, що за рахунок енергії іонів атмосферних газів у технологічному процесі виготовлення з різномірної сировини комбінованих рулетів забезпечується виражений бактеріальностатичний і бактерицидний ефект, а вироблена продукція зберігається краще. На 14 добу зберігання кількість мікроорганізмів у виготовлених за аероіонною технологією зразках відповідала нормативним вимогам регулюючих документів МОЗ України, а в контрольних (рулетах г/к) суттєво перевищувала допустимий рівень.

*Мікробіологія на етапах аероіонної технології в'яленого балика з товстолобика.* Результати із мікробіологічних досліджень сировини свідчили про відповідність її діючим норма безпеки споживання. Сировина була перероблена за декілька етапів: розбирання, виготовлення напівфабрикатів, в'ялення в атмосфері насиченій іонами великої концентрації, електрокопчення. Тому кінцевий продукт може свідчити про результуючу ефективність аероіонних методів в пригніченні активності мікрофлори.

Мікробіологічні показники кінцевого продукту, виготовленого з широким залученням електрофізики (кількість мезофільних аеробних та факультативно-анаеробних мікроорганізмів, бактерії групи кишкових паличок, золотистий стафілокок, плісняви, дріжджі, патогенні мікроорганізми, в тому числі роду Сальмонела) наведені в таблиці 5.12

Результати мікробіологічного контролю готового балику, виготовленого з залученням аеріонної обробки

| Найменування показників   | Допустимі рівні           | Згідно з                    | Зразки            |                 |                               |                              |
|---|---------------------------|-----------------------------|-------------------|-----------------|-------------------------------|------------------------------|
|   |                           |                             | Контрольні зразки |                 | Після електрофізичної обробки |                              |
| Кількість мезофільних аеробних та факультативно-анаеробних мікроорганізмів, КУО в 1 г | Не більше $2 \times 10^5$ | ГОСТ 10444.15               | Мікро-коки        | Мікро-коки      | Кількість мікроорганізмів <1  | Кількість мікроорганізмів <1 |
| Бактерії групи кишкової палички (коліформи), в 0,01г                                  | Не доп.                   | ГОСТ 30518                  | 2 колонії         | 1 колонія       | Не виявл.                     | Не виявл.                    |
| Плісняви, дріжджі у 0,1 г   | Не доп.                   | ГОСТ 10444.12<br>ГОСТ 28805 | виявл. пліснява   | виявл. пліснява | Не виявл.                     | Не виявл.                    |

Аеріонна обробка практично повністю компенсувала неминуче погіршення мікробіологічних показників продукту на етапах розробки сировини та виготовлення з неї напівфабрикатів. Кінцевий продукт (в'ялений балик з товстолобика) має високі показники безпеки. Ці висновки підтвердили дослідження динаміки мікробіологічних показників при зберіганні впродовж нормативного строку для таких видів харчової продукції. Результати наведено на рис. 5.31.

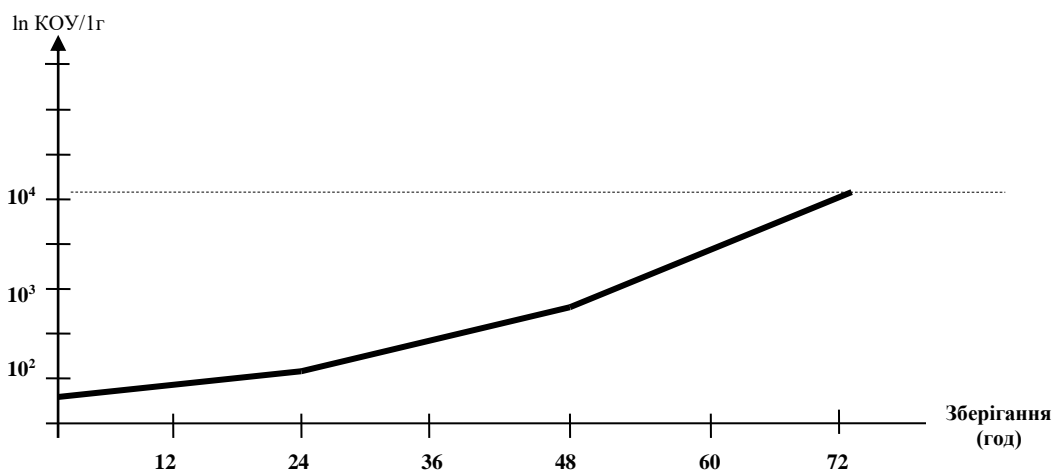


Рис. 5.31 Динаміка мікробіологічних показників балику, виготовленого з використанням аеріонів, впродовж нормативного терміну зберігання

## **5.6 Дослідження і випробування аероіонних технологій в'яленої харчової продукції**

### **5.6.1 Інноваційна аероіонна технологія виробництва в'яленої щуки**

Завданням передбачалось удосконалення технологій рибних харчових продуктів та інтенсифікація виробничих процесів з сировини прісноводного походження з метою розширення асортименту та забезпечення високої якості продукції. Це є актуальними проблемами господарчого використання водних ресурсів України. Була визначена технологічна, технічна і економічна доцільність проведення спеціальних досліджень. На підставі аналізу стану і перспектив впровадження у реальне виробництво було обґрунтовано вибір перспективної сировини для досліджень. В їх переліку значне місце зайняла щука.

Актуальність даної роботи визначається станом сировинної бази гідробіонтів в Україні та неефективність і надмірна енергоємність сучасних технологій в'ялення риби.

*Об'єкт та предмет дослідження.* Щука звичайна є привабливою для виготовлення в'яленої риби. Вона містить мінімальні кількості жиру і повинна легко піддаватися технологіям в'ялення (глибокій сушці). А, водночас, в кінцевому продукті не буде надмірного вмісту продуктів модифікації (окислення) жиру, що суттєво підвищує його харчову якість. Традиційні технології надають мало можливостей для широкого поширення цієї сировини до промислового виробництва харчових продуктів.

Для вирішення цієї проблеми було досліджено перспективні шляхи залучення методів прикладної електрофізичної та ядерної фізики до переробки прісноводної щуки. Очікувалось, що використання електрофізичних методів переробки щуки в харчовий продукт дозволить більш ефективно використовувати потенціал українських прісноводних водоймищ. А технологічна простота цих наукоємних методів дає можливість знизити енерго- і трудовитрати, водоспоживання, зменшити ступінь забруднення зовнішнього середовища, поліпшити якість і підвищити вихід

продукції. Сучасна економіка диктує необхідність оперативного переходу від дорогої іноземної сировини до вітчизняної, з отриманням якісного продукту при мінімальних затратах.

Дослідження ефективності залучення аероіонів до переробки щуки було проведено з метою знаходження технічно простих і енергетично вигідних методів приготування високоякісних харчових продуктів з місцевої сировини штучного розведення.

*Технологічні пропозиції.* Інтенсифікація виробництва з прісноводної щуки в'яленої харчової продукції шляхом залучення до її переробки інтенсивних потоків іонізованого повітря (аероіонів).

Підставою для очікування позитивних результатів є попередній досвід використання аероіонів природного походження для виготовлення високоякісних (але найбільш дорогих) рибних продуктів (баликів, юколи та ін.).

Була поставлена задача відтворити таку технологію (і необхідних умов для стимулювання протеолітичних процесів модифікації сировини), в аероіонній харчовій лабораторії СРТ ІЯД НАН України.

Метою технологічного дослідження було удосконалення традиційної технології в'ялення прісноводної риби (рис. 5.7) за рахунок аероіонної обробки, а також випробування енергетичних показників іонної технології та визначення залежності якості кінцевого продукту від режиму обробки аероіонами.

Недоліками традиційних технологій є великі енергетичні витрати на теплову енергію та надто тривалий час висушування, впродовж якого відбуваються небажані процеси окислення органіки, які знижують якість продукції.

*Дослідження характеристик сировини.* За своїм складом прісноводна сировина суттєво відрізняється від морської. Було необхідно визначити чи не вплине це на перспективу використання аероіонів для виробництва в'яленої прісноводної щуки. Експерименти розпочиналися з вивчення процесів обезвожування сировини (сушки риби) потоками аероіонів з концентрацією, яка вважається бактеріостатичною  $6,0 - 60,0 \cdot 10^6$  іон/см<sup>3</sup>. Досліджуваною сировиною було філе щуки. Хімічний склад цієї сировини наведено в таблиці 5.13.

Хімічний склад м'яса щуки

| Назва сировини | Жир, % | Мінеральні речовини, % | Масова частка вологи, % | Білок, % |
|----------------|--------|------------------------|-------------------------|----------|
| Щука звичайна  | 1,32   | 0,58                   | 76,8                    | 18,4     |

Усі дослідження здійснювались на електрофізичній лабораторній аероіонній установці ІЯД НАН України з поперечним вектором електричного поля. Паралельною задачею дослідження було визначення оптимального терміну сушіння сировини за даним методом, в результаті якого показники якості продукту, такі як термін зберігання, органолептика, мікробіологія були б суттєво кращими.

Технологічна ефективність аероіонів для в'ялення щуки контролювалась вимірюванням зміни показників її якості – динаміки маси, вмісту вологи, солі, та за іншими показниками, прийнятими в рибних технологіях. Регульованими параметрами були термін сушіння, інтенсивність потоків аероіонів. Досліджено вплив інтенсивності потоку аероіонів на процес видалення вологи з м'язової тканини сировини в сильному електричному полі. Зразки охолодженої сировини піддавали електрообробці в установці, генеруючій інтенсивний потік аероіонів. Обробку зразків м'язової тканини проводили двома способами – один був під дією потоку аероіонів, а інший без дії аероіонів.

Кількість видаленої вологи із тканини визначали через кожні дві години протягом 46 годин, а отримані результати виражали у відсотках до вихідної маси зразка.

При розробці методики експериментів було прийнято, що м'язову тканину риби слід відносити до вологого капілярно-пористого колоїдного субстрату.

Раніше було представлено графік, який відображав результати досліджень статистичної закономірності обезводнення м'язової тканини щуки в потоці аероіонів та за звичайних умов. Було експериментально доведено, що з опроміненням іонами повітря процес зневоднення (в технологічній термінології – «в'ялення») проходить майже вдвічі швидше, ніж при таких умовах, але без впливу електрофізичних явищ (електростатичного поля, іонів). А відповідно, залучення аероіонів забезпечує



досягнення мети розробки – вирішується проблема зниження енерговитрат на процес сушки, скорочується термін приготування продукції, покращується якість.

В здійснених експериментах при вибраній інтенсивності потоків аероіонів через 46 годин було отримано готовий до споживання продукт (рис. 5.32) вологістю 35 %, органолептичні показники якого значно відрізнялись в кращу сторону від продукту, виготовленого за звичайною технологією.



Рис. 5.32 Готовий харчовий продукт з філе щуки, виготовлений за аероіонними технологіями

Було експериментально встановлено, що використання іонів атмосферних газів для виготовлення в'яленої харчової продукції з нежирної рибної сировини (щуки) забезпечило значні технологічні ефекти:

- спосіб посолу не вплинув на органолептичні показники якості продукту;
- показники перекисного та кислотного числа є нижчими в порівнянні з в'яленим продуктом за традиційною технологією.

Зміни хімічних показників в процесі зберігання в'яленої щуки в залежності від терміну зберігання наведено в табл. 5.14. Вони свідчать, що в'ялений аероіонами продукт має вищу, ніж у традиційних продуктах, якість.

Дослідження мікробіологічних показників показало, що в процесі аероіонної обробки відбувається часткове знищення мікрофлори, а це забезпечує можливість тривалого терміну зберігання.

Таблиця 5.14

Зміна хімічних показників в процесі зберігання в'яленої щуки

| Сировина                            | Кислотне число, мг КОН/1г жиру |         |         | Перекисне число, % йоду |         |         |
|-------------------------------------|--------------------------------|---------|---------|-------------------------|---------|---------|
|                                     | 7 днів                         | 14 днів | 21 день | 7 днів                  | 14 днів | 21 день |
| Щука (з аероіонною обробкою)        | 0,19                           | 0,24    | 0,3     | 0,03                    | 0,07    | 0,13    |
| Щука (без електрофізичних факторів) | 0,2                            | 0,28    | 0,33    | 0,07                    | 0,11    | 0,16    |

Дослідження показників якості отриманого продукту. Ступінь дозрівання традиційно оцінювалась біохімічними процесами – накопиченням продуктів гідролізу та окисленням жиру. Контролювалась динаміка цих процесів впродовж зберігання продукту понад 30 діб (табл. 5.15)

Таблиця 5.15

Динаміка мікробіологічних показників на технологічних етапах приготування в'яленої щуки за допомогою аероіонів

| Об'єкт контролю                       | МАФАНМ, КУО/г(.10 <sup>-4</sup> ) | БГКП, в 1 г | Золотистий стафілокок, в 1 г |
|---------------------------------------|-----------------------------------|-------------|------------------------------|
| Охолоджена сировина                   | 0,31.                             | 0,0009      | 0,006                        |
| Солений напівфабрикат                 | 0,19                              | 0,06        | 0,012                        |
| Готовий в'ялений продукт через 30 діб | 0,71                              | Не виявлено | Не виявлено                  |

Одним з важливих контрольних показників якості досліджуваного продукту в даній роботі був показник зміни росту мікробної культури впродовж технологічного процесу в'ялення сировини з використанням аероіонів.

Санітарно-мікробіологічний контроль кінцевого продукту модифікації сировини з цієї риби показав, що в'ялена аероіонами щука за своїми характеристиками відповідає стандартним вимогам «Інструкції з санітарно-мікробіологічного контролю сировини».

Аналіз отриманих в дослідженнях даних показав, що під дією аероіонів кількість мікробної культури в сировині знижується. Бактеріостатичний ефект, очевидно, обумовлюється значним і інтенсивним зниженням вмісту вологи в тканинах риби при обробці аероіонами за рахунок втрати вільної вологи.

Завершальними дослідженнями було визначення органолептичних характеристик отриманого продукту. Оцінка якісних показників здійснювалась експертами за 5-бальною системою. Многокутник якості, побудований за цими оцінками наведено на рис. 5.33. Показники якості того чи іншого рецепту виготовлення продукту визначається площею многокутника. Найвищому показнику відповідає многокутник з максимальною площею.

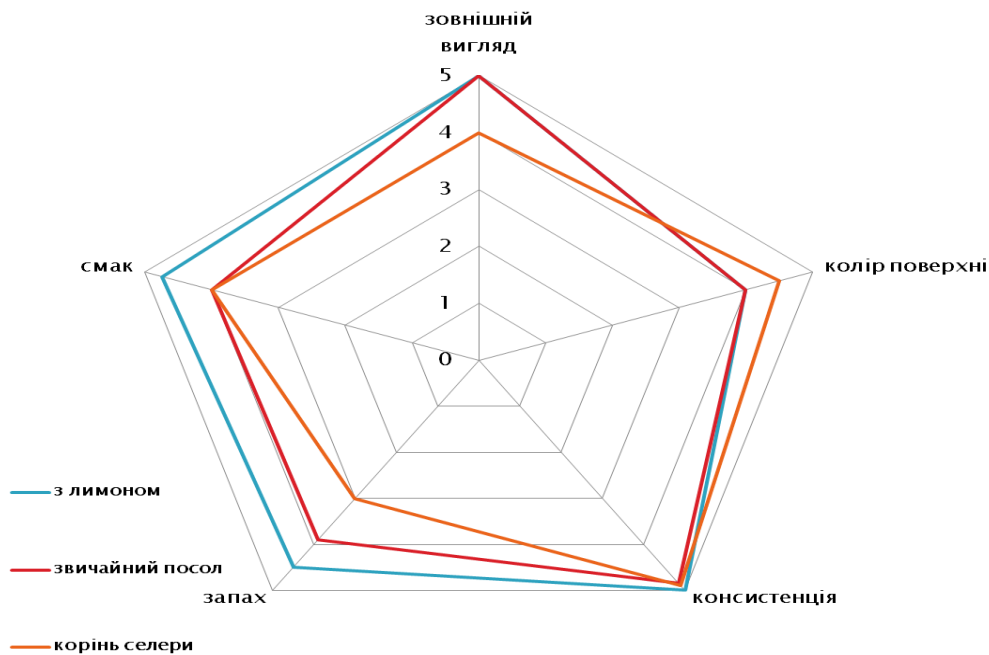


Рис. 5.33 Многокутник якості побудований за органолептичними оцінками продукту з різними видами смакових добавками

### 5.6.2 Результати випробування технології в'яленої щуки

Метою даного дослідження було удосконалення технологій в'ялення прісноводної риби шляхом заміни неефективного етапу її сушки за рахунок теплової енергії на більш економічний спосіб передачі енергії зарядженими частинками – аероіонами.

Це непроста задача, бо аероіонна технологія створювалась для переробки морської сировини, яка за своїм складом суттєво відрізняється від прісноводної риби. Було необхідно встановити, чи буде аероіонна технологія такою ж ефективною і для в'ялення прісноводної риби. Експерименти здійснювались з

використанням потоків аероіонів бактеріостатичної концентрації  $6,0 - 60,0 \cdot 10^6$  іон/см<sup>3</sup>. Усі дослідження здійснювались на експериментальній базі радіаційних технологій ІЯД НАН України.

Таким чином, за результатами аналізу хімічного складу різних видів прісноводних риб було визначено щуку, як оптимальну сировину для модифікації її в харчовий продукт шляхом електрофізичної переробки. На відміну від жирних риб, провісна продукція з «худої» щуки містить суттєво меншу кількість небажаних продуктів окислу жиру. Таку сировину легше піддавати глибокій сушці для покращення мікробіологічних показників продукції та подовження термінів зберігання.

Було удосконалено технологію в'яленої харчової продукції з прісноводної рибної сировини, яка забезпечила високу якість продукції і перспективу для прогресу вітчизняної харчової промисловості. В основі технології покладено залучення знань прикладної електрофізики - та ядерної фізики.

Випробування показали, що залучення електрофізичних методів у харчових технологіях дозволяє знизити енерго- і трудовитрати, водоспоживання, зменшити ступінь забруднення зовнішнього середовища, поліпшити якість і підвищити вихід продукції. Особливо ефективним є використання біологічних ефектів електрофізичних технологій, серед яких найбільш значущими є антимікробний і антиферментний та радіаціо-хімічний ефекти.

Дослідження складових іонної технології довели, що аероіони суттєво інтенсифікують технологічний процес в'ялення і здійснюється це при мінімальних енерговитратах – менших за  $1 \text{ Вт} \cdot \text{кг}/\text{год}$  обробки продукції.

Всього за 46 годин (замість традиційних 7-10 днів) такої обробки сировина модифікується в готовий продукт вологістю 35%, органолептичні показники якого суттєво вищі за аналогічну продукцію традиційних технологій. А завдяки вираженому бактеріостатичному і електростатичному ефекту дії аероіонів виробляється харчовий продукт з подовженим терміном зберігання. Встановлено основні механізми мікробіологічної ефективності аероіонної обробки.

В продукції практично не відчувається присмак окисленого рибного жиру. А зовнішній вигляд – рівномірний рожевуватий колір поверхні, прозорість філейки – ті показники, які при традиційних технологіях досягнути неможливо. З цього можна зробити обґрунтований висновок про те, що аероіонна сушка щуки є корисним і перспективним напрямком виробництва високоякісної рибної харчової продукції і може дати значний економічний та соціальний ефект.

В проведених випробуваннях доведена можливість залучення низькоенергетичних іонів з атмосферних газів до вирішення актуальних технологічних і економічних проблем. Вже зараз на підставі отриманих результатів можна зробити висновок, що переробка прісноводної риби за допомогою електрофізичних технологій дасть змогу виробляти якісний та екологічний продукт, переробляючи вітчизняну сировину при мінімальних витратах, які в подальшому можна буде використати на нові модифікації цих технологій.

### **5.6.3 Дослідження аероіонного процесу в'ялення бичка чорноморського**

Метою даного дослідження було встановлення характеру зміни вмісту вологи в нежирному солоному напівфабрикаті харчового продукту в залежності від часу посолу, терміну аероіонної обробки та інтенсивності потоку аероіонів. Об'єктом дослідження був чорноморський бичок-кругляк. Хімічний склад риби і вміст солі визначався у відповідності до ГОСТ 7636-85.

Використовували сировину, попередньо розморожену зануренням в прісну воду з температурю 15<sup>0</sup>С впродовж 15 хвилин. У розмороженої риби видалялися нутрощі та луска. Потім напівфабрикат був розділений на три частини. Дві частини розробленого напівфабрикату просолювали в насиченому розчині кухонної солі (1:2) при температурі 10-12<sup>0</sup>С впродовж години-півтори. Після закінчення процесу просолювання риба одноразово споліскувалася прісною водою.

Далі солений напівфабрикат і розроблена не солена риба опромінювалася потоком аероіонів кисню з щільністю 1нА/см<sup>2</sup> (рис. 5.34).

При цьому періодично проводилось зважування риби з точністю 0,02г. Середня температура повітря в робочому об'ємі складала 25<sup>0</sup>С, відносна вологість – 85%. Хімічний склад сировини характеризується вмістом води 79,1; білку – 19,3; жиру – 0,50; золи – 1,1% відповідно.



Рис. 5.34 Аероіонні процеси модифікації бичка

За результатами експериментів з допомогою табличного процесора Мікрософт-Ексель Mikrosoft Exel<sup>3m</sup> та аналітичного пакету (StarSoft STATISTIKA<sup>3m</sup>) за загальними правилами були отримані квадратичні рівняння моделі процесу (динаміки тепломасового процесу видалення води), у вигляді:

$$Y_1 = 5,24 \cdot 10^{-3} \cdot X_1 - 0,728 \cdot X_1 + 5,02 \cdot 10^{-3} \cdot X_1 X_2 + 78,98 - \text{для не соленої риби,}$$

$Y_1 = 1,37 \cdot 10^{-3} \cdot X_1 - 0,716 \cdot X_1 + 4,25 \cdot 10^{-3} \cdot X_1 X_2 + 74,89$  – для солоного напівфабрикату з терміном соління 1 година,

$Y_1 = 3,19 \cdot 10^{-3} \cdot X_1 - 0,519 \cdot X_1 + 5,02 \cdot 10^{-3} \cdot X_1 X_2 + 74,98$  – для солоного напівфабрикату з терміном соління 1,5 години.

В цих рівняннях :

$Y$  – вміст води в продукті, %;

$X_1$  – час обробки аероіонами, годин (1-51 година);

$X_2$  - початкова маса екземпляру солоного напівфабрикату, г

Стандартна похибка оцінки регресії на даному відрізку значень складає менше 0,65, коефіцієнт детермінації ( $R^2$ ) більше 0,9975. Відповідність моделі перевірено з застосуванням критерію Фішера при  $\alpha = 0,05$ .

За результатами вимірів екземпляру риби вагою 55 г був складений графік динаміки процесу. З першого погляду процес наближений до лінійного. Але зі збільшенням терміну сушки, він, як і очікувалось, сповільнюється. Це обумовлено гістологічними змінами структури матеріалу рибної сировини за рахунок його ущільнення, як це було показано раніше.

Результати досліджень процесів в експериментах за даною технологією показали надзвичайно високу ефективність використання аероіонів для виготовлення в'яленої риби з цієї сировини (рис.5.35).



Рис. 5.35 Готова сушена продукція з бичка-кругляка, отримана на лабораторній аероіонній установці ІЯД

Так солоний напівфабрикат з середньою масою 40 г за 48 годин досягає вологості 45% при енергоспоживанні повністю завантаженої експериментальної аероіонної установки 1 Вт електроенергії на 1 кг напівфабрикату за годину.

Тоді як показники сучасних промислових камер для високотемпературної сушки та в'ялення складають більше 30-50 Вт·кг напівфабрикату на годину.

При цьому слід зауважити, що увесь процес в'ялення в нашому випадку здійснюється в не кондиційованому повітрі з параметрами, що відповідають умовам навколишнього середовища.

В результаті експериментальних досліджень даного технологічного процесу отримано рівняння, які описують кінетику процесу сушки і встановлено її характер – близький до лінійного. Рівняння дозволяють з високою точністю визначити кінцеву точку процесу сушки виходячи з масового складу напівфабрикату і можуть використовуватися для прогнозування конкретних технологічних заходів і рішень при аероіонному в'яленні риби.

Як показали випробування, аероіонна технологія дозволяє вирішувати задачі організації виробництва в'яленої риби продукції в промислових масштабах.

Використання усіх інших відомих технологій в'ялення пов'язані з високою енергоємністю виробництва. А виробництво в'ялених рибопродуктів в природних умовах сильно залежить від кліматичних умов і доступне лише в теплі періоди року і не завжди забезпечують отримання продукції необхідної якості.

#### **5.6.4 Висновки**

Випробувана технологія в'ялення, в основу якої покладено взаємодію складних органічних матеріалів з низькоенергетичними іонами атмосферних газів, а в даному випадку солоного напівфабрикату з чорноморського бичка-кругляка, зарекомендувала себе як перспективний напрямок удосконалення виробництва цього виду харчових продуктів. Вона вигідно відрізняється своїми енергетичними показниками від теплової і надає можливість в короткий термін організувати ділянки по виготовленню в'ялених бичків на будь-якому діючому чи новому підприємстві.

#### **5.7 Аероіонна технологія баликової продукції з прісноводної риби**

Завданням досліджень було знайти і випробувати в лабораторних умовах науково і технічно обґрунтовані технології провісних харчових продуктів з товстолобика – найбільш поширеної рибної сировини місцевого вирощування. Як основу для технологічної розробки було прийнято вплив іонів атмосферних газів на структуру органічних матеріалів природного походження. Особливо переконливим є



викладені раніше результати таких розробок для вітчизняної сировини. Але на відміну від попередніх видів риби, товстолобик різко відрізняється своїми фізико-механічними та біохімічними характеристиками.

Перша проблема вирішення цієї задачі – великі габарити сировини, як створюють проблему навіть для розміщення його в існуючих аероіонних установках ІЯД. Друга проблема – велика щільність тканин в складі сировини викликає сумніви в можливості отримання такого ж ефекту інтенсифікації тепломасових процесів. Третя проблема – біохімічний склад маси сировини, де практично відсутні ферменти для структурної і біохімічної модифікації такої сировини в харчовий продукт.

Враховуючи, що дослідження будуть займати значний проміжок часу і вимагатимуть численних теоретичних і експериментальних досліджень, на першому етапі було прийнято рішення максимально скористатися отриманим попереднім досвідом.

Метою досліджень було встановлення принципової можливості застосування аероіонних технологій для переробки прісноводної рибної сировини великих габаритів. Завданням було дослідити і визначити, які з результатів попередніх досліджень можуть бути основою створення нової технології для цього виду рибної сировини.

Для постановки експериментів були прийняті наступні положення:

1. Попередню розробку сировини здійснювати за відпрацьованими впродовж тривалого часу технологіями солоної риби, з урахуванням особливостей сировини даного виду.

2. У перших експериментах сировину розробляти не на філе, а на стейки, завтовшки не більше 1,5 см, щоб вона не перевищувала габарити напівфабрикатів з риби, яка вже тривалий час обробляється аероіонними технологіями.

3. Встановити основні показники ефективності запропонованого процесу – мікробіологічні, біохімічні, фізичні.

*Постановка експерименту.*

1. Сировина розробляється на стейки вагою не більше 200 г і товщиною не більше 1,5 см. Заготовлені стейки, які просолювали сухим посолом до отримання

солоності в масі сировини, опромінюють потоком іонів щільністю не менше 1,5 нА/см<sup>2</sup> впродовж 48 годин при кімнатній температурі до втрати маси зразків не менше 40%.

Вивлено, що після цього продукт можна використовувати як в'ялений балик або підкопчувати в лабораторній установці електрокопчення для отримання копченого баличка товстолобика. Для баликового продукту – термін обробки (не менше 48 годин) вибирається з розрахунку повного протеолітичного визрівання з урахуванням дуже малої активності мускульних протеаз.

Виготовлений продукт в лабораторіях НУБіП було досліджено за показниками, характерними для харчової галузі. Визначалось перекисне число (рис. 5.36), кислотне число (рис. 5.37) та мікробіологічні показники (рис. 5.38).

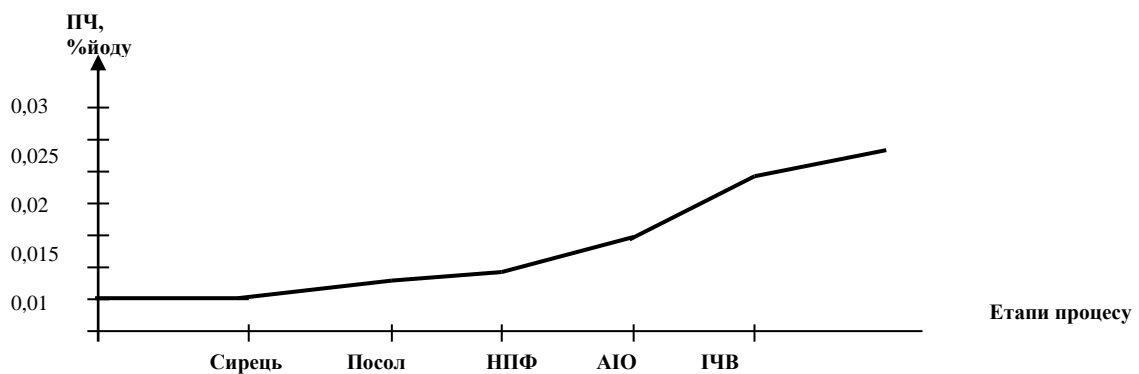


Рис. 5.36 Динаміка показника перекисного числа (ПЧ) в сировині в процесі виконання різних етапів її модифікації в кінцевий продукт

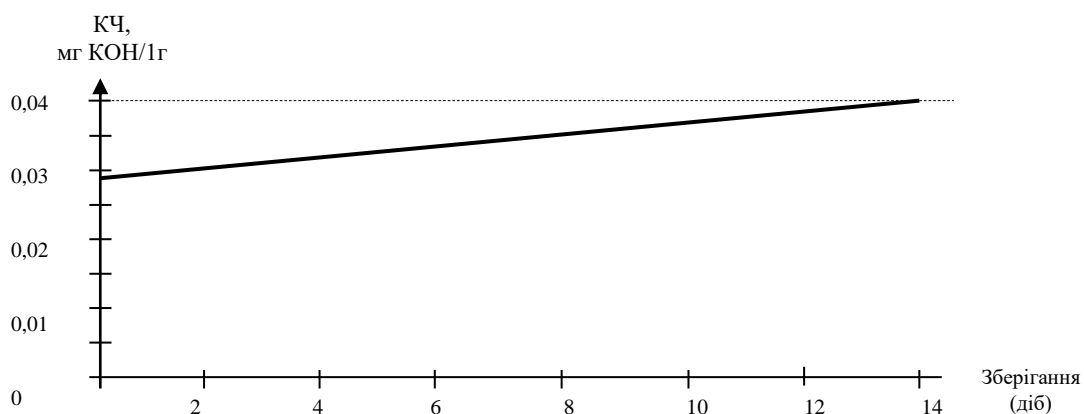


Рис. 5.37 Динаміка показника кислотного числа (КЧ) в кінцевому продукті впродовж зберігання 14 діб при позитивній температурі 5°C

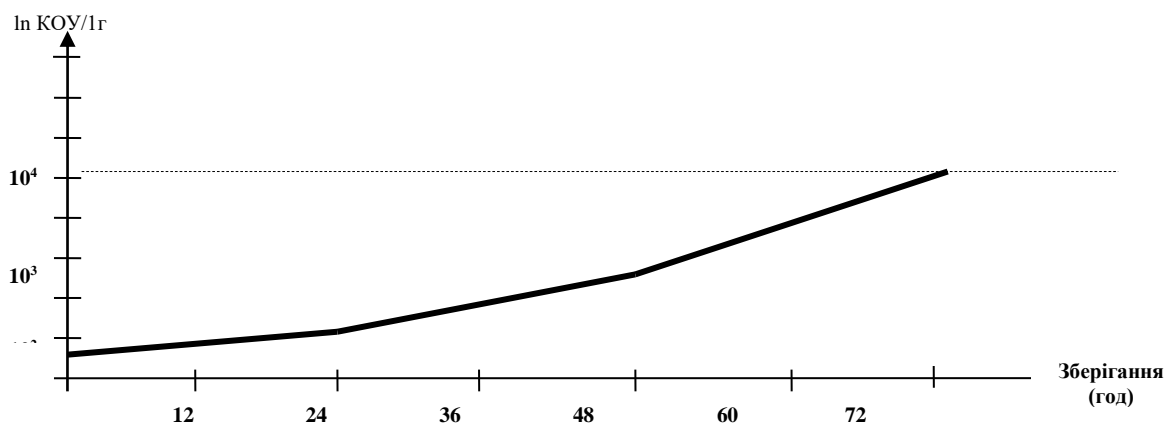


Рис. 5.38 Динаміка мікробіологічних характеристик кінцевого продукту з сировини товсто лоба впродовж зберігання при позитивній температурі 6-12<sup>0</sup>С

*Результати і висновки:*

Досліджено ефективність застосування електрофізичних іонних технологій переробки риби для виготовлення харчових продуктів з прісноводної сировини великих габаритів.

Підтверджено можливість залучення попереднього досвіду підготовки напівфабрикатів для здійснення технології в'ялення товстолюбка.

Встановлена відповідність базових показників придатності напівфабрикатів для електрофізичної обробки вимогам діючих стандартів споживання та подальшого використання в провісних технологіях та пресервах.

Досліджено вплив режимів роботи електрофізичної аероіонної установки на хімічні, органолептичні та мікробіологічні показники кінцевого продукту.

Оцінено якість продукції та визначено їх харчові показники і здатність до зберігання.

Встановлено, що ефект повного визрівання проявляється через 1 місяць після виготовлення балика. Солоність готової продукції відповідає сучасним дієтичним вимогам – не вище 5-6 %.

Результати досліджень свідчать, що даний шлях є перспективним для подальшого технологічного прогресу в рибопереробній галузі для виробництва безпечних продуктів високої якості.

## 5.8 Інноваційна аероіонна технологія кулінарної продукції з риби

Отримані результати лягли в основу експериментів з приготування рибної сировини складного комбінованого харчового продукту групи кондитерських виробів. На рис. 5.39 показано оригінальний торт, виготовлений з риби. Він повністю відповідає вимогам до солодких кулінарних виробів за смаком, термінами зберігання, безпекою споживання.



Рис. 5.39 Оригінальний солодкий торт з риби, виготовлений з використанням аероіонної обробки складових його компонентів [96]

Останні дослідження свідчать, що опромінення іонами повітря є надзвичайно перспективним напрямком досліджень і розробок та відкриває широкі можливості удосконалення технології багатьох видів харчових продуктів і суттєвого розширення асортименту харчів у вітчизняних споживачів.

## 5.9 Дослідження аероіонної технології провісної продукції із філе оселедця тихоокеанського

Метою роботи є використання іонів низької енергії для створення високоекономічної технології оселедця тихоокеанського (*Clupea pallasii*) по типу провісної зі зниженим вмістом солі (до 4 %). Проблемою традиційного в'ялення такого продукту є втрати більшості своїх корисних складових при нагріванні в сушильних промислових агрегатах або при тривалому перебуванні сировини на відкритому повітрі через мікробіальне псування.

В дослідженнях використовувалась сировина з вмістом жиру 11,3 %. Після посолу рибу розвішували на рейки в робочій камері установки, щільно закривали дверці камери і підключали до мережі генератор аероіонів.

Інтенсивність іонізації робочого об'єму камери контролювали вимірювачем потоку аероіонів, встановлюючи концентрацію їх на рівні  $5 \cdot 10^7$  іон/см<sup>3</sup>. Час обробки філе аероіонами складав при цьому близько 10 год. Ці умови забезпечували необхідний запас стерильності в готовій продукції. Було встановлено, що в м'язовій тканині риби в процесі аероіонної обробки відбувалося інтенсивне зневоднення, за рахунок чого втрата маси напівфабрикату склала  $40 \pm 5$  %.

Обробку закінчували при досягненні масової долі води в провісній рибі – конвективної сушки при температурі та вологості навколишнього середовища. Без використання аероіонів тривалість процесу зневоднення збільшилася на 4-6 год.

Фасували готову продукцію в пакети із плівкових матеріалів масою 0,25 кг. Пакети з готовою продукцією герметично запаковували термозваркою під вакуумом чи без нього.

Для детальної оцінки впливу аероіонного способу обробки на якість продукту на всіх етапах технологічного процесу виготовлення відбирались контрольні зразки сировини, солоного напівфабрикату і готової продукції, а також продукції в процесі зберігання. Усі зразки упаковувались у вакуумні полімерні пакети та зберігались при температурі  $-18^{\circ}\text{C}$  (рис. 5.40).



Рис. 5.40 Виготовлення контрольних зразків у вакуумній упаковці [96]

Дослідження показників продукту здійснювалось в атестованих лабораторіях НУБіП. Критерієм оцінки впливу аероїонної обробки рибної сировини на ступінь окислення ліпідів був вибраний показник вмісту малонового діальдегіду. Вихідний вміст малонового діальдегіду складав 0,56 мг на 100 г, а після просоловання збільшився у понад 2 рази, що вказує на прискорення окислення жиру. В подальшому у процесі в'ялення соленого напівфабрикату аероїонами кількість малонового діальдегіду трохи знизилась, що зумовлено взаємодією його з білковими компонентами (чи ферментами) м'язової тканини, а також участю в створенні та набутті зразками смако-ароматичного букету провісної риби.

В готових зразках провісного філе кількість малонового діальдегіду трохи збільшилась, але в зразках, виготовлених аероїонним способом, цей показник був нижчим, чим в контрольних ( $P < 0,05$ ). В процесі 2-місячного зберігання різниця в кількості малонового діальдегіду ставала більш значною. Ці дані наведено в таблиці 5.16.

Таблиця 5.16

Вміст малонового діальдегіду в філе оселедця тихоокеанського на стадіях виготовлення і зберігання провісної продукції

| Досліджуваний об'єкт  | Зберігання, діб | Масова частка малонового діальдегіду, мг на 100 г тканини |
|-----------------------|-----------------|---|
| Сировина              | 0               | 0,560   |
| Солений напівфабрикат | 0               | 1,314   |
| Продукт:              |                 |   |
| контрольний           | 0               | 1,033   |
|                       | 60              | 1,532   |
| оброблений аероїонами | 0               | 0,932   |
|                       | 60              | 1,686   |

Крім того був визначений склад жирних кислот загальних ліпідів філе оселедця тихоокеанського і продукції з нього. Ліпідні екстракти готувались по методу Фолча, метилові ефіри жирних кислот по методу Карро і Дубака і аналізувалися на хроматографі Shimadzu GC-14B (Японія) з полум'яно-іонізаційним детектором і машинною обробкою даних на C-R4AX Chromatorac. Умови аналізу: температура термостату 190 °С, температура інжектору – 240 °С, температура детектору – 240 °С, газ-носій – гелій, швидкість потоку – 40 мл/хв., колонка – Supelcowax – 10,30 м×0,32 мм. Метилові ефіри жирних кислот ідентифікували по вуглеводним числам стандартів жирних кислот (Supelco) і використовували природні суміші жирних кислот із деяких риб, які в свою чергу були ідентифіковані із застосуванням процесу гідрогенізації і мас-спектрометрії.

В ліпідах філе оселедця, обробленого аероіонами, так як і у в'яленому філе традиційним способом, вміст поліненасичених жирних кислот дещо зменшується (з 22 до 18-19 % від загальної суми жирних кислот), насичених жирних кислот – збільшується (з 24 до 28-30 %), а моноенових жирних кислот практично не змінюється (51-52 %).

Результати вивчення показників якості виготовленої провісної продукції із філе оселедця довели відповідність продуктів аероінної обробки вимогам СанПін 2.3.2.560-96, які висуваються до харчової продукції відповідного типу.

На основі проведених дослідів було розроблено проект промислової технології провісного філе оселедця тихоокеанського із застосуванням аероіонів.

За органолептичними та хімічними показниками провісне філе оселедця тихоокеанського аналогічне продукту, виготовленому традиційним способом (табл. 5.17)

## Органолептичні та хімічні показники провісного філе оселедця з аероіонною обробкою

| Показник                               | Характеристика  |
|--|---|
| Зовнішній вигляд                       | Філе риби без розривів м'яса, поверхня чиста, не волога<br>Філе риби ароматне – з наявністю пряностей на поверхні |
| Колір м'яса філе                       | Сірувато-бежева   |
| Консистенція                           | Від щільної до м'якої   |
| Смак і запах                           | Властивий провісній рибі, в залежності від використаних домішок і пряностей, без сторонніх присмаків і запахів    |
| Масова доля вологи, %                  | До 60   |
| Масова доля солі, %                    | Від 2 до 4  |
| Масова доля бензойно-кислого натрію, % | До 0,1  |
| Присутність сторонніх домішок          | Не виявлені   |

На основі результатів мікробіологічних і органолептичних досліджень був встановлений термін безпечного зберігання провісного філе оселедця: при температурі від 0 до 5 °С – 7 діб, при температурі – не вище -18 °С – 120 діб.

Дослідження біологічних показників продуктів аероіонної обробки (ступінь доступності їх при використанні живим організмом і живильну ефективність), проводилися фахівцями галузі за показником біологічної цінності (ВБЦ).

Методом біотестування з використанням в'їчної інфузорії *Tetrahimena Piriformis* проводилася біологічна оцінка зразків малосоленої продукції із оселедця тихоокеанського, отриманих традиційним способом і при обробці аероіонами.

Результати проведених дослідів свідчать, що аероіонний спосіб обробки риби покращує якість продукту (ВБЦ  $66,6 \pm 2,0$  % для традиційної та  $70,0 \pm 1,9$  % для аероіонної технології) (рис. 5.41).



Рис. 5.41 Готові до споживання філе оселедця, в'ялені аероіонами



Використання електроенергії на 1 кг готової продукції складає 0,1 *кВт·год*.  
*Отримані результати.* Виробництво з філе оселедців високоякісного готового до споживання в'яленого продукту, в якому практично відсутня вільна волога, стимулювало дослідження можливостей створення простої технології пресервів без консервантів.

### **5.10 Дослідження шляхів використання іонів атмосферних газів в технологіях пресервів**

*Актуальність дослідження.* Пресерви вже тривалий час традиційно виготовляються з морської риби, бо в основі цього методу виробництва покладено біотехнологічний процес модифікації сировини в харчовий продукт за рахунок біохімічних процесів під дією природних хімічних радикалів – м'язових і кишкових ферментів. Тому і технологія відноситься до переліку енергоощадних. Пресерви, як вид рибної продукції, рекордний за асортиментом і з високими органолептичними характеристиками, отримали широку популярність у вітчизняних споживачів.

Перехід вітчизняної промисловості на використання імпоротної моресировини створили проблему існування цього напрямку харчового виробництва і обумовили падіння споживання цього цінного виду рибних харчових продуктів. Численні дослідження довели, що відновити виробництво такого делікатесного продукту можливе лише за умови використання рибної сировини місцевого виробництва – прісноводних риб вітчизняних виробників. На це були спрямовані дослідження останнього періоду.

Для ІЯД НАНУ технології пресервів представляють науковий і практичний інтерес, тому що саме пресерви виявились тим сприятливим продуктом, де радіаційна обробка іонізуючими випромінюваннями застосовується з максимальною ефективністю і вирішує цілий комплекс наукових, технологічних, соціально-економічних проблем.

Технологія пресервів ґрунтується на протеолітичних процесах визрівання риби під дією м'язових ферментів та деяких видів бактерій до харчової готовності.

Визрівання пресервів відбувається після упаковки і герметизації сировини (риби, спецій, солі, заливок) і витримування загерметизованих упаковок у строго контрольованих температурних умовах не менше 5-10 діб. Через певний проміжок часу під дією протеолітичних процесів пресерви «перезрівають», втрачають свої смакові та мікробіологічні показники, продукція стає непридатною для споживання.

Але виробників найбільше приваблюють простота технології пресервів – розробка сировини, вкладання її в банки разом зі спеціями та добавками, герметизація, визрівання і передача споживачам. Для пресервів характерний широкий асортимент різних за смаком продуктів, що формується за допомогою різноманітних заливок, добавок та спецій.

Є дві ключові проблеми практичного здійснення завдання щодо створення пресервів з місцевої прісноводної риби.

Перша проблема притаманна усім видам пресервів – безпека споживання через схильність до бактеріального псування. Причиною вказаних негараздів є вільна вода – середовище для життєдіяльності численних мікроорганізмів та активний компонент біохімічних реакцій. Друга проблема – відсутність м'язових ферментів у прісноводній сировині, а отже, неможливість її протеолітичного визрівання за традиційними технологіями до харчової придатності.

Найбільш поширеним способом подолання першої проблеми є зниження в пресервах вмісту вільної води. Останнім часом для запобігання мікробіального псування в пресерви стали додавати консерванти у все більших кількостях.

Метою даного дослідження була розробка і випробування інноваційного процесу виробництва пресервів, які відповідали б високим споживчим та технологічним вимогам і не мали б недоліків, властивих типовим технологіям та враховували б особливості біохімічних процесів в прісноводній сировині.

В пошукових дослідженнях було встановлено, що попередня пікохвильова обробка сировини здебільшого усуває проблеми структуризації та низької ферментної активності прісноводної сировини та дезактивує мікрофлору. В експериментах було показано, що електрофізична фінішна пікохвильова дезинфекція опромінюванням мінімальними дозами забезпечує зберігання готових

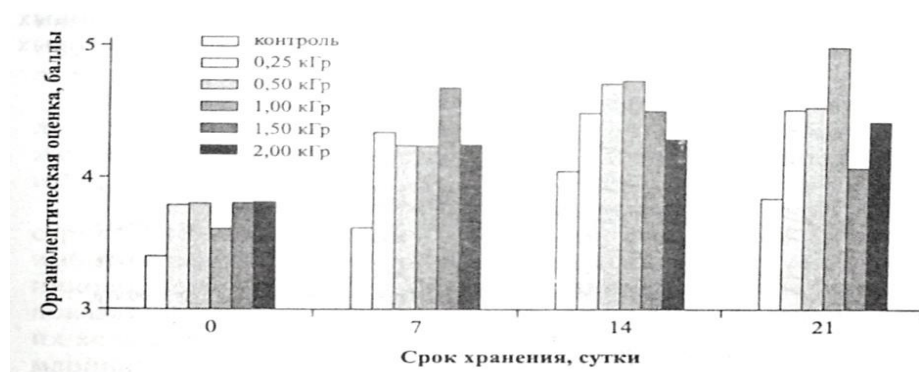
пресервів впродовж 3-4 місяців навіть при позитивних температурах. Виявлена позитивна динаміка параметрів пресервів навіть впродовж тривалого зберігання при позитивній (+5<sup>0</sup>C) температурі. Результати цього дослідження приведені в таблиці 5.18.

Таблиця 5.18

Зміна кількості мікроорганізмів в процесі зберігання пресервів прісноводної риби

| Показник  | Вимоги МТБ № 5061-89     | Термін зберігання (діб) | Фініша електрофізична обробка пресервів |                  |                  |                  |                  |                  |
|---|--------------------------|-------------------------|---|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
|   |                          |                         | Контроль (без обробки)                  | 0,25 кГр         | 0,5 кГр          | 1,0 кГр          | 1,5 кГр          | 2,0 кГр          |
| Вміст мезофільних аеробних і факультативних анаеробних мікроорганізмів, КОЕ в 1 г | Не більше $2 \cdot 10^5$ | 0                       | $5,8 \cdot 10^4$                        | $3,6 \cdot 10^4$ | $2,6 \cdot 10^4$ | $9,5 \cdot 10^3$ | $7,0 \cdot 10^3$ | $2,5 \cdot 10^3$ |
|   |                          | 7                       | $1,6 \cdot 10^5$                        | $7,0 \cdot 10^4$ | $3,6 \cdot 10^4$ | $2,5 \cdot 10^4$ | $9,0 \cdot 10^3$ | $5,5 \cdot 10^3$ |
|   |                          | 14                      | $4,6 \cdot 10^5$                        | $9,6 \cdot 10^4$ | $5,5 \cdot 10^4$ | $4,5 \cdot 10^4$ | $4,2 \cdot 10^4$ | $2,2 \cdot 10^4$ |
| Бактерії групи кишкової палички, в 0,01 г   | Не допускається          | 0                       | Не виявл.                               | Не виявл         | Не виявл         | Не виявл         | Не виявл         | Не виявл         |
|   |                          | 7                       | Не виявл                                | Не виявл         | Не виявл         | Не виявл         | Не виявл         | Не виявл         |
|   |                          | 14                      | 1 колонія                               | Не виявл         | Не виявл         | Не виявл         | Не виявл         | Не виявл         |
| Дріжджі, пліснява, в 0,1 г  | Не допускається          | 0                       | Не виявл                                | Не виявл         | Не виявл         | Не виявл         | Не виявл         | Не виявл         |
|   |                          | 7                       | Не виявл                                | Не виявл         | Не виявл         | Не виявл         | Не виявл         | Не виявл         |
|   |                          | 14                      | Виявлено плісняву                       | Не виявл         | Не виявл         | Не виявл         | Не виявл         | Не виявл         |

Позитивне враження справляють результати органолептичних досліджень пресервів з електрофізичною обробкою, наведені на рис. 5.42.



Крайні зліва – дані про контрольний зразок. Справа – про зразок з найбільшою дозою обробки  
Рис. 5.42 Динаміка органолептичних показників пресервів з електрофізичною обробкою впродовж зберігання їх 15 діб при позитивній температурі 5<sup>0</sup>C

Визначальним недоліком пікохвильової обробки є те, що вона все-таки не сприяє стабілізації заливок, а навіть навпаки – в деяких заливках відбуваються радіаційно-хімічні зміни з утворенням складних органічних сполук (полімеризація). Для реалізації пікохвильових технологій необхідна дуже дорога техніка, що різко знижує рентабельність виробництва. До того ж залишається необхідність передбачати на підприємстві складське зберігання упакованих пресервів для їх визрівання до харчової придатності перед процедурою пастеризації.

Але високі експериментально вивірені показники пастеризованих пресервів, отримані в пошукових дослідженнях дали підставу провести технологічні дослідження і розробити технологію пресервів з рибної сировини (морської та річної) з використанням аероіонів.

Їх метою було збільшення строку зберігання малосолоних пресервів з рибної сировини без введення в їх склад консервантів чи залучення складних фізичних процесів, спрощення температурних умов їх зберігання. Для вирішення такого завдання була розроблена інноваційна технологія виробництва пресервів за три етапи.

1. На першому етапі з залученням аероіонів окремо готується напівфабрикат, що за своїми властивостями відповідає повністю готовому до споживання продукту і далі не потребує визрівання.

2. На другому етапі продукт пакується, герметизується і направляється на споживання (зберігання).

3. Третій етап здійснюється лише при економічно-обґрунтованій необхідності тривалого зберігання пресервів і передбачає короткочасну фінішну обробку готових виробів пікохвильовим випромінюванням.

Такий процес є принципово новим для виробництва пресервів, бо на першому етапі залучаються електрофізичні іонні технології провісного та баликового виробництва, в'ялення, копчення. Аероіонні технології ефективно видаляють з напівфабрикатів вільну воду, активують ферменти та фактично формують готовий до споживання харчовий продукт з мінімальною вологістю.

Короткий опис запропонованої технології: готується напівфабрикат з філе після чого витримується впродовж 6-24 годин до повної харчової готовності в атмосфері, насиченій іонами, а далі укладається в тару разом зі спеціями та заливками, герметизується і направляється споживачеві.

При розробці технології таких пресервів було досліджено тонкі ефекти дії аероіонів на рибну сировину. Було встановлено, що обробка сильно іонізованим повітрям, як доповнення до вже відомих ефектів інтенсифікації біохімічних процесів визрівання продукції, при певних режимах обробки забезпечує формування на поверхні філе тонкого пористого прошарку з високими гігроскопічними властивостями. Такий прошарок є перешкодою для переміщення залишків вільної води з м'яса філе в заливку і, навпаки, з заливки в філе. Завдяки цьому стабілізується склад заливки, а, відповідно, органолептичні показники пресервів практично не змінюються впродовж усього терміну зберігання.

Таким чином, одночасно з прискореним визріванням риби, аероіонна обробка напівфабрикату також забезпечує в пресервах тривалу стабілізацію якості усіх типів заливок, запобігає їх розшаруванню під час зберігання і покращує зовнішній вигляд продукції з точки зору естетики. Особливо це помітно для рибних пресервів в водяних заливках з будь-якої сировини.

Для приготування напівфабрикату просолене філе розміщують у камері аероіонної установки (рис. 5.43). Після опромінювання витримки впродовж 6-7 годин, готовий напівфабрикат направляють на виготовлення пресервів або роздрібну торгівлю у вакуумній упаковці.

Банки герметизують (рис. 5.44) і направляють на зберігання при температурі від 0 до  $-2^{\circ}\text{C}$ .

Досліджено органолептичні параметри пресервів через 20 діб зберігання. Було встановлено, що відстою води в заливці не спостерігається, пряно-овочеві складові в суміші мають вигляд натуральних продуктів; середня солоність риби в банках 2,6-3,0% (норма 3,5-6%).



Рис. 5.43 Просолені заготовки для пресервів з філе різної риби опромінюється потоками аероіонів зі щільністю до  $20 \text{ нА} \cdot \text{см}^2$



Рис. 5.44 Закупорені банки пресервів

Крім пресервів в твердій упаковці, було встановлено, що можна випускати пресерви в м'яких, але також герметичних, полімерних пакетах з різноманітними пряно-смаковими заливками. На рис. 5.45 наведено фото зразків деяких з таких виробів, виготовлених за аероіонними технологіями з різних сортів сировини. Вони належать до групи кулінарних продуктів харчування, готові до споживання та упаковані в герметичні захисні м'які полімерні пакети.



Рис. 5.45 Деякі види кулінарної продукції, упакованої по типу пресервів в м'які герметичні пакети.



Рис. 5.46. Малосолоні пресерви після пікохвильової обробки. Ніяких небажаних змін не спостерігається.

Такі види пресервів відповідають діючим вимогам до харчових продуктів кулінарної групи і зберігають свої властивості понад 30 діб при позитивній

температурі 2-4<sup>0</sup>С. При необхідності збільшення строків зберігання пресерви піддаються фінішній дезінфекції пікохвильовим випромінюванням.

В цьому варіанті терміни зберігання перевищують 200 діб без зниження дієтичних і органолептичних характеристик. На рис. 5.46 наведено фото пресервної продукції після фінішної дезінфекції пікохвильовою обробкою. Після обробки ніяких помітних змін в продукції не виявлено.

Біохімічні дослідження підтвердили відповідність їх діючим нормативним вимогам МОЗ для харчової галузі.

### **5.11 Результат**

Розроблена технологія пресервів, яка підтвердила доцільність різнопланового використання іонізуючих випромінювань для інноваційної технології делікатесних харчових продуктів. Доведено на практиці, що іонізуючі випромінювання можуть бути основним фактором виробництва і забезпечувать не тільки високі органолептичні показники продукції, але і підвищену безпеку їх споживання навіть після тривалого зберігання при позитивних температурах.

Ефекти структурування риби під впливом аероіонів дозволили отримати оригінальну щільну консистенцію готового продукту, яку можна в широких рамках змінювати введенням різних смакових домішок і заливок.

Із супроводжуючих ефектів одним із значимих є антисептична дія аероіонів, яка проявляється в тому, що контамінація сировини в процесі аероіонної обробки знижується не менше, ніж в 3-4 рази. Разом з фактором зниження вмісту вільної води, це дозволило уповільнити темпи росту мікрофлори і відмовитись від використання спеціальних хімічних консервантів при зберіганні 20-30 діб і температурі +2±6 °С.

Ще один позитивний ефект, який проявився при використанні аероіонів в технології пресервів – це інтенсифікація дозрівання сировини, яка проходить під впливом стимулюючої дії продуктів рекомбінації аероіонів на біохімічні процеси дозрівання за рахунок теплової енергії, яка виділяється при цих процесах.

Використання цих ефектів дозволило скоротити час технологічного процесу приготування, виключаючи етап витримування пресервів декілька діб для дозрівання до готовості продукту для вживання. Пресерви аероіонної обробки готові для продажу відразу після виготовлення, тому на виробництві нема необхідності в спеціальних технологічних об'ємах для їх дозрівання з відповідними пристосуваннями підтримки температури.

## **5.12 Висновки**

1. Досліджено стан сучасних і традиційних технологій виготовлення харчових продуктів. Показано, що традиційні технології не зовсім відповідають сучасним технологічним вимогам і є малопривабливими для досягнення. Доведено можливість розробки нових технологічних схем виробництва високоякісних харчових продуктів з широким залученням наукоємних електрофізичних методів переробки риби. Доведена можливість застосування іонної обробки в процесах виробництва різноманітних форм харчових продуктів з рибної сировини.

2. Розроблено схеми технологічних досліджень та методики їх здійснення.

3. Досліджено характеристики різної сировини, придатної для виготовлення різних видів високоякісних харчових продуктів з риби.

4. Розроблена і реалізована інноваційна технологія рибних рулетів з комбінації прісноводного коропа та морської ставриди.

5. Розроблено і експериментально випробувано низку ефективних технологій структурної модифікації рибної сировини з використанням різних методів електрофізичної аероіонної обробки для виробництва різноманітних харчових продуктів.

6. Експериментально доведено можливість залучення методів електрофізики на усіх етапах виготовлення рибних харчових продуктів - підготовки напівфабрикатів, визрівання продукції, копчення та проварювання.



7. Досліджено усі етапи розроблених технологічних процесів та встановлено вплив режимів роботи електрофізичних установок на хід процесу та показники отриманої продукції

8. Досліджено показники якості комбінованих рулетів, виготовлених з використанням морської сировини та сировини з прісноводних риб. Незважаючи на кардинальну відмінність фізико-механічних і біохімічних характеристик комплектуючої сировини, використання електрофізики надає можливість виготовляти високоякісну продукцію, що відповідає всім високим стандартам споживання.

9. Експериментально встановлена можливість за допомогою електрофізики виробляти вироби рибної кулінарії, які можуть зберігатися тривалий час без суттєвих втрат своїх харчових показників.

### 5.13 Практичні розробки аероіонних технологій харчових продуктів

На рис. 5.47 наведено деякі види продуктів, виготовлених за інноваційними аероіонними технологіями.



Рис. 5.47 Деякі види продукції з моресировини, виготовлені з залученням іонів атмосферних газів

Іонні технології є надзвичайно ефективним шляхом прискореної переробки моресировини в готову харчову продукцію і тому рекомендовані, насамперед, для

переробки риби т.зв. «пікового надходження» - лососеві та деякі побережні види цінної риби. Висока економічність аероіонних технологій дозволяє розгортати тимчасові виробництва прямо на басейнах вилову і запобігати втраті сировини цінних видів риб, яка природно надходить одночасно і у великих об'ємах. Для переробки такої сировини створено і випробувано технологію оригінальної малосолоної провісної продукції з невисокою вологістю з повним збереженням усіх корисних компонентів моресировини, бо відсутня висока температурна обробка та хімічні консерванти.

На рис. 5.48 показано розроблені технології високоякісних продуктів з прісноводних риб. Ці розробки здійснено спільними зусиллями вчених-фізиків ІЯД НАН України, магістрів та фахівців-технологів НУБіП. Доведено, що з вітчизняної прісноводної сировини також можна виробляти харчові продукти, що будуть близькими до продуктів з імпортованої моресировини.



Рис. 5.48 Оригінальні технології виробництва харчових продуктів з прісноводної сировини з залучення енергії іонів атмосферних газів

Ефективне використання аероіонних технологій для переробки прісноводних риб дозволить знизити залежність вітчизняного виробництва від кон'юнктурних коливань на Міжнародних ринках моресировини.

Наведена на рис. 5.49 продукція не має аналогів у світі за показниками до продукції з імпоротної морської сировини.



Рис. 5.49 Оригінальні солодкі кондитерські вироби виготовлені з риби з використанням аероіонної обробки

При виготовленні кондитерських виробів використано властивість іонної обробки не тільки модифікувати структуру рибної сировини, запобігати передчасному окисленню компонентів сировини, але і забезпечувати її інтенсивне дезодорування і подальшу можливість гармонічного смакового поєднання в тортах, салатах тощо.

Рис. 5.50 ілюструє технічну, економічну й енергетичну ефективність залучення низькоенергетичних іонів у різні технологічні напрямки харчового виробництва.

## Практичні технологічні результати

### Розроблено іонні технології переробки сировини в різноманітні харчові продукти

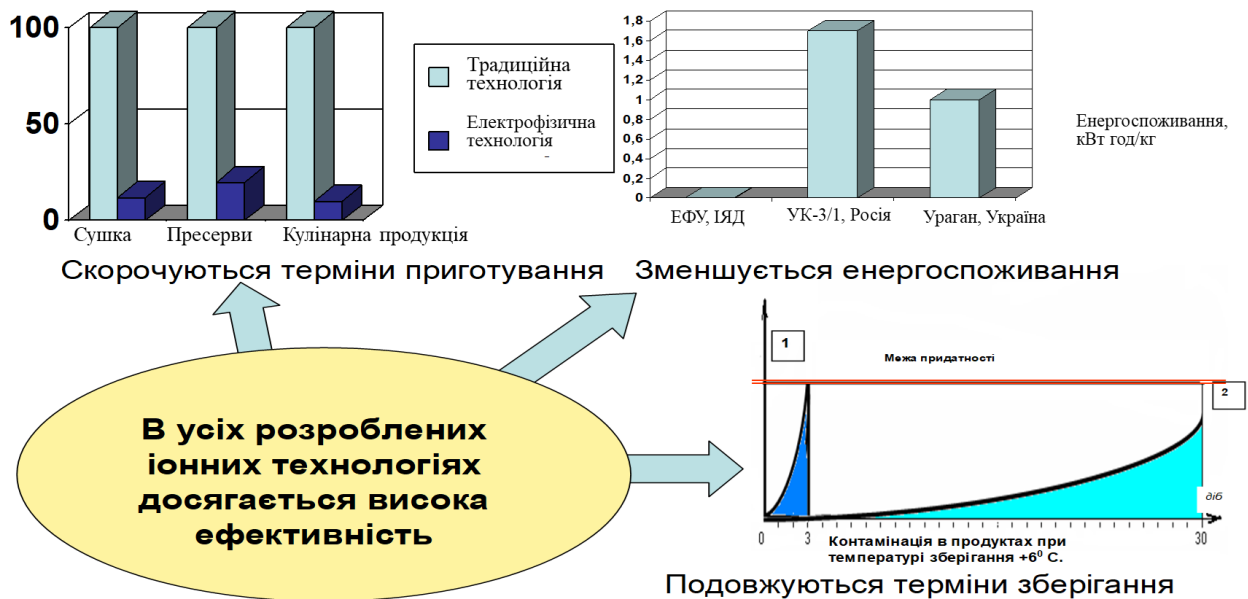


Рис. 5.50 Ілюстрація ефективності розроблених технологій

Отримані результати суттєво розширюють знання та сприяють подальшому прогресу фундаментальної та технологічної науки щодо процесів, які відбуваються в органічних матеріалах під дією заряджених частинок низької енергії.

*Наукова новизна.* Досліджено фундаментальні процеси виникнення та формування інтенсивних потоків заряджених частинок низької та наднизької енергії в атмосферному середовищі, їх взаємодію з живими клітинами, органічними матеріалами, складними органічними сполуками та їх композиціями.

*Практична цінність.* Створено наукову основу для технологічних розробок та діючу технічну базу для фундаментальних та технологічних досліджень, розробок і експериментальних випробувань промислових технологій з залучення іонів атмосферних газів низької енергії. Узагальнено дані про найбільш поширені аероіонні процеси в реальному секторі економіки. Розроблено низку оригінальних методів модифікації органіки для харчової галузі.

## РОЗДІЛ 6 РАДІАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ В БАЗОВИХ ГАЛУЗЯХ ВИРОБНИЦТВА

Розробка інноваційних технологій сучасного етапу економічного розвитку практично неможлива без застосування унікальних можливостей ядерної енергії та іонізуючих випромінювань модифікувати структури самих різних матеріалів. У даному розділі викладено матеріали практичного використання технічних досягнень сектору радіаційних технологій ВСЯ ІЯД, висвітлених в попередніх розділах дисертації щодо удосконалення експериментальної бази ІЯД та створення новітніх технічних засобів і систем для практичного втілення передових ідей практичного технологічного застосування іонізуючих випромінювань в промисловому виробництві. Наведено розробки інноваційних радіаційних технологій в базових галузях промисловості – новітніх покращених типів будівельних матеріалів.

*Стан проблеми.* Радіаційні технології широко використовуються в різних галузях виробництва й успішно конкурують з іншими технологіями, а в деяких не мають альтернативи. Основні сучасні методи радиаційних технологій тісно пов'язані з використанням іонізуючих випромінювання для обробки і модифікації різноманітних органічних матеріалів і систем. Взаємодію іонізуючої радіації і органічних матеріалів докладно вивчено. Створена потужна наукова база для проектування радіаційних технологічних процесів, враховуючи численні механізми трансформації енергії випромінювання в органічних матеріалах [29].

Аналіз ефективності застосування свідчить про існування об'єктивних проблем в практичному поширенні радіаційних технологій в реальний сектор економіки. Окрім енергетики, ще лише в напівпровідниках (відпал) та деяких процесах металургії (зварка, плавка, модифікація поверхні), медицині [33, 36, 37]. Об'єктивно найбільша прогалина застосування ядерних знань і радіаційних технологій спостерігається в галузі сучасного промислового виробництва твердих матеріалів для будівельної індустрії. Поки що відсутні дані навіть про успішне створення наукового підґрунтя шляхів конкретного вирішення цієї проблеми. І це є актуальною проблемою сучасних радіаційних технологій, бо сучасні запити щодо

економічного розвитку спрямовані на створення нового класу матеріалів для промислового застосування, насамперед композитних матеріалів, які поєднують в собі найбільш корисні властивості матеріалів попередніх поколінь. Слід відзначити, що публікацій про реалізовані в промисловості технології виробництва композитних матеріалів на основі іонізуючої радіації відсутні. Враховуючи великий попередній позитивний досвід про унікальні можливості іонізуючої радіації модифікувати атоми можна припустити, що цей напрямок є актуальним і перспективним для швидкого впровадження у виробництво [46]. В останніх дослідженнях провідних ядерних центрів України були проведені фундаментальні наукові дослідження та експериментальні випробування основних закономірностей і моделей процесів, де іонізуюче випромінювання може виступати як технологічний інструмент виробництва твердих композитних конструкційних матеріалів широкого вжитку. Але суттєвого прогресу в практичному використанні не відбулося, передусім через відсутність необхідної технічної бази для розробки та випробувань радіаційних технологій в умовах, наближених до реального виробництва.

Останнім часом ситуація суттєво покращилась. В ІЯД шляхом удосконалення експериментальної бази наукових фундаментальних ядерно-фізичних досліджень створено експериментальні радіаційні комплекси, придатні для здійснення великих міжгалузевих Програм економічного розвитку. На цій базі було успішно здійснено міжгалузеві і Міжнародні Програми. Одна з найбільш успішних – програма створення нових покращених матеріалів для будівельної індустрії.

### **6.1 Дослідження і розробки технології нового покоління радіаційно-модифікованого полімербетону**

Наведена далі розробка є результатом комплексного підходу до вирішення базових питань економічного розвитку. Її основною вимогою є залучення до виконання наукових фахівців і виробників, які забезпечують діяльність галузі. Такою була базова міжгалузєва програма створення нового покоління покращених бетонів, організаційна структура якої наведена на рис. 6.1.

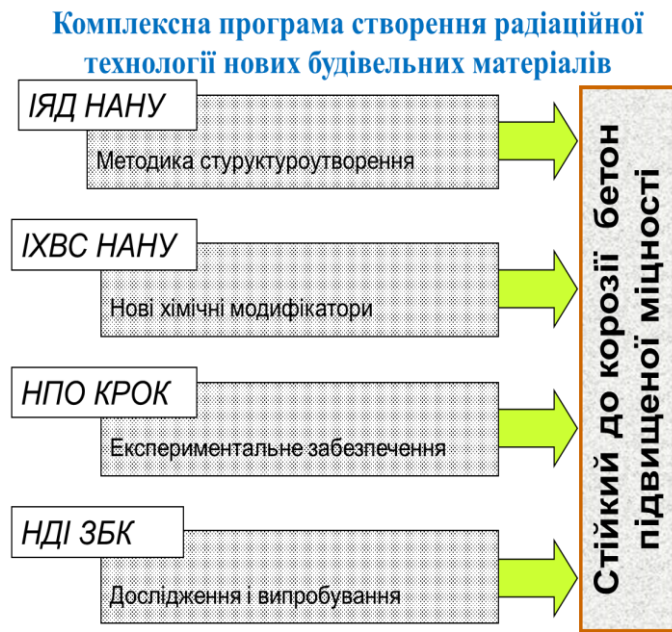


Рис. 6.1 Міжгалузева програма використання іонізуючих випромінювань для вирішення актуальної програми економічного розвитку

Ця програма стала можливою в результаті технічної модернізації дослідницької техніки ІЯД, завдяки якій було отримано можливості широкого використання радіаційної установки для комплексних прикладних досліджень і розробок в обсязі програм економічного розвитку.

### 6.1.1 Об'єкт досліджень

Бетон є найбільш поширеним сучасним конструкційним матеріалом. Технології його виробництва постійно удосконалюються, створюються нові цементуючі системи [32, 82].

*Актуальність проблеми.* Бетон самий універсальний будівельний матеріал, до якого пред'являються високі вимоги до надійності та довговічності. Остання є проблемою через корозію під впливом експлуатаційних та кліматичних умов. Внаслідок дії компонентів атмосфери (води, CO<sub>2</sub>, кислих газів, хлоридів, сульфатів та ін.) відбувається зменшення міцності бетону, зміна структури, порушення цілісності. Нерідко нові споруджені об'єкти потребують капітального ремонту через 2-4 роки з початку експлуатації (рис. 6.2).



Рис. 6.2 Проблеми корозії та руйнування бетону

*Економіка проблеми.* Ремонт бетонних конструкцій вимагає значних матеріальних ресурсів. У Великобританії та США на це щорічно витрачається приблизно 40 % - 42 % від усіх асигнувань на будівництво. За даними США пряма вартість відновлення бетонних споруд складає \$78 млрд., а супутні щорічні витрати (паливо, простої) оцінено ще в \$50 млрд. Ця проблема займає особливе місце в економіці всіх розвинутих країн. В Україні така проблема розглядається як державно значима ще з початку 2000-х років (Доручення Прем'єр-міністра України від 25.12.01 за № 18825/52 та низка наступних урядових Постанов).

Причиною передчасного руйнування бетону є його найбільший недолік – пористість. Волога легко проникає в матеріал, що і сприяє його передчасному корозійному руйнуванню. Розробка бетонів з покращеними характеристиками є сучасною і надзвичайно актуальною задачею.

Фахівцями-хіміками було запропоновано насичувати пори бетону різноманітними полімерами, що на певний час покращує ситуацію. Але через деякий час все ж відбуваються втрати ним гідрофобізуючих (волого-захисних) властивостей. Таким же малоефективним є нанесення на поверхню бетону тонких полімерних гідрофобізуючих плівок, які поступово руйнуються під впливом ультрафіолетового випромінювання сонця, різниці температур та зміни кліматичних періодів. Поступово з'явилося розуміння, що для створення якісних бетонів доцільно залучати сучасні наукоємні технології.

Одним з перспективних напрямків прогресу виробництва бетону є залучення унікальних можливостей радіаційних технологій. Були досліджені більш ефективні технології виробництва гідрофобних видів бетонів методами радіаційного



модифікування, яке потребує вдвічі меншої енергії, ніж хімічний метод. За минулі 50 років для будівництва мостів, тунелів, портових споруд та інших об'єктів з найбільш складними умовами експлуатації (мерзлота, морська вода, волога, тощо), за допомогою радіації були створені композитні бетони, які вражали своєю перевагою (рис. 6.3).

### **Існуючі радіаційні технології підвищення корозійної стійкості бетону**

Модифікація бетонних виробів мономерами акрилової групи з подальшою обробкою радіацією для ініціювання полімеризації мономерів і утворення щільного суцільного матеріалу РПБ з унікальними властивостями. Використовується в високорозвинутих країнах. Вимагає складного технічного забезпечення. Вартість вища за традиційний бетон майже в 10 разів. Використовується обмежено при виготовленні відповідальних невеликих деталей для унікальних споруд.

Модифікація акриловими мономерами (7-10%).

Радіаційна обробка гамма-випромінюванням (45 кГр).

Використовується для деталей обмеженої товщини (до 10 см).

Відноситься до небезпечного виробництва

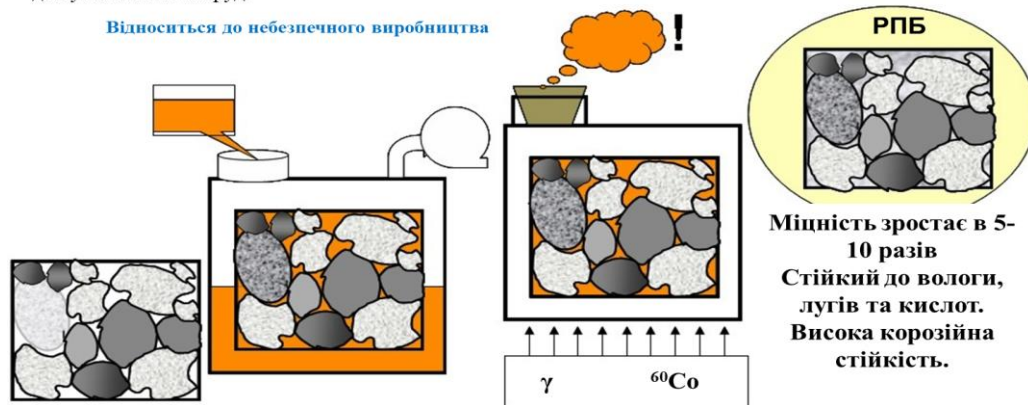


Рис. 6.3 Відомі технології використання іонізуючих випромінювань для технологій корозійно-стійких бетонів

Незважаючи на вказані в рисунку технологічні недоліки, був отриманий кінцевий продукт з унікальними експлуатаційними характеристиками. Привабливим є відтворення цих радіаційних технологій. Наші попередники підняли планку його якості надзвичайно високо. Але поширення новий полімербетон не отримав, бо він був надзвичайно дорогий і технологічно складний, а виробництво шкідливе, тому і поширений лише для спецзасобів.

Було поставлено завдання відновити цю унікальну технологію, але доступну для використання у звичайному цивільному будівництві. Мета розробки – дати будівельникам новий бетон з термінами служби в 10 разів більшими за існуючий.

Створення нових бетонних конструкційних матеріалів за цими технологіями неможливе без розробки нових підходів і відповідних технічних засобів, щоб уникнути екологічних, технічних і економічних проблем попередніх технологій.

Проблема прогресу радіаційних технологій модифікації бетонів вивчалась численними дослідниками в різних країнах. Технічні умови для інтенсифікації цих досліджень в Україні на даний час створено в ІЯД.

Радіаційні технології використовують здатність випромінювань пікохвильового діапазону електромагнітних (іонізуючих) коливань впливати на орбітальні структури атомів матеріалів. Це особливо ефективно для полімеризації мономерів. При оптимальному виборі енергії іонізуючих випромінювань ефект можна зосередити на зовнішніх орбітах електронів в атомах, які визначають їх ковалентні зв'язки між собою. Такі випромінювання можна використати як інструмент для збудження хімічних реакцій між різними елементами і сполуками, традиційно не придатними для хімічного поєднання в єдину систему, та ще і з певними фізичними властивостями. Аналіз досвіду таких робіт в суміжних галузях свідчить, що найбільш ефективним способом сприяння створенню нових органо-мінеральних композицій є збудження іонізуючими випромінюваннями хімічної активності поверхні мінеральних складових (конкрецій) і органічних матеріалів для їх надійного хімічного зшивання. Якщо такі реакції стимулювати в порах бетону, то відбувається утворення монолітного матеріалу з певними фізико-механічними властивостями. При цьому, основною умовою надійності такого матеріалу є фізичні властивості мономеру, його здатність проникати в глибокі шари бетону (мінімальна в'язкість) і після полімеризації залишатися еластичним в широкому діапазоні температур. А умовою його ефективного впровадження є відсутність токсичності.

### **6.1.2 Фізичні основи нових радіаційних технологій виробництва**

Інтенсивний процес активації відбувається під впливом високоенергетичних електронів [32]. При поглинанні енергії електронів в матеріалі відбуваються процеси, які сприяють і інтенсифікують численні хімічні реакції, в тому числі і такі, які за інших умов відбуватися не можуть. Схема цих процесів наведена на рис. 6.4.

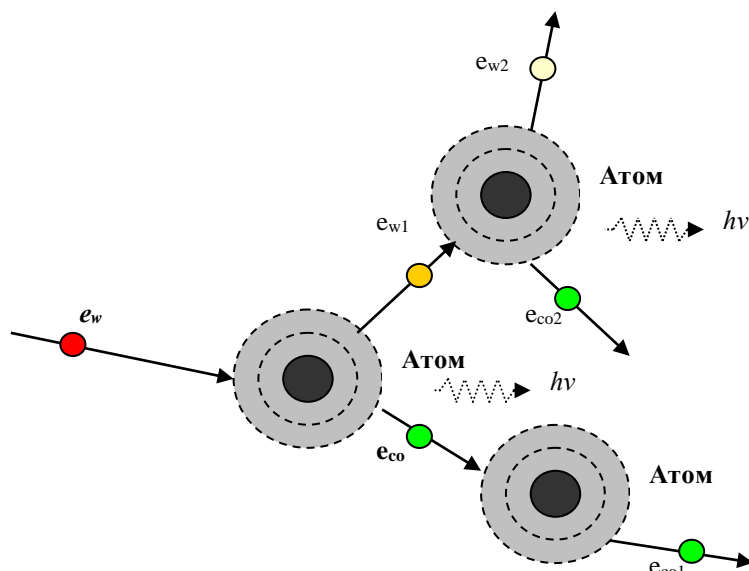


Рис. 6.4 Схема процесів модифікації оболонкових структур атомів під дією мегавольтних електронів

Основою процесів є формування потоків вільних електронів з енергією, достатньою для збудження (або відривання) електронів зовнішніх орбіт сусідніх атомів і сприяння утворенню ковалентних зв'язків через них.

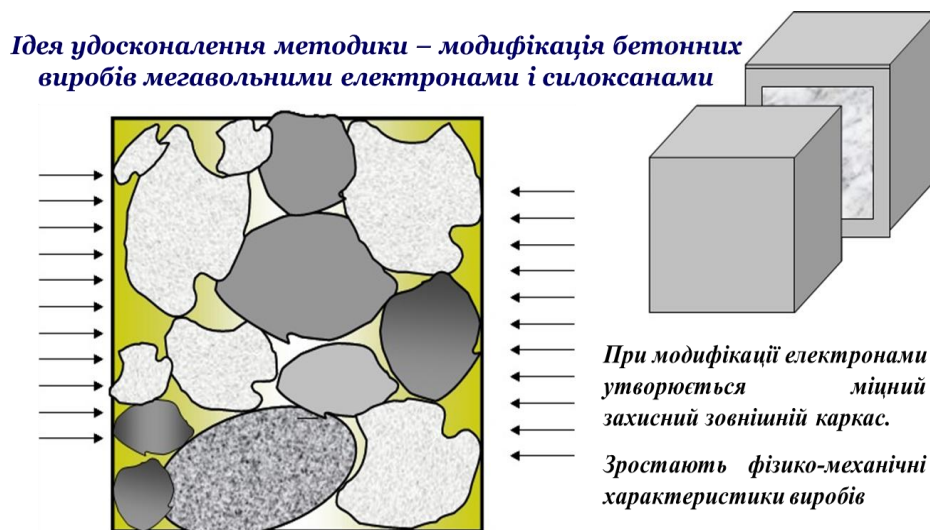
Первинний високоенергетичний (кілька  $MeV$ ) електрон  $e_w$  проходячи поблизу атома взаємодіє з орбітальними електронами, іонізує атом, або взаємодіє з ядром, випромінює фотон  $h\nu$ , який здатен іонізувати сусідні атоми. При взаємодії з орбітальними електронами, первинний електрон передає їм частину енергії і вторинні електрони або переходять на орбіти з більшим радіусом, або взагалі відриваються від атому. Первинний електрон відхиляється від початкового напрямку і продовжує рух в речовині, поступово віддаючи енергію атомам, які розташовані на його шляху. При кожному наступному акті взаємодії утворюються такі ж продукти взаємодії, а в матеріалі утворюється надлишок вільних вторинних електронів з великим запасом енергії. Вторинний електрон маючи енергії кількох  $eV$  збуджує дві-три молекули. Кожен акт іонізації фактично порушує один хімічний зв'язок. Проходження потоку таких первинних високоенергетичних електронів призводить до утворення великої кількості активованих молекул й іонізованих атомів. Утворені в результаті розриву зв'язки заряджених та незаряджених фрагментів молекул мають високу хімічну активність і швидко взаємодіють між

собою та іншими близько розташованими молекулами. При цьому в опромінюваному матеріалі виникають нові молекулярні структури і утворюються речовини з новими властивостями. Таким чином можна хімічно з'єднати несумісні іншим технологіям речовини і без будь-яких хімічних каталізаторів чи ініціаторів утворювати міцні багаточарові і композитні матеріали з унікальними властивостями.

Теоретичною основою такої моделі для органіки є радіаційна хімія полімерів. Для мінеральних матеріалів – радіаційна фізика. Бетон – це суміш вказаних матеріалів. Можливість аналізу і проектування нових методів виробництва РМПБ надає можливість поєднання цих двох дисциплін.

### 6.1.3. Ідея вирішення завдання

В основу покладено ідею заповнення внутрішніх об'ємів пор цементного каменю мінеральними добавками і за допомогою енергії іонізуючих випромінювань стимулювати хімічні реакції їх міцного зв'язку з іншими мінеральними конкреціями цементу з метою утворення монолітної структури матеріалу (рис. 6.5).



*Енергія мегавольтних електронів використовується для модифікації оболонкових структур атомів і формування потоків ковалентних електронів – ініціаторів додаткових хімічних зв'язків між конкреціями бетонних сумішей.*

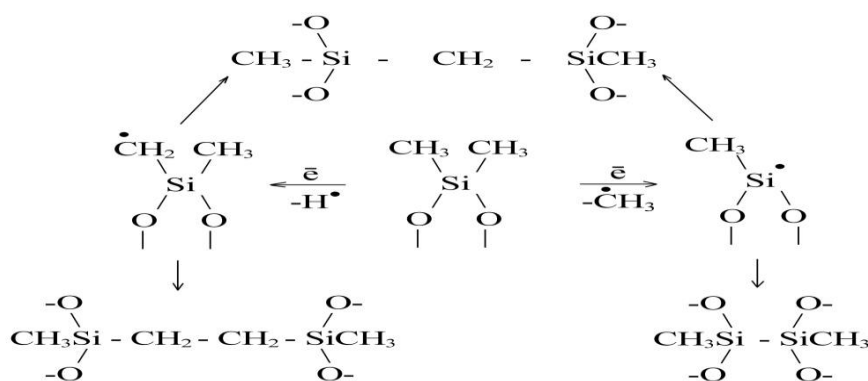
Рис. 6.5 Ідея реалізації програми корозійностійких бетонів

Реалізація цієї ідеї передбачалась об'єднаним колективом фахівців НАН України та будівельної галузі та передбачала вирішення наступних завдань:

- Створити бетон на основі нових рецептур цементуючих систем з радіаційно-модифікованих органо-мінеральних композицій.
- Створити для нових цементуючих систем нетоксичні мономери, здатні полімеризуватися при мінімальних дозах електронного опромінення.
- Здійснити радіаційну модифікацію мегавольтними електронами технологічних енергій (до 10 MeV).

Реальність створення нової методики цементуючих систем бетонів була попередньо досліджена фахівцями галузі та ІХВС. Були визначені можливі реакції приєднання кремнію до кальцієвих кристалів в цементному камені. Для здійснення цієї методики було необхідно знайти оптимальний спосіб подавання кремнію до внутрішніх пор цементу. Були сформульовані механізми і формули таких бажаних реакцій зв'язку кремнію з мінеральними складовими цементного каменю. З розрахунку на використання радіаційних методик, було вибрано вже добре опрацьовану методику дистанційної полімеризації мономерів під впливом енергії іонізуючих випромінювань і запропоновано вибрати мономер з великим вмістом кремнію, тим більше що на ринок вже надходять нові органічні сполуки на основі кремнію – силосани (кремній-органічні полімери).

В основі було припущення, що в присутності лугів під впливом опромінювання електронами можуть відбуватися радіаційно-хімічні процеси з хімічною прошивкою модифікатора до компонентів цементного каменю за схемою:



Формула бажаної радіаційно-стимульованої хімічної взаємодії кремнію з  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  цементного каменю має вигляд:



Фізичною вимогою була розробка такої рецептури олігомери, яка б мала мінімальну в'язкість і могла б проникати в мікропоровий простір матеріалу.

#### 6.1.4 Функціональні дослідження олігомерів

На час розробки технологій практично не було даних про можливість радіаційної полімеризації олігомерів. З метою отримання такої інформації було проведено радіаційні дослідження понад 200 різних рецептів сумішей (композицій) олігомерів. Метрологічною вимогою було строге дотримання однакових умов радіаційної обробки.

Для таких досліджень було удосконалено методику радіаційних процесів і створено необхідні технічні засоби [96]. Розроблено методи температурного контролю радіаційної обробки зразків за допомогою зразків-фантомів, та групові контейнери для опромінення зразків силоксанів в однакових умовах, рис. 6.6.



Рис. 6.6. Доопрацювання транспортної лінії і обладнання реакційно камери додатковими під пучковими засобами групового опромінювання



Рис. 6.7. Технологічний процес радіаційних досліджень рідких олігомерів

- 1 – Планшет зі зразками на транспортній лінії подачі зразків в реакційну камеру установки для опромінення;
- 2 – Планшет на виході транспортної лінії з опроміненними зразками;
- 3 – Верхня касета вже отримала планову дозу і вилучена з планшету;
- 4 – Скляні контейнери потемніли

За цими методами було досліджено понад 200 різних композицій олігомерів (рис. 6.7). В результаті було відібрано декілька композицій, здатних тверднути під дією мегавольтних електронів [32, 96]. Відбір здійснювався за результатами

спектрального аналізу молекулярного складу опромінених мономерів. Один з найбільш придатних мономерів наведено на рис. 6.8.

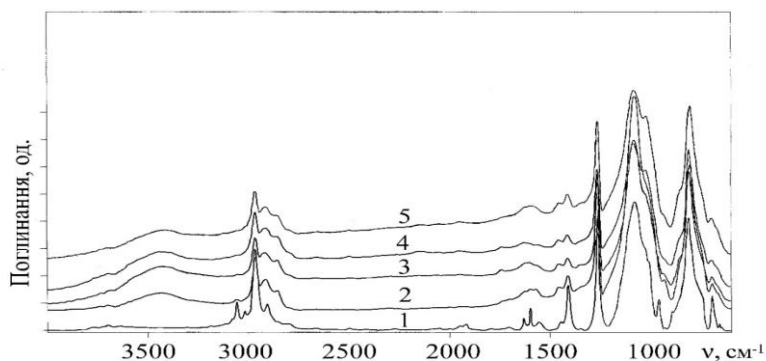


Рис. 6.8 ІЧ-спектри суміші ВЦС/ДАДМС = 97,0/3,0 після різних доз опромінення, кГр:  
1 – 0; 2–25; 3 – 50; 4 – 100; 5 – 200.

Піки на спектрі засвідчили утворення високомолекулярних груп – показник радіаційно-стимульованої полімеризації. Дози опромінення прискореними електронами становили 25–200 кГр. Час опромінення найбільшими дозами становив 8 годин в діапазоні регульованої щільності потоку електронів до 25 нА/см<sup>2</sup>.

*Результат.* На етапі досліджень властивостей компонентів, вибраних для формування нового будівельного матеріалу, здійснено низку технічних і методичних заходів:

- вирішена технологічна проблема масового опромінювання різноманітних зразків в однакових і стабільних радіаційних умовах з виключенням інших супутніх ефектів (нагрівання, розширення тощо);

- створено технічні засоби для проведення радіаційної обробки дослідних зразків мономерів та контролю за фізичними параметрами цих процесів.

- опромінювання здійснювалося при одночасному контролі за температурою контрольних зразків, розташованих поряд з робочими зразками.

Встановлено механізми модифікації – прививання Si в реакціях, які з достатньою точністю оцінюються за формулою  $\lambda\xi = 0,1 T_0 / (13,5 \ln T_0 - 20,9 - 821/T_0)$ , де  $T_0$  – енергія іонів в еВ;  $\xi = \rho n/M$ ;  $\rho$  – густина;  $M$  – молекулярна маса;  $n$  – число валентних електронів в молекулі чи одиниці мономеру

Дослідження засвідчили, що було правильним припущення про можливість відновлення і удосконалення корисного напрямку радіаційних технологій

виробництва з радіаційно-хімічною модифікацією цементуючих систем сучасними полімерами та технологічно ефективними технологіями його радіаційної обробки. А шляхом модифікації кремнію місткими олігомерами бетонних сумішей можна створити композитний будівельний матеріал, позбавлений технологічних і економічних недоліків попереднього покоління радіаційних технологій полімербетону (РПБ). Загальна інформація про особливості запропонованого методу наведена на рис. 6.9.

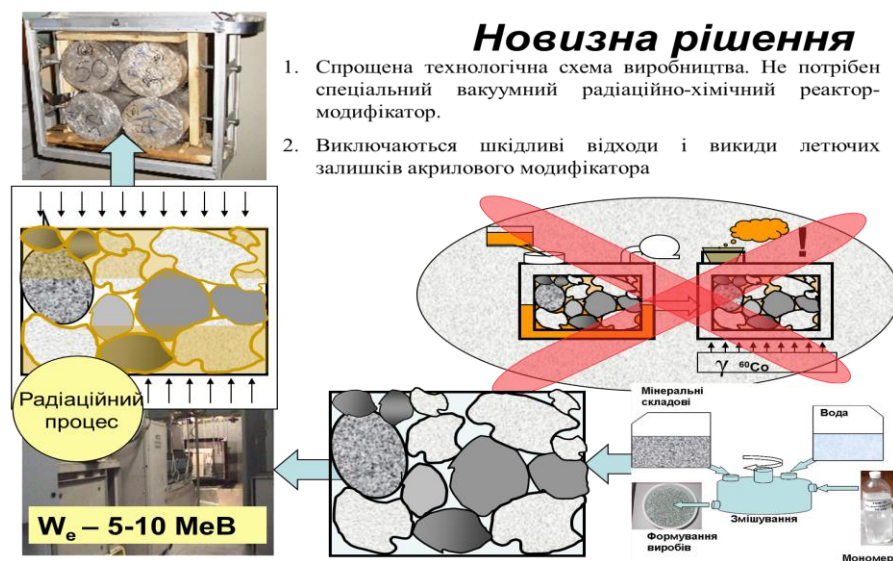


Рис. 6.9. Суть і новизна запропонованої радіаційно-хімічної методики виробництва нового покоління полімербетону (РМПБ)

Якщо раніше модифікувались вже готові цементні вироби, з вирішенням проблем їх насичення мономерами у вакуумі та підчас опромінення, то зараз модифікатор вноситься в суміш ще на етапі змішування і є органічною частиною технологічного процесу підготовки бетону. В запропонованій методиці модифікатор є складовою бетонної суміші, бетонні вироби виготовляються вже з матеріалу, придатного для радіаційної модифікації. Це суттєво зменшує витрати на технологічний процес, бо саме попередні технології модифікації в спеціальних реакторах випромінюванням ізотопів  $^{60}\text{Co}$  складали найбільшу проблему виготовлення радіаційно-модифікованого бетону попереднього покоління. А використання мегавольтних електронів забезпечує підвищену ефективність передачі енергії випромінювання до матеріалу і вирішує екологічні проблеми – виключення з



технологічного циклу радіоактивних і хімічно-небезпечних матеріалів попередніх технологій.

### 6.1.5 Технологія виробництва радіаційно-модифікованого полімербетону

Інноваційна технологія виготовлення виробів з РМПБ реалізована на експериментальному радіаційному комплексі ІЯД НАН України. Схема технологічного процесу отримання бетонних виробів наведена на рис. 6.10.



Рис. 6.10. Технологічна схема виробництва деталей з РМПБ на радіаційному комплексі ІЯД НАН України

Схема особливих пояснень не потребує, бо на практиці реалізує інноваційну методику наведену в попередньому розділі. Для розробки нового бетону використали комплексний підхід з залученням фахівців основних науково-технічних закладів – фізиків, хіміків, матеріалознавців, будівельників. Такого ще не було. Але результат було отримано за короткий проміжок часу.

Усі виконавці отримали конкретні завдання спрямовані на досягнення мети – створення нового корозійно-стійкого бетону з подовженими термінами експлуатації на об'єктах навіть критичної інфраструктури. Базові стадії технологічного процесу виробництва реалізовувались на модернізованому радіаційному комплексі ІЯД НАН України – імітаторі технологічних умов виробництва нового бетону.

Для цього використано створену на радіаційній установці багатофункціональну транспортну лінію великої вантажопідйомності, систему контролю якості та методику формування радіаційних умов модифікації бетонної суміші.

Для реалізації такої технології в умовах, максимально наближених до виробництва, удосконалено підпучкове обладнання радіаційного комплексу. А для успішного здійснення технологій розроблено низку композицій органічного модифікатора, чутливого до дії радіації, який піддається методам керування його хімічними перетвореннями за рахунок ядерної енергії та рецептури бетонної суміші, придатної для її тверднення під дією енергії мегавольтних електронів.

Попередньо експериментально вивчено особливості радіаційної модифікації мономеру і точно встановлено вимоги до його складу для введення в склад бетону та подальшого хімічного поєднання з іншими конкреціями бетонної суміші. Попередніми радіаційними випробуваннями відібрано декілька найбільш чутливих до радіації композицій і точно встановлено режими їх радіаційної обробки, які сприяють ефективному утворенню необхідних органо-мінеральних сполук, у тому числі за показниками мінімальної в'язкості та водорозчинних. З цих модифікаторів виготовлялись водні розчини малої концентрації, яка легко входить не тільки до складу сумішей, але і здатна проникати у внутрішні шари готових бетонних виробів і заповнювати пори.

Як видно з рис. 6.10 з використанням енергії мегавольтних електронів створено надзвичайно просту для виробництва технологію покращення якості будівельних матеріалів широкого вжитку.

Створена технологія екологічно ідеальна та не вимагає від виробників додаткових витрат, окрім придбання незначних об'ємів водорозчинних олігомерів, які в основному виготовляються з відходів основного виробництва інших підприємств.

## 6.1.6 Метрологія процесів

Для процесів електронної обробки сумішей бетону першочергової методичної проробки вимагали проблеми метрології радіаційного процесу – визначення фактичного розподілу поглинутої дози енергії випромінювань в глибинних шарах цього твердого, щільного, великогабаритного матеріалу. Проаналізувавши перспективні напрямки, найбільш придатним виявився метод фантомів з такого ж матеріалу, як і досліджувані зразки. При проробці цієї методики було враховано характерні особливості пучків електронів, які генеруються електрофізичними джерелами (прискорювачами). Для цього розроблено і проаналізовано модель процесів поглинання енергії електронів вздовж траєкторії їх руху в бетоні. В результаті було створено максимально просту схему технологічної дозиметрії цих процесів (рис. 6.11), яка ґрунтується на застосуванні повномасштабних зразків-фантомів.

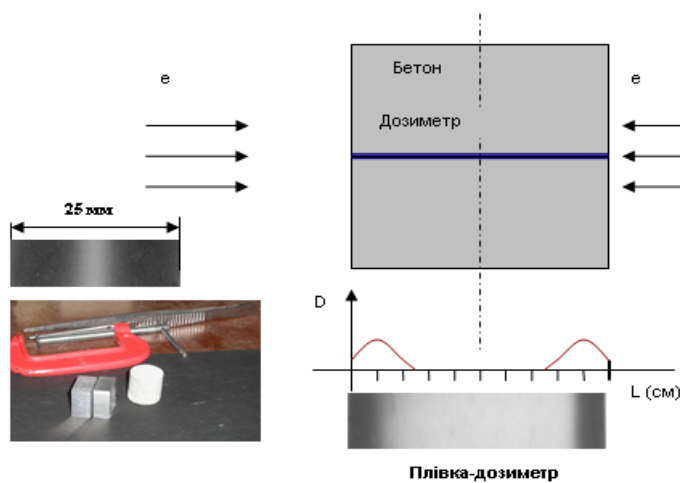


Рис. 6. 11 Фантомна методика технологічної дозиметрії процесів одержання РМПБ [32]

На практиці підтверджено ефективність такої методики дозиметрії і можливість таким шляхом визначати фактичний розподіл поглинутих доз в різних шарах виробів з бетону.

### 6.1.7 Дослідження характеристик РМПБ

Випущено партію бетонних виробів і випробувано властивості нового матеріалу згідно діючих стандартів цієї галузі. Дослідження показників свідчать, що розроблено технологію і техніку, яка забезпечує виробництво РМПБ з характеристиками, суттєво вищими за типовий бетон (таблиця 6.1).

Таблиця 6.1

Результати випробувань радіаційно-модифікованого бетону

| Досліджені зразки бетону                            | Водопоглинання бетону, % | Міцність при стиску зразків бетону, МПа |
|---|--------------------------|---|
| РМПБ суміш №1                                       | 0,28                     | 30                                      |
| РМПБ суміш №2                                       | 0,33                     | 31                                      |
| РМПБ суміш №3                                       | 0,05                     | 23                                      |
| Контрольні зразки типового бетону (не модифіковані) | 1,60                     | 23                                      |

Переваги нового покоління РМПБ в порівнянні з традиційним бетоном очевидні.

Мікрофотографії (рис. 6.12) ілюструють підвищену щільність створеного матеріалу (фото справа). Це свідчить про те, що відбувся очікуваний процес електронно-променевого ініціювання хімічного зшивання усіх складових бетонної суміші.

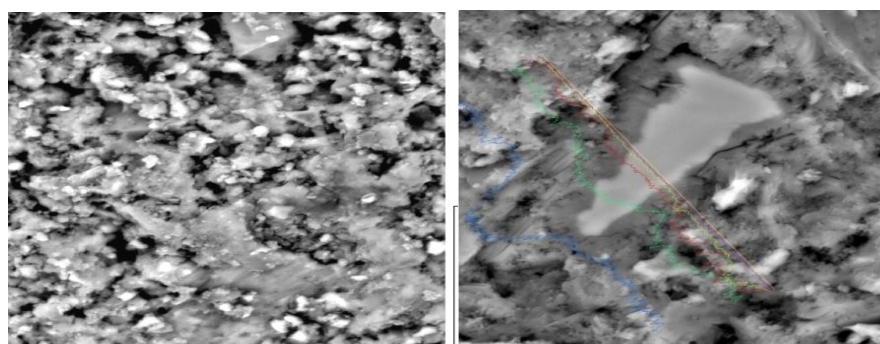


Рис. 6.12 Мікрофотографії структури бетону [32]

Зліва – типова зерниста з мікро капілярами структура звичайного не модифікованого бетону.

Справа – РМПБ за новими технологіями, капіляри не спостерігаються, матеріал має щільну структуру.

Дослідження характеристик РМПБ здійснювались в атестованих лабораторіях Науково-дослідного інституту будівельного виробництва (НДІБВ) Держбуд України та ІХВС НАН України за стандартизованими методами для галузі будматеріалів.

На знімках (рис. 6.13) отриманих методами сканувальної електронної мікроскопії (СЕМ) поверхні сколу цементного каменю, насиченого сумішшю

органічного модифікатора з великим вмістом атомів кремнію та опроміненого мегавольтними електронами дозою 60 кГр, добре видно кристали гідроксиду кальцію, краї яких розмиті.

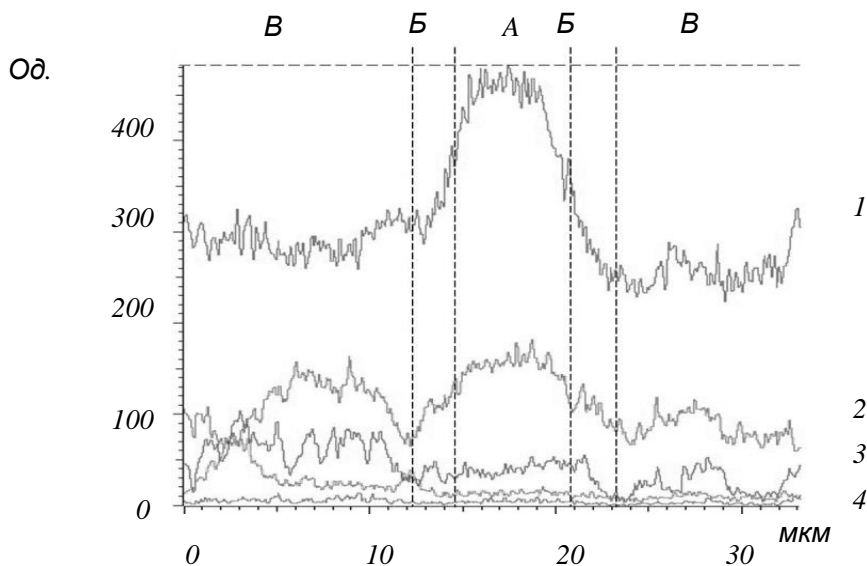


Рис. 6. 13 Розподіл хімічних елементів по поверхні сколу кристала:  
1 – кальцій, 2 – кремній, 3 – кисень, 4 – алюміній.

Даний факт свідчить, що в результаті прикладення енергії іонізуючих випромінювань утворилась хімічна взаємодія між компонентами цементного каменю і хімічними композиціями силіконів, що не характерно для зразків звичайного бетону. Це доводить, що радіаційно-модифікований бетон має щільну і однорідну структуру, наближену до природного каменю, що є основною мрією усіх розробників такого будівельного матеріалу та завданням дослідження.

За допомогою зондового мікроаналізу визначено розподіл хімічних елементів по поверхні кристала гідроксиду кальцію, краї якого розмиті (рис. 6.12, фото справа). Видно, що в перехідному (розмитому) шарі кристалічного утворення (зона Б) вміст кальцію вищий, ніж в цементній масі, що його оточує (зона В), але нижчий, ніж у центральній частині відколу кристала (зона А) (рис. 6.13).

При цьому концентрація кремнію в перехідній зоні (Б) мінімальна. Нерівномірний розподіл кремнію на поверхні, що зондується, може бути обумовлений не лише заповненням пор і мікротріщин імпрегнуючим складом

органосилоксанів, але і його хроматографічним (через радіаційно-стимульовані хімічні зв'язки) розділенням по товщині цементного каменю. Помітне нагромадження імпрегуючої суміші на активній поверхні цементного каменю біля поверхні кристалів  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  та протікання реакції, що і призводить до утворення перехідної зони (Б).

Хімічний елементний аналіз підтвердив, що запропонована інноваційна методика переходу від технологій першого покоління, до радіаційної модифікації кремній органічними (і радіаційно чутливими) сполуками є правильним шляхом відновлення виробництва радіаційно-модифікованих бетонів. Це підтверджують високі технічні показники нового покоління РМПБ, які досягнуті використанням енергії іонізуючих випромінювань для надійного радіаційно-хімічного приєднання кремнію з суміші модифікатора до інших мінеральних конкрецій бетону. При цьому базові характеристики бетонних сумішей (вміст кисню, магнію, алюмінію, калію та кальцію) суттєвих змін не мають.

Встановлено механізми й основні закономірності цих процесів, які попередньо можна оцінити розрахунками за наведеною вище формулою з урахуванням очікуваного проникнення випромінювання в матеріал.

Дослідження проведені за стандартизованими методиками засвідчили можливість використання результатів досліджень фізико-хімічних та радіаційно-хімічних процесів і розробок радіаційної техніки в технологіях виробництва монолітного органо-мінерального композитного матеріалу для бетонних виробів, в тому числі і призначених експлуатуватися в екстремальних умовах.

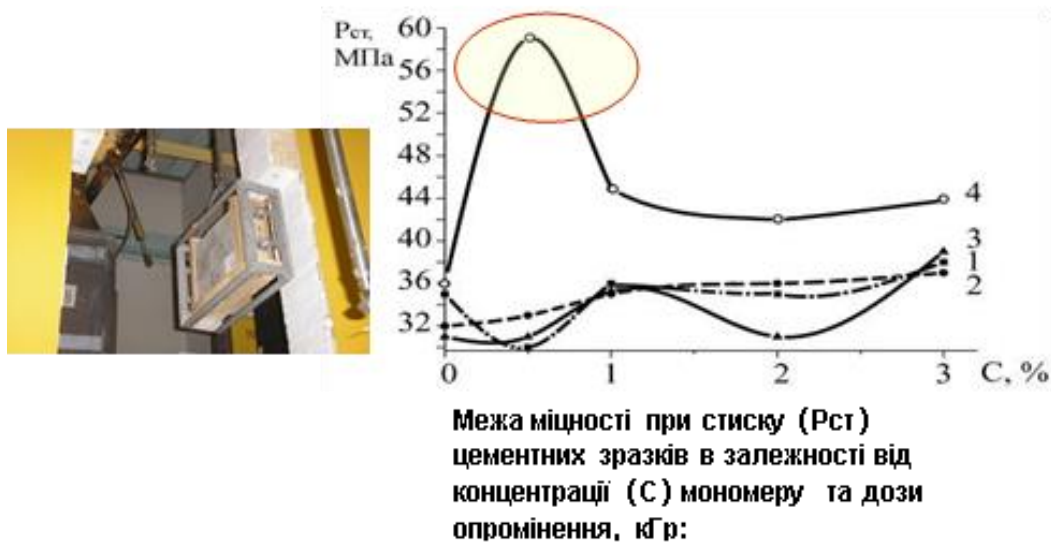


Рис. 6.14 Залежність функціональності РМПБ від вибору складу і режимів опромінення

За результатами досліджень характеристики РМПБ, відображені на рис. 6. 14, свідчать, що підбором вмісту олігомера в суміші та поглинутої дози опромінення мегавольтними електронами можна отримувати бетони з бажаними цільовими властивостями. Але в будь-яких варіантах, вони суттєво переважають традиційний і не поступаються кращим зразкам попереднього покоління радіаційно-модифікованого бетону.

### 6.1.8 Висновки

Створена і випробувана технологія РМПБ, модифікованого нетоксичними олігомерами з мінімальною в'язкістю та з використанням мегавольтних електронів для їх опромінення в глибинних шарах бетону.

Для реалізації цієї технології модернізовано спеціалізовану дослідницьку радіаційну техніку, яка поки що не має вітчизняних аналогів. Для супроводу технології розроблено методики та засоби контролю в процесах опромінення. Досліджено і сформульовано фізико-технічні та хіміко-технологічні особливості виробництва таких РМПБ.

Вироблена партія бетонних виробів випробувана згідно діючих нормативів будівельної галузі. Випробування РМПБ, проведені за стандартизованими

галузевими методиками, засвідчили можливість використання результатів досліджень фізико-хімічних та радіаційно-хімічних процесів і розробок радіаційної техніки в технологіях виробництва монолітного органо-мінерального композитного матеріалу для бетонних виробів, в тому числі призначених експлуатуватися в екстремальних умовах.

Встановлено переваги нового покоління РМПБ в порівнянні з традиційним бетоном. З наведених даних видно, що розроблені технологія та техніка забезпечують виробництво РМПБ з характеристиками, суттєво вищими за типовий бетон.

Доведено, що кремній-органічні олігомери успішно замінюють акрилові хімічні модифікатори, поширені у попередніх технологіях. Але олігомери не токсичні і відносяться до безпечних сполук, здатних розчинятися водою і легко вводяться до складу бетонних сумішей. Новий матеріал, створений з їх використанням, перспективний для широкого впровадження в цивільне будівництво.

Отримано наступні результати:

*Технологічні.* Розроблено технологію нового покоління РМПБ на основі спеціально створених нетоксичних мономерів і олігомерів з мінімальною в'язкістю та з використанням мегавольтних електронів для опромінення мономерів в глибинних шарах бетону [29, 32, 96]. В їх обсязі:

- Створено спеціалізовану дослідницьку радіаційну техніку, яка поки що не має вітчизняних аналогів.
- Розроблено методики та засоби контролю в процесах опромінення.
- Досліджено і сформульовано основні фізико-технічні особливості здійснення нових технологій.
- Випущено партію бетонних виробів і випробувано властивості нового матеріалу згідно діючих стандартів цієї галузі. Дослідження їх показників свідчить, що розроблено технологію і техніку, яка забезпечує виробництво РМПБ з характеристиками, суттєво вищими за типовий бетон



Доведена можливість використання радіації як ефективного інструменту цілеспрямованого регулювання властивостей кінцевого продукту.

*Наукові результати:*

1. Розроблено і досліджено радіаційні методи модифікації бетонів з метою гідрофобізації та зміцнення. Визначено межі поглинутих доз радіаційної обробки електронами (50 – 200 кГр) , оптимальні для отримання керованого процесу модифікації.

2. Вивчені закономірності радіаційно-хімічної прививки силіконових органічних модифікаторів до компонентів цементного каменю та мінеральних конкрецій бетону.

3. Досліджено фізико-механічні властивості модифікованого бетону.

4. Встановлено, що розроблена радіаційна методика модифікації забезпечує отримання бетону з суттєво кращими технічними характеристиками:

- в 32 рази зменшується водопоглинання;
- на 34% зростає міцність на стискання;
- в 4 рази зростає водонепроникність;
- в 2 рази підвищується морозостійкість.

5. Значне підвищення довговічності радіаційно-модифікованого бетону дає підставу вважати економічно доцільним його використання при виробництві бетонних та залізобетонних конструкцій для експлуатації в екстремальних умовах.

6. Розроблено шляхи використання наукових досягнень і отриманого досвіду створення РМПБ для їх поширення на інші напрямки виробництва матеріалів будівельної індустрії (рис. 6. 15)

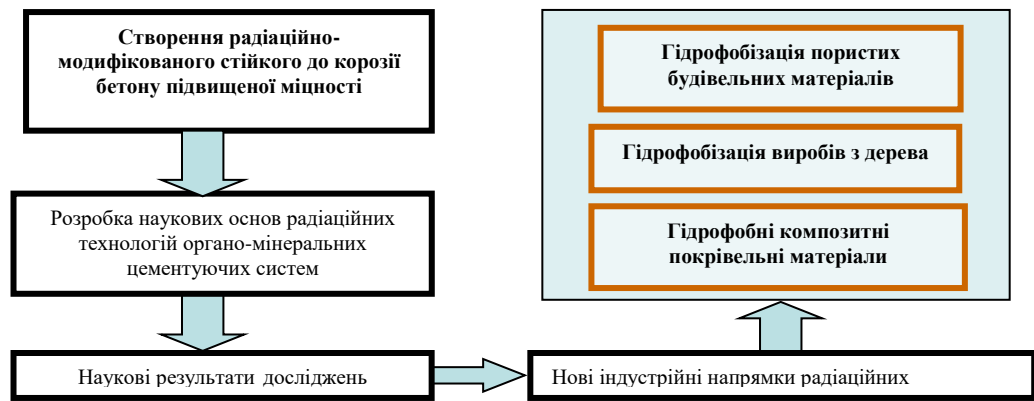


Рис. 6.15 Розробка структури подальших досліджень, спрямованих на використання отриманих результатів для суміжних галузей будівельної індустрії

Продовженням цього напрямку є наведені далі розробки технологій гідрофобізації пористих будівельних матеріалів і виробів. Цими технологіями передбачено вирішення завдання залучення енергії іонізуючих випромінювань для підвищення довговічності промислових виробів, що працюють в екстремальних умовах дії агресивних та кліматичних факторів.

## 6.2 Радіаційні технології гідрофобізації пористих матеріалів

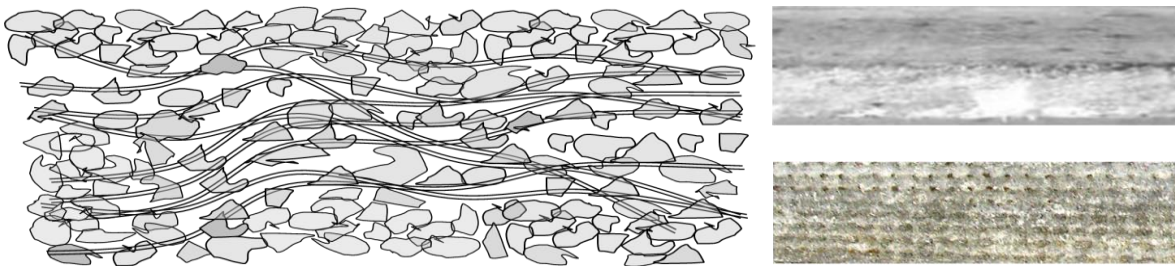
### 6.2.1 Розробка інноваційної технології композитного гідрофобного покрівельного матеріалу

Об'єктом досліджень і модифікації було вибрано шифер – один з перших композитних конструкційних матеріалів [174]. Шифер відноситься до групи твердих будівельних матеріалів, надзвичайно поширених у промисловому і цивільному будівництві. Цей матеріал, наприклад, застосовується в атомній енергетиці для спорудження теплообмінних градирень. За звичай його використовують у вигляді пластин для облаштування покрівель. Цей композит виготовляють з мінеральних конкрецій скріплених цементом і армують для міцності волокнами азбесту. Армування азбестом компенсує природну відсутність у цементного каменю здатності витримувати бокові навантаження, крихкість та низьку стійкість до розриву (таблиця 6.2).

Фізичні характеристики складових шиферу

| Складові шиферу  |            | Діаметр, мкм | Питома вага | Модуль пружності, ГПа | Міцність на розтягування, ГПа | Видовження при розриві, % |
|------------------|------------|--------------|-------------|-----------------------|-------------------------------|---------------------------|
| Азбест           | Крокидоліт | 0,02 – 0,4   | 3,4         | 196                   | 3,5                           | 2,0 – 3,0                 |
|                  | Хризотіл   | 0,02 – 0,4   | 2,6         | 164                   | 3,1                           | 2,0 – 3,0                 |
| Цементне в'язуче |            |              | 2,5         | 10 – 45               | $3,7 \times 10^{-3}$          | 0,02                      |

Композиція цих двох складових забезпечила необхідні будівельникам фізичні параметри шиферу та його тривалу і надійну експлуатацію в системах водовідведення промислових підприємств практично в усіх галузях виробництва та комунальному господарстві. Схема композиту шиферу наведена на рис. 6.16.



На фото – розріз пластини шиферу (верхнє фото) та вид однієї з її сторін

Рис. 6.16 Схема композиції складових у шифері

Відносно щільний верхній шар цементного каменю є робочою поверхнею, з мікропорами, які за рахунок поверхневого натягу перешкоджають проникненню вологи і спрямовують її в потрібному напрямку. Внутрішні шари мають значно більші пори (проміжки) між складовими і цим надають шиферу деяку гнучкість, необхідну для монтажу на об'єктах. Нижній шар має відносно велику пористість, волокна виступають за границі пластини, що забезпечує конструктивне з'єднання пластин між собою при монтажі.

В даний час виникла тенденція зниження попиту на цей недорогий і доступний матеріал через низку характерних для нього недоліків:

- недостатня здатність до пружної деформації, малий опір до зламування;
- здатність насичуватися вологою, яка при замерзанні призводить до руйнування матеріалу;
- шифер не стійкий до обростання мохами та лишайниками;
- пилефорність мікроскопічними часточками цементного каменю та азбесту.

Останній відноситься до канцерогенів, тому екологічні служби зараз не вітають проекти з шиферним покриттям.

Враховуючи, що цей матеріал є самим дешевим на будівельному ринку, асортимент деталей з шиферу вельми широкий, а будівельна індустрія добре опанувала його використання – дослідження і технологічні розробки, спрямовані на усунення вказаних недоліків є актуальною і перспективною технічною задачею.

Метою були дослідження можливостей застосування мегавольтних електронів як технологічного інструменту виробництва нового покращеного композитного матеріалу на основі шиферу.

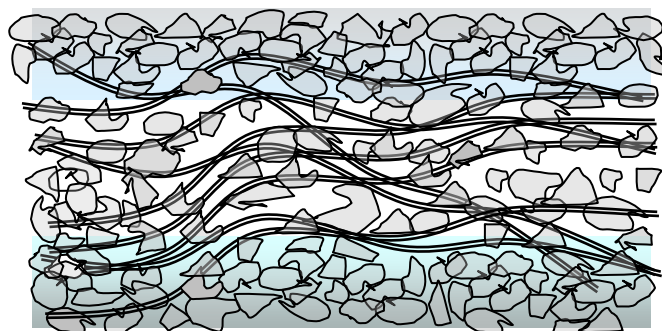
Використання ефектів взаємодії високоенергетичних заряджених частинок з матерією є привабливим шляхом створення нових технологій виробництва. Найближчими для використання є ефекти взаємодії електронів, прискорених до невисоких енергій (1-5 MeV) з зовнішніми оболонковими структурами атомів, які є основою сучасних промислових радіаційних технологій.

Основна ідея покращення характеристик шиферу (модифікації) є введення до його складу ще однієї-двох додаткових компонентів, властивості яких компенсують недоліки типового шиферу шляхом одночасного вирішення двох проблем – гідрофобізації шиферу та конструктивного удосконалення.

Досліджуються два варіанти модифікації – рівномірне введення додаткових складових у склад матеріалу, як це показано на схемі рис. 6.17 (а), або внесення їх лише в пограничні шари шиферу – рис. 6.17 (б). В обох варіантах основним завданням є введення нових (додаткових) складових в матеріал готових виробів.



а)



б)

Рис. 6.17 Схема запропонованого методу модифікації шиферу

### **6.2.1.1 Вибір технології модифікування**

З огляду на високу щільність цементного в'язучого і азбесту, вибрано електрофізичні радіаційно-хімічні технології модифікації шиферу. З цією метою пори матеріалу насичували рідкою речовиною малої в'язкості (рідким мономером), а потім полімеризували (змушували рідину тверднути) у внутрішніх або граничних шарах матеріалу під дією іонізуючих випромінювань. Останнє вигідне з економічної точки зору, бо модифікацію поверхневих шарів шиферу можна здійснювати на дешевих прискорювачах електронів невеликої енергії. В такому варіанті модифікування неодмінно покращуються конструкційні характеристики шиферу, тому що в результаті поверхневої гідрофобізації на усій поверхні виробу утворюються щільні та міцні шари модифікованого матеріалу і така конструкція буде працювати як балка, пружно сприймаючи механічні навантаження.

Було вирішено відмовитися від попередніх типів високотоксичних мономерів акрилового ряду на користь сучасним розробкам кремнійорганічних матеріалів – олігомерів, користуючись тим, що в ньому міститься значна кількість кремнію, який за допомогою енергії іонізуючої радіації можна спробувати об'єднати з мінеральними конкреціями в шифері. Більшість олігомерів відносяться до нетоксичних матеріалів і відповідно спрощують технологічний процес та структуру виробництва. Економічним підґрунтям вибору цього напрямку є широкий асортимент олігомерів на ринку та наявність в Україні підприємств-виробників, в тому числі як побічні та дешеві відходи від виробництва основної продукції. В попередніх дослідженнях було розроблено методики підбору на радіаційній установці ІЯД з використанням пучків електронів з енергією 4 МеВ композицій олігомерів, здатних тверднути у внутрішніх шарах виробів, і використано шляхи радіаційно-хімічного прищеплення органічного матеріалу до мінеральної основи.

### 6.2.1.2 Радіаційні дослідження

Для даної технології проведено спеціалізовані цільові дослідження найбільш рідких з радіаційно чутливих композицій олігомерів. Використано показаний раніше обертовий пристрій з електромеханічним приводом для рівномірного опромінення невеликої кількості рідких зразків олігомерів (до 8), з яких вибрано три зразки силоксанів різного складу з добре вираженою здатністю радіаційно-стимульованої полімеризації (табл. 6.3).

Таблиця 6.3

Характеристики вибраних кремнійорганічних мономерів та олігомерів

| Умовне позначення | В'язкість (20°C), сСт | Молекулярна маса, г/моль | Густина (20°C), г/см <sup>3</sup> | Поглинута доза полімеризації, кГр |
|-------------------|-----------------------|--------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|
| ВЦС               | 1,2                   | 308                      | 0,96                              | 25                                |
| ОМЦС-Д4           | 1,1                   | 296                      | 0,95                              | 25                                |
| ГКЖ-94М           | 84                    | 2000                     | 0,991                             | 50                                |

Подальші рішення по вибору найбільш перспективного складу олігомера здійснювався з урахуванням економічних аспектів (доступність, ціна та ін.) подальшого промислового впровадження нової технології.

### 6.2.1.3 Технологічний процес

Технологічний процес ґрунтується на механізмах взаємодії швидких електронів з верхніми оболонковими структурами атомів матеріалу. Режим радіаційної обробки вибирається з умови утворення в матеріалі – основі і олігомерові – максимально можливих кількостей атомів, які мають на верхніх орбітах неспарені електрони. За рахунок цього відбуваються хімічне зв'язування складових олігомера та мінеральної основи шиферу – цементу та азбесту. За інших умов забезпечити такі зв'язки неможливо, в цьому і є оригінальність технології.

При модифікації полімерів ефект дії радіації характеризується радіаційно-хімічним виходом ( $G$ ) – числом модифікованих молекул на 100 еВ поглинутої

енергії. Шляхом обчислення енергетичних показників передачі енергії при опромінюванні каскадів подальших перетворень, можна показати, що в основі радіаційних процесів зшивки лежать явища утворення зв'язків C-C (близько 349 кДж/моль) та C-H (414 кДж/моль). Для вирішення наших задач необхідно знайти спосіб здійснення ще одного з важливих процесів – хімічного приєднання органічної речовини (олігомера) до мінеральної основи матеріалу. За теорією прививання полімерних ланцюгів до мінеральної основи може відбуватися за умов наявності в складі основи таких же хімічних елементів, що і в мономері. Процеси прививочної полімеризації вважаються сучасними і перспективними методами модифікації полімерних матеріалів шляхом формування в них відгалужених ланцюгів зв'язаних з іншими конструкціями в структурі матеріалів (мономерів іншого типу, кристалів, матеріалу основи).

Радіаційний метод його ініціювання – це практичний і самий легкий шлях отримання привитих полімерів (в порівнянні зі звичайним хімічним методом). Іонізуючі випромінювання можуть використовуватися для генерування будь-яких активних центрів і отримання на будь-яких основах бажаних комбінацій полімерів і матеріалів. Цьому методу притаманні усі відомі переваги радіаційної полімеризації. Добре відпрацьована технологія цих процесів надає можливості їх попереднього розрахунку для конкретних показників композицій з полімерами.

При плануванні експериментів попередні оцінки ефективності процесів привичної полімеризації здійснювались за загально-прийнятою методикою по формулі. За теорією це забезпечує отримання результатів з похибкою близько 50%.

$$G_{(M)} = \frac{100N_A \Delta P}{6,24 \cdot 10^{13} D_m \cdot (P_0 + \Delta P) \cdot \rho}$$

Тут  $D$  – поглинута доза іонізуючих випромінювань, задана в  $\kappa\Gamma\rho$ ,  $m$  – молекулярна маса мономера,  $P_0$  - початкова маса полімеру до прививки на основу,  $g$ ,  $\rho$  – густина полімеру,  $g/cm^3$ ,  $\Delta P$  – бажана маса привитого полімеру,  $g$ . Результати використовували для оцінки можливостей радіаційної техніки і необхідних для експериментів об'ємів дослідного матеріалу.

В наших дослідженнях основою для прививки є чистий і добре висушений матеріал, тому попередній аналіз здійснювався з розрахунку на іонний механізм полімеризації. Аналіз теоретичних положень показав, що при опроміненні прискореними електронами велика кількість реакційно здатних і високоактивних центрів утворюється в результаті генерування озону з вільного кисню в складі полімерної суміші, а також як основного продукту радіолізу оточуючого повітря. Озон швидко розпадається, в тому числі і на атомарний кисень, що створює додаткові сприятливі умови для радіаційно-хімічної модифікації в технологіях з опромінюванням електронами.

#### ***6.2.1.4 Дослідження технології радіаційно-хімічної модифікації***

Вибрані в попередніх дослідженнях найбільш радіаційно-чутливі олігомери наносилися на поверхню зразків промислового шиферу. Деякі зразки повністю насичувалися мономером шляхом занурення. Після заповнення зовнішніх шарів виробу олігомерами, зразки навішувались на конвеєр і через транспортну лінію подавались в реакційну камеру під опромінення

В реакційній камері зразки розмірами  $60\text{см} \times 40\text{см} \times 1\text{см}$  опромінювались широким стаціонарним потоком електронів  $4\text{ MeV}$  з обох сторін і видалялись з камери на майданчик розвантаження конвеєра. Для вибору оптимального режиму технологічного процесу зразки опромінювались різними дозами, але наближеними до тих (25-50 кГр), що були визначені при дослідженнях характеристик олігомерів.

#### ***6.2.1.5 Вимірювання ефекту гідрофобізації***

В основу випробування гідрофобності модифікованого шиферу покладено традиційну для будівельної галузі методику вимірювання крайового кута змочування [96, 174]. Схема методики наведена на рис. 6.18 і передбачала нанесення краплі води на оброблену поверхню і вимірювання кута змочування. Для контрольних зразків він був меншим  $10^\circ$ . На даному етапі не ставилось метою



отримання числових даних для конкретного типу шиферу, а лише вивчалась ефективність вибраної технології радіаційно-хімічної модифікації. Випробування показали, що гідрофобізацію забезпечують усі вибрані суміші олігомерів. Було встановлено, що до олігомерів для промислового використання цієї технології слід сформулювати додаткові вимоги (в'язкість, склад, радіаційну чутливість), які обіцяють перспективу отримання унікального виду шиферу.

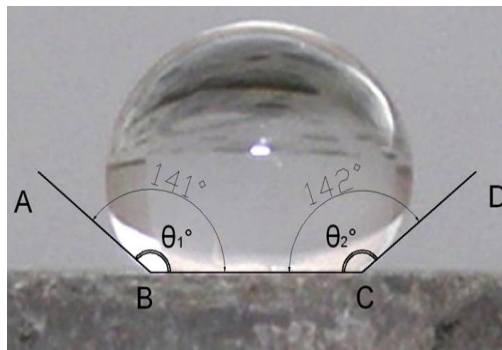


Рис. 6.18 Вимірювання крайового кута змочування води на поверхні  
Крайовий кут змочування  $\theta_{1,2}$  є дотичними до міжфазних поверхонь, які обмежують краплю рідини з вершиною (В та С) на межі розділу трьох фаз (тверда, газоподібна, рідина)

Для наочності на фото показано процес оцінки досягнутої гідрофобності (рис. 6.19) з яких видно, що крайовий кут змочування модифікованого шиферу близький до максимально можливого (більше  $120^\circ$ ). Через 10 хвилин витримки крапля не розтікається і не проникає в модифікований шифер.



Рис. 6.19 Визначення ефективності радіаційно-хімічної гідрофобізації шиферу  
Зліва – крапля на модифікованому шифері (через 10 хвилин)  
Справа – крапля води на звичайному не модифікованому шифері (при нанесенні)

А на типовому шифері сформулювати краплю принципово неможливо через його пористість. Крапля відразу всмоктується всередину шиферу. Тому для числової оцінки результатів скористались іншою методикою – одночасним зануренням модифікованого і контрольного зразків шиферу у воду на певний час та їх

зважування. Фото (рис. 6.20) демонструє різницю. Зразки типового шиферу активно поглинають воду (потемніла ділянка зразка, яка занурювалась у воду), в той час як модифікований шифер воду практично не поглинає і його колір незмінний. А на графіку наведено функцію водопоглинання обох зразків.

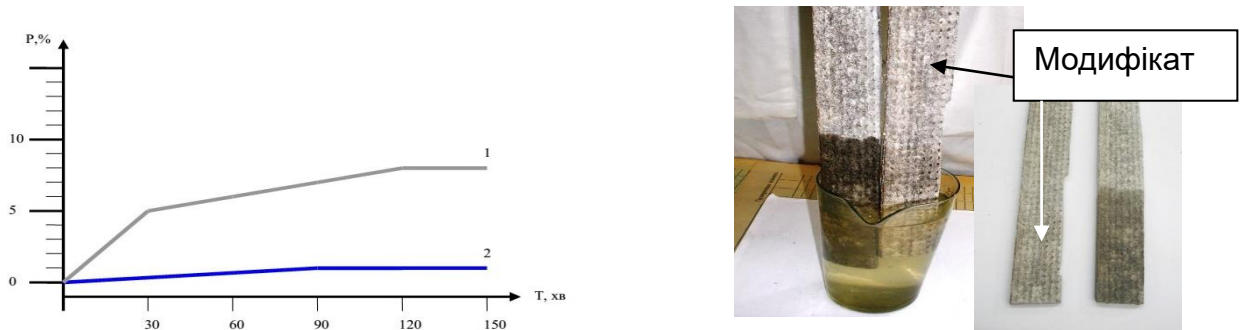


Рис. 6.20 Динаміка водопоглинання шиферу (зануренням у воду)  
1 – типовий шифер; 2 – радіаційно-модифікований шифер

На фото – оперативна оцінка водопоглинання. Модифікований зразок воду не поглинає. Видно, що вибрана нами технологія гідрофобізації забезпечує зниження водопоглинання більше ніж на порядок, причому модифікований зразок утримував вологу лише на зворотній (кошлатій) стороні листа шиферу і після підсихання цього шару – виявилась практично повна відсутність водопоглинання.

#### **6.2.1.6 Оцінка показника пружної деформації**

Зазначимо, що зазвичай шифер не характеризується пружністю і відноситься до крихких будівельних матеріалів. А його армування волокнами азбесту спрямоване лише на підвищення міцності до зламування, бо в'яжуче – цемент, такими властивостями не характеризується. Для оцінки результатів модифікації було розроблено експрес методику вимірювання цього показника.

Схема контролю за пружною деформацією наведена на рис. 6.21. Методика передбачає відгинання одного з кінців зразка, закріпленого на іншій стороні до моменту його перелому.



1 – контрольний зразок (не модифікований, легко переламується);  
2 – зразок радіаційно-модифікованого шиферу (переламати важче).

Рис. 6. 22 Випробування листового шиферу на пружну деформацію

Це здійснюється на відповідному станку з контролем максимального відхилення. З результатів видно, що перелом модифікованого зразка шиферу відбувається при деформації, що в 2 рази перевищує контрольний. Відповідно можна стверджувати, що для модифікованого шиферу цей параметр може стати одним з визначальних його характеристик. А при детальному опрацюванні технологій можна очікувати суттєвого збільшення показника пружної деформації.

#### **6.2.1.7 Висновки**

1. Проведено дослідження проблеми радіаційно-хімічної модифікації поширеного матеріалу будівельної індустрії. Отримано зразки нового композитного матеріалу, який суттєво переважає існуючі зараз види шиферу. Проведено експрес-дослідження основних характеристик отриманого матеріалу.

2. Проведений цикл досліджень показав наступне:

- Радіаційна модифікація шиферу сучасними олігомерами є перспективним напрямком виробництва нового високоякісного матеріалу цієї групи.

- Найбільше підходять для досліджуваної технології олігомери з групи силоксанів (наприклад, вінілгептаметилцикло-тетрасилоксан), але для здійснення промислової технології нового композитного органо-мінерального матеріалу необхідно уточнити їх конкретні характеристики.

- Методику поверхневої гідрофобізація можна пропонувати як перший і самостійний варіант нового композитного радіаційно-модифікованого шиферу, який

доступний для впровадження у промисловість з використанням існуючої в Україні технічної бази радіаційної обробки матеріалів;

- Радіаційно-хімічні технології об'ємної модифікації дозволяють отримати новий, перспективний і поки що маловідомий матеріал невисокої вартості та суттєво зменшити залежність індустрії від імпорту будівельних матеріалів.

3. Розроблено і випробувано радіаційну технологію отримання нового гідрофобного матеріалу шляхом модифікації типового шиферу. Нова технологія включає в себе насичення олігомерами готових виробів з шиферу та подальше їх опромінення пучком електронів 2-5 MeV.

Вибираючи цей тип мономерів дослідники виходили з припущення, що в складі шиферу є складові, одержані на основі силікатів (цемент) і силіконові модифікатори проявлятимуть високу спорідненість до шиферу. А наявність в складі модифікуючих олігомерів вінільних груп надають можливість ініціювати процес їх полімеризації за допомогою іонізуючої радіації з мінімальними затратами енергії, що не забезпечується традиційним використанням хімічних ініціаторів та високих температур.

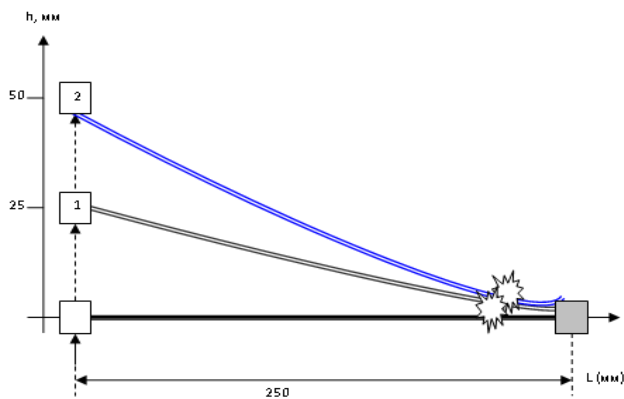
Встановлено, що лише радіаційні технології надають можливість ініціювання полімеризації в глибинних шарах матеріалу з метою заповнення пор та поліпшення адгезії між компонентами шиферу. В результаті, в поровому просторі шиферу в результаті хімічної взаємодії силіконів із мінеральними компонентами шиферу формуються органосилікатні сітки з контрольованими структурою та ступенем зшивки і відбувається кольматація пор основного матеріалу.

Це перешкоджатиме карбонізації шиферу та проникненню води, солей, кислот, основ, які спричиняють деструкцію матеріалу. Для нової технології підібрано оптимальні суміші рідких нетоксичних олігомерів, ефективні для модифікування внутрішньої структури шиферу та розроблено радіаційної технології їх тверднення в товщі матеріалу.

1. За наявною інформацією перспективними для промислового впровадження дослідженої технології є вітчизняні силіконові олігомери (силани), наприклад виробництва ВО"Кремнійполімер". Гідрофобні плівки з цих силіконових,

за даними виробника, мають підвищену адгезію до мінеральних конкрецій цементних матеріалів, еластичні при температурах від  $-50$  до  $+230^{\circ}\text{C}$ , стійкі до дії води, озону, світла, а також ряду інших атмосферних факторів (рис. 6.22 та рис. 6.23).

Завдання проектування відповідних промислових технологічних регламентів лише в тому, щоб технічно забезпечити їх введення до складу шиферу та полімеризувати у внутрішньому об'ємі виробів.



1 – контрольний зразок (не модифікований шифер); 2 – зразок радіаційно-модифікованого композиту.

Рис. 6.22 Результати випробувань покрівельних матеріалів на пружну деформацію

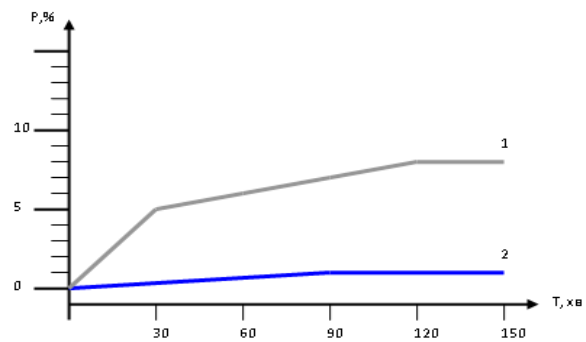


Рис. 6.23 Водопоглинання нового композитного матеріалу і основи (шиферу)

## 6.2.2 Гідрофобізація конструкційних матеріалів з дерева

Проведено випробування ефективності застосування мегавольтних електронів в технологіях модифікації виробів з дерева з метою покращення їх споживчих властивостей (стійкості до дії води, підвищення міцності, естетичного вигляду, консервації, тощо) для побутового використання та для будівельної індустрії. Випробувана проста методика радіаційно-хімічної гідрофобізації фанери, яка не має аналогів у вітчизняному виробництві [96].

Метою даних досліджень було експериментальне випробування можливостей застосування опромінювання електронами як технологічного прийому покращення характеристик конструкційних будівельних матеріалів з дерева.

Об'єктом досліджень було вибрано багат шаровий будівельний матеріал з дерева (фанеру). Вона широко використовується як основний і як допоміжний матеріал для різноманітних будівельних робіт – монтажу, оздоблення, ремонту. Фанера відноситься до групи пористих будівельних матеріалів, чутливих до вологи (гігроскопічна), вона не претендує на категорію матеріалів високої міцності, нестійка до гнилі та плісняви. Але фанера вигідно відрізняється від інших будівельних твердих матеріалів простотою обробки і монтажу, невисокою ціною, а при спеціальній обробці вона має гарний зовнішній вигляд, притаманний усім дерев'яним виробам.

Зазвичай фанеру використовують у вигляді панелей для облаштування внутрішніх приміщень в промисловості та побуті. Фактично цей матеріал можна віднести до композитних, бо в його конструкції передбачено послідовне наклеювання один на один тонких шарів деревини (шпону) з чередуванням напрямків розташування волокон дерева в різних шарах. Це забезпечує отримання рівномірного за міцністю матеріалу, не залежного від напрямку прикладення сили і фактично армованого затверділими клеями між шарами. Армування клеями надає матеріалу підвищену жорсткість і протистоїть його коробленню при нерівномірному навантаженні та підвищує міцність до розриву. Поєднання (композиція) цих двох складових забезпечила необхідні будівельникам фізичні параметри фанери та її привабливість для використання в усіх галузях виробництва та побуті. Схема композиту фанери наведена на рис. 6.24.

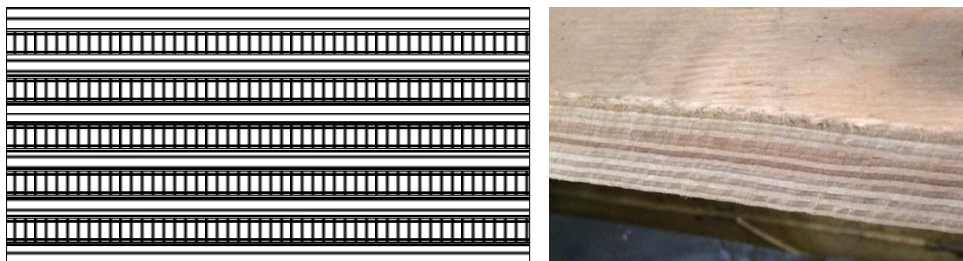


Рис. 6.24 Схема композитної конструкції плити фанери

Цей, чи не найстаріший і найпоширеніший композитний матеріал з широко доступної сировини, має лише один, але фатальний недолік – уся композиція

зберігає свої корисні властивості лише при строгому виконанні технологічних вимог її експлуатації. Фанера не переносить дії води і швидко втрачає свої конструкційні характеристики у вологій атмосфері. Для цих умов експлуатації існують спеціальні типи фанери, або з захисною плівкою на зовнішніх сторонах фанери, або склеювання здійснюють спеціальними дорогими синтетичними клеями, які не бояться води і здатні проникати в пори деревини на значні глибини. Об'єктивно вологостійкі сорти фанери мають відчутно більшу вартість, що обмежує обсяги їх використання за економічними міркуваннями. Тому пошуки шляхів покращення звичайної фанери в частині підвищення її стійкості до вологи (гідрофобізація) є актуальною проблемою для сучасної індустрії будівельних та конструкційних матеріалів.

В радіаційних технологіях давно використовуються методики радіаційно-хімічної модифікації виробів з деревини. Тривалий досвід свідчить про можливість отримувати за допомогою радіації унікальні матеріали навіть з низькосортової деревини малоцінних порід. Наприклад, паркет з неділових сортів осики після радіаційно-хімічної модифікації за своїми властивостями переважає паркет з самих твердих порід дубу за показниками стійкості до стирання, міцності, а при спеціальному тонуванні – має оригінальний естетичний вигляд [96].

Для фанери поки що таких технологій не застосовували, бо по визначенню фанера відноситься до композитних матеріалів для яких важко підібрати оптимальний рецепт модифікаторів та технологію радіаційної обробки матеріалу стандартних розмірів ( не менше 1,2м x 2,4 м ).

В СРТ досліджено і випробувано методику радіаційно-хімічної модифікації з застосуванням нових видів екологічно-безпечних мономерів на основі доступних кремнійорганічних високомолекулярних сполук (силоксанових олігомерів). Метою цих прикладних радіаційних досліджень було усунення головного недоліку фанери – втрати своїх конструкційних властивостей при попаданні води чи експлуатації у вологих умовах.

Досліджувалась технологія гідрофобізації деревини з використанням сучасних органічних матеріалів. В попередніх технологіях радіаційна модифікація деревини

здійснювалась з використанням мономерів акрилової групи, що відносяться до речовин підвищеної токсичності. Такі технології різко збільшували вартість готових виробів і знижували їх конкурентну спроможність на ринку. Цим визначається мале поширення радіаційних технологій для обробки виробів з деревини, за звичай лише для консервації виробів мистецтва, артефактів тощо.

В представлених дослідженнях для модифікації фанери вибрано нові типи кремній-органічних мономерів – олігомери, високомолекулярні водорозчинні органічні сполуки, що відносяться до групи силоксанів (силанів). Ці сполуки практично не мають токсичності і суттєво дешевші. Основним критерієм вибору був показник в'язкості. Такий вибір здійснювався з технологічних міркувань, аби спростити процес введення олігомеру в матеріал. Характеристики вибраного олігомера наведено в таблиці 6.4.

Таблиця 6.4

Характеристики олігомера

| Тип олігомера | В'язкість (20°C), сСт | Молекулярна маса, г/моль | Густина (20°C), г/см <sup>3</sup> | Поглинута доза полімеризації, кГр | G(-M) мол/100 еВ (3-5 10 <sup>2</sup> ) |
|---------------|-----------------------|--------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|---|
| ОМЦС          | 1,1                   | 296                      | 0,95                              | 25                                | (3-5 10 <sup>2</sup> )                  |

Цикл досліджень складався з 3-х етапів – вибору типів силоксанів, які найбільш придатні, опрацювання технології введення різних сумішей силоксанів в товщу фанери, вибору оптимальної технології радіаційної обробки для полімеризації олігомерів в товщі матеріалу. Далі наведено результати досліджених методик досягнення поставленої мети – гідрофобізації фанери.

*Введення силоксанів в матеріал.* Зацікавленою виробничою організацією було виготовлено два типи експериментальних зразків – габаритні для промислових випробувань та малогабаритні зразки для лабораторних досліджень (рис. 6.25). Досліджувались два метода введення силоксанів (рис. 6.26) – через поверхню зразків фанери та методом занурення її в розчини олігомерів.



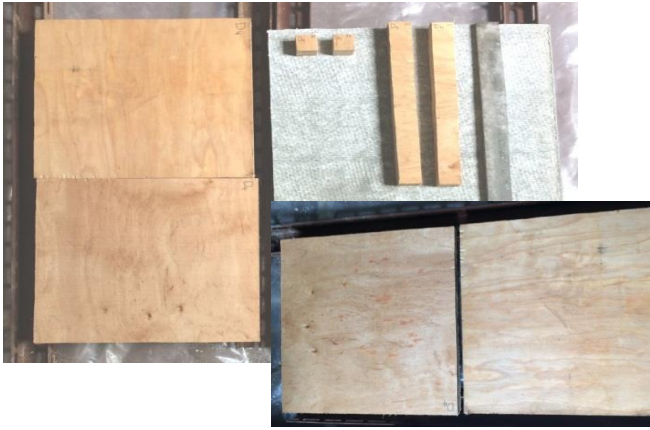


Рис. 6.26 Зразки фанери для досліджень технології радіаційно-хімічної модифікації



Рис. 6.27 Зразки, підготовлені для опромінення електронами

Перший метод перспективний для оцінки ефективності можливої модифікації конструкційних характеристик матеріалу.

Другий – для вивчення можливостей створення на основі звичайної фанери нового гідрофобного композитного матеріалів для будівельної індустрії. Нанесення розчинів олігомерів здійснювався малярними пензлями. Оброблений олігомерами зразок перед опроміненням електронами витримувався деякий час до повного поглинання нанесеного розчину (зразки ставали вологими на дотик).

Занурення зразків фанери тривало до повного витіснення повітря з внутрішніх шарів, коли припинялось виділення з занурених зразків бульбашок повітря.

*Радіаційна обробка* здійснювалась потоком електронів з енергією 4 MeV з різною щільністю пучка в діапазоні від 1 до 20 нА·см<sup>2</sup>. Була використана конвеєрна технологія опромінення (рис. 6.28).



Рис. 6.27 Радіаційна обробка зразків на конвеєрі радіаційної установки СРТ

Габаритні зразки навішувались на транспортер в типових транспортних планшетах, з матеріалу, що мінімально поглинає енергію електронів. Зразки для лабораторних досліджень опромінювались на спеціальних підвісках.

Попередні розрахунки необхідних доз поглинутого випромінювання вибирались з урахуванням результатів спеціальних досліджень ефективності полімеризації олігомерів і подальшого використання рецептур модифікуючих сумішей з максимальною радіаційною чутливістю. З точки зору радіаційної хімії – було експериментально встановлено, який з рецептів доступних і достатньо рідких модифікуючих сумішей забезпечує максимальний радіаційно-хімічний вихід ( $G_{(-M)}$ ). В таблиці 6.4 наведена встановлена експериментально поглинута доза опромінювання олігомера, при якій утворюється максимальний об'єм полімеру. В даних дослідженнях розрахунки здійснювались для поширеного промислового олігомера групи октаметилциклотетрасилоксанів. Оцінки оптимальних доз, а відповідно очікуваних технологічних і економічних показників радіаційної технології, проводилися за типовою методикою, прийнятою в радіаційній хімії: розрахунку необхідної дози поглинутого випромінювання, виходячи з бажаного результуючого модифікації деревини:

$$D_m = \frac{100N_m \Delta P}{6,24 \cdot 10^{13} G_{(-M)} (P_0 + \Delta P)} ;$$

$G_{(-M)}$  – заданий радіаційно-хімічний вихід для вибраного типу олігомера,  $m$  – молекулярна маса олігомера,  $P_0$  – початкова маса олігомера,  $\rho$  – густина олігомера, в  $г/см^3$ ,  $\Delta P$  – бажана маса отриманого полімеру, в г. За цими параметрами оцінюється необхідна  $D$  – поглинута доза іонізуючих випромінювань, кГр. Точність таких розрахунків перевірялась експериментально на дослідній партії спеціальних зразків пористих матеріалів, з переліку перспективних для розширеного застосування в будівельній індустрії. Результати показали, що потенціальні виробники модифікованої фанери можуть з похибкою не більше  $\pm 25\%$  розраховувати необхідну дозу і з урахуванням характеристик своєї радіаційної техніки оперативно оцінювати рентабельність технологічного процесу. Такі

розрахунки корисні для фахівців з технічної інженерії даної галузі (конструкторам) при розробках проектів відповідних технологічних ліній виробництва.

Режим радіаційної обробки (опромінення електронами) здійснювався з урахуванням застережень теорії радіаційної хімії щодо небажаного перевищення потужності дози опромінення вище 10 Гр·с, при яких в отриманому полімері зростає вміст коротко ланцюгових фракцій.

Контроль за радіаційним технологічним процесом здійснювався електронними засобами – штатною системою технологічної дозиметрії радіаційної установки СРТ [96, 174] та промисловими хімічними дозиметрами, закріпленими на транспортних планшетах (їх видно на рис. 6.28)

*Дослідження результатів модифікації.* Експериментально встановлено, що модифікована фанера (рис. 6.29) змінює свій колір (відтінок).

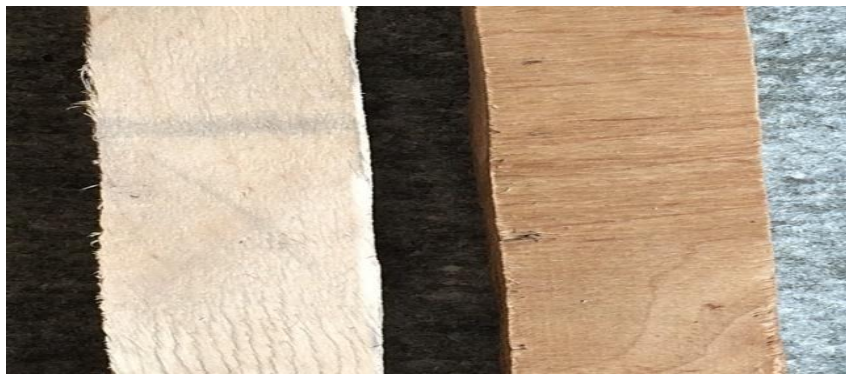


Рис. 6.29 Зовнішній вигляд зразка модифікованої фанери (справа)  
Зліва – контрольний зразок зі звичайної фанери

Фотографії свідчать про зміну відбиваючих властивостей поверхні модифікату. Це відбувається внаслідок утворення на поверхні модифікованої фанери плівки полімеру, яка вирівняла поверхню зразка і одночасно підкреслила текстуру деревини. Проведені експерименти свідчать про можливість даної радіаційної технології одночасно з гідрофобізацією надавати виробам привабливого естетичного вигляду, а також формувати різні відтінки деревини з імітацією цінних порід.

*Дослідження ефективності гідрофобізації.* Ці дослідження здійснювались за різноманітними методиками – шляхом прямого вимірювання об'єму поглиненої

вологи зважуванням після занурення зразків у воду та з використанням методу крапель, відомого як найбільш оперативного методу контролю гідрофобності за показниками крайового кута змочування. Останній найбільш наглядний (рис. 6.30).

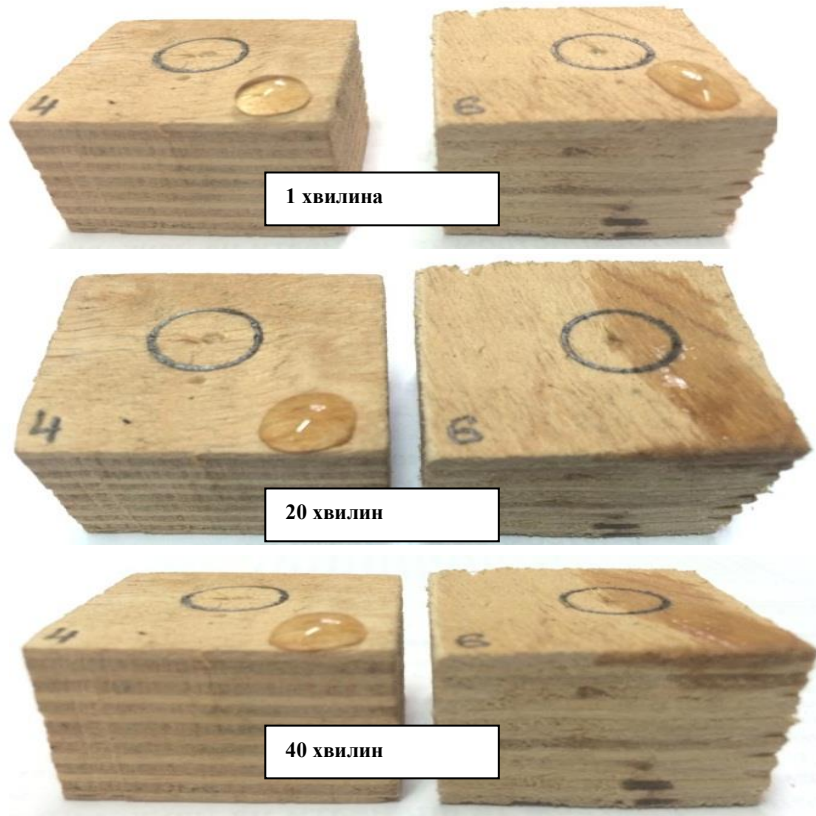


Рис. 6.30 Метод крапель, застосований для оцінки гідрофобності модифікованої (зліва) і звичайної (немодифікованої) фанери (справа)

Наведені фото відображають динаміку проникнення води в матеріал впродовж кожних 20 хвилин. Крапля наносилася на модифікований і контрольний (не модифікований) зразки та велися спостереження впродовж 1 години. Видно стійку тенденцію розтікання краплі на поверхні контрольного зразка і поступове її проникання у внутрішні шари матеріалу. В кінці планового терміну спостереження (через 1 годину) вода повністю проникла у внутрішні шари і вже ніяких нових змін в контрольному зразку не відбулося. А на поверхні зразка модифікованої фанери через 1 годину крапля не залишила ніякого сліду. Через деякий час крапля просто випарувалася, не залишивши і сліду.

В цих вимірюваннях передбачалось встановити найбільш ефективний метод внесення олігомерів та визначити саму вразливу поверхню модифікованого зразка.

На рис. 6.31 наведено фото випробувань (за такою ж методикою) ефективності гідрофобізації при різних способах нанесення олігомера.

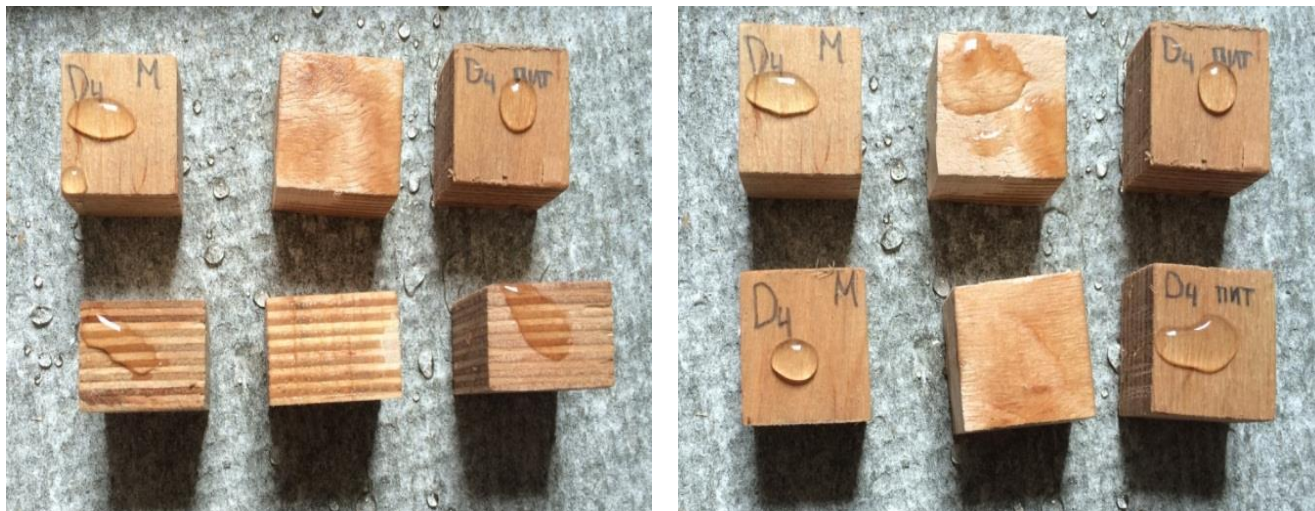


Рис. 6.31 Випробування на гідрофобність зразків модифікованої фанери при різних способах введення силоксанів

На обох фотографіях середній ряд – це контрольні зразки з немодифікованої фанери. Зліва і справа – модифіковані. Зліва модифікати після занурення в розчини силоксанів. Модифікати справа – силоксани, нанесені пензлем до насичення. Для визначення ефекту використано метод крапель. Краплі наносилися і на лицеві і на бокові грані зразків.

На контрольних зразках вже через 10 хвилин крапля води практично повністю поглинулася деревиною фанери. В зразках, модифікованих при будь-яких технологіях введення олігомерів, вода практично не проникає з будь-якої сторони та через зрізи. Відмінність лише у відтінку. Зразки, модифіковані після занурення в розчини силоксанів змінюють відтінок і стають темнішими. Це можна пояснити, зсувом спектру відбитого світла, бо верхній шар полімеру виступає фільтром для світла, відбитого нижніми шарами модифікованого матеріалу.

Для обґрунтування такого висновку були проведені дослідження гідрофобності зразків різної геометрії. На рис. 6.32 показані фото випробуваних зразків.

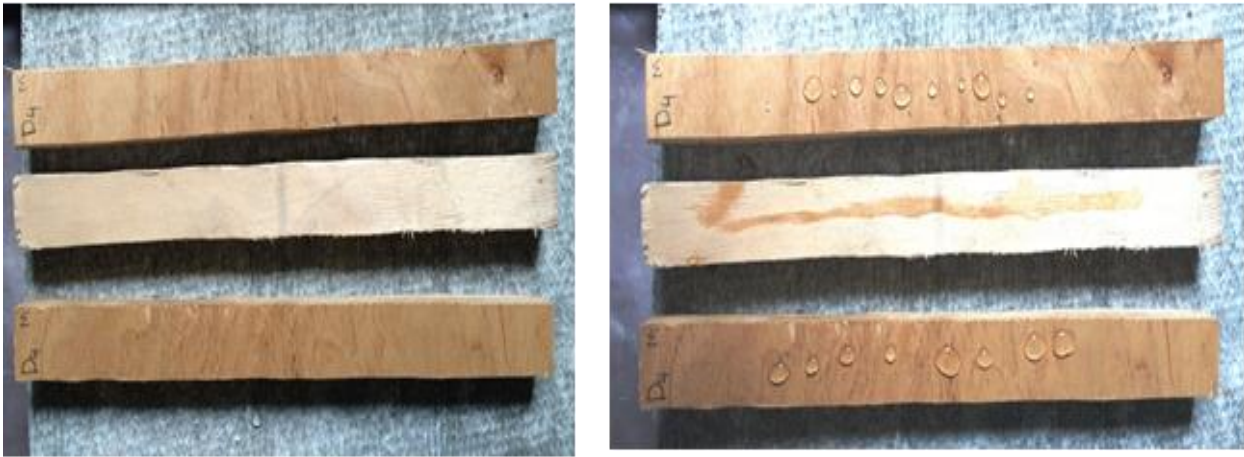


Рис. 6. 32 Перевірка гідрофобності зразків фанери різної геометрії

Зліва – зразки підготовлені для випробувань ефективності гідрофобізації

Середній зразок на лівому фото – контрольний зі звичайної фанери. Видно, що модифікована фанера різко відрізняється кольором від контрольної. Причому, нижній, насичений методом занурення в розчин олігомера, має більш контрастний відтінок. На правому фото – результати через 20 хвилин після нанесення крапель води на поверхню цих зразків. На контрольному зразку краплі води повністю поглинулися порами деревини фанери. На двох модифікованих – краплі не змінюють форми (крайовий кут змочування залишився без змін) що свідчить про гідрофобність модифікованої фанери.

В продовження цих експериментів випробувані великорозмірні зразки фанери, призначені для подальших промислових випробувань. Результати відображено на рис. 6.33. Зліва на фото контрольний зразок, середній і правий – модифікована фанера з різними методами нанесення олігомерів. Власне цим визначається деяка різниця відтінків цих двох зразків модифікату фанери.



Рис. 6.33 Контроль гідрофобності зразків модифікованої фанери для промислових випробувань

На фото наведено результати трансформації крапель води через 1 годину після нанесення їх на поверхню зразків. На фото ці місця обведено. Як і на лабораторних зразках динаміка крапель води свідчить про ефективну гідрофобізацію. На контрольному зразку вода проникла в глибинні шари фанери. На модифікованих – залишилась без змін, а через деякий проміжок часу висохла не залишивши сліду на поверхні зразка. Ці дослідження показують, що технології радіаційно-хімічної гідрофобізації фанери не залежать від геометрії чи розмірів виробів і можуть бути запропоновані для промислового використання.

Але необхідно отримати інформацію про поведінку фанери в вологих умовах експлуатації. Для цього скористалися методиками прискорених випробувань – помістили зразки фанери на тривалий час (тут – 3 години) в кювету з водою. Результати тривалого перебування зразків у воді ілюструє фото на рис. 6. 34.



Рис. 6.34 Оцінка експлуатаційних можливостей модифікованої (4) і звичайної (6) фанери в умовах інтенсивної дії вологи

На фото рис. 6.34 в кюветі два зразки – модифікат (4) та звичайна фанера (6). Для лаконічності наведено знімок через 3 години після занурення, бо динаміка вологи вже була наведена в дослідженнях методом крапель і проілюстрована на рис. 6. 32. У цьому експерименті глибина занурення обох зразків різна. Звичайна фанера легша за воду і занурена лише частково. Над поверхнею води залишається 4-5 шарів композиції. Для модифіката характерним є більше занурення, хоча сам зразок теж не тоне. Над поверхнею води залишається 2-3 шари композиції. Це свідчить, що питома вага модифіката зростає і стає більшою за звичайну фанеру. Це зрозуміло, бо полімер, що утворився в тілі модифікованої фанери, має питому вагу трохи більшу за воду (наведено в таблиці 6.4). При повному насиченні зразка

олігомером і після його радіаційно стимульованого твердіння, зразок повинен був повністю зануритися у воду. А той факт, що модифікат все-таки зберігає здатність плавати свідчить, що олігомер не повністю заповнив мікропори матеріалу і там частково залишилось повітря. Про це свідчать і бульбашки, які оточують лінію водорозділу. І це характерно для обох випробуваних методів внесення олігомерів. Тому для удосконалення методів введення олігомерів слід шукати більш складні методи та технічні засоби. Але лише у випадку, коли за технічними показниками це буде необхідно. В нашому ж випадку метою є гідрофобізація фанери і така мета досягнута, про що свідчать дані фото.

*Гідрофобізація.* З фото видно, що контрольний зразок зі звичайної фанери повністю промок і непридатний для свого використання. В той же час, модифікат практично не змінив своїх параметрів при такому тривалому впливу вологи. Його поверхня світла – там відсутня волога. Глибина занурення не змінюється. А зважування обох зразків після перебування у воді показали, що модифікат прийняв вологи в 16 разів менше, ніж зразок зі звичайної фанери. Це дає підставу стверджувати про досягнення мети – створено і експериментально підтверджена ефективність радіаційно-хімічного методу гідрофобізації цього надзвичайно пористого і нестійкого до впливу води конструкційного матеріалу.

*Дослідження впливу радіаційної модифікації на конструкційні властивості фанери.* При розробці технології важливо було пересвідчитися, що процес гідрофобізації не приніс шкоди іншим характеристикам фанери як конструкційного матеріалу. Насамперед, чи не знижується несуча здатність конструкцій з радіаційно-модифікованої фанери, чи не відбулось погіршення еластичності виробів та протистояння конструкцій з модифікатів місцевим навантаженням.

З цією метою були проведені дослідження міцності модифікатів і їх здатності протистояння переламуванню та розтріскуванню в точках з підвищеним тиском (місцевим навантаженням в місцях кріплення на реальних конструкціях).

Дослідження стійкості модифікату (межі міцності при згинанні) здійснювалось за схемою, наведеною на рис. 6.35.



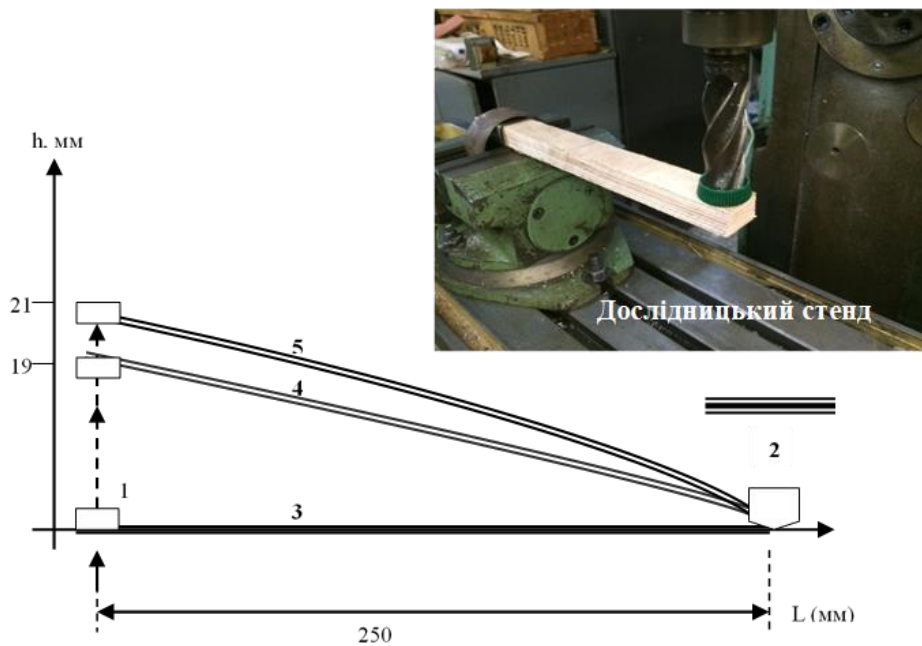


Рис. 6. 35 Схема досліджень міцності радіаційно модифікованої фанери

Такі дослідження фактично є попередніми лабораторними випробуванням. Для них виготовлені спеціальні зразки модифікованої фанери з розмірами 23мм x 25мм x 250мм.

Результати встановлювались методами порівняння висоти підйому предметного стола (1) до якого жорстко закріплено один кінець зразка. Його другий кінець спирається на нерухому опору (2). Предметний стіл рухається у вертикальному напрямку до моменту перелому зразка. Порівнюючи такі випробування для зразків зі звичайної опори і зразків з модифікованої отримуємо об'єктивну відповідь на запитання, чи не погіршився цей конструкційний параметр.

Такий стенд організовано на основі промислового станка 2 класу, який дозволяє з високою точністю контролювати переміщення і положення предметного столу. Результати наведено на графіку. Було встановлено, що межа міцності зразків зі звичайної фанери, визначена як положення перелому зразка при згинанні, становить 19 мм. А після гідрофобізації цей показник покращився і становить вже 21 мм. Таким чином було показано, що процес модифікації не погіршує конструкційних характеристик фанери, а навпаки, дещо покращує стійкість матеріалу, а відповідно і конструкцій з нього до переломів при згинанні. Очевидно це є наслідком створення в процесі гідрофобізації приповерхневого шару з більш

складного композиту – до дерева та клеїв, додається помітний шар полімеру. Така конструкція працює як балка і підвищує результуючу міцність зразка з цього нового удосконаленого (дерево-полімер) композиту.

Такий висновок можна зробити з огляду характеру переломів в зразках з модифікатів та зразків зі звичайної фанери. На фото рис. 6.36 показано хід експериментів і фотографії переломів матеріалу.



Рис. 6.36 Фотографії переломів при дослідженнях межі міцності при згинанні

Як видно з верхнього знімка матеріал не втратив своєї еластичності, а тому може і надалі використовуватися для побудови різних конструкцій. З цього можна зробити висновок, що радіаційна гідрофобізація не приносить шкоди механічним характеристикам фанери.

Показовим є характер зломів: на фото посередині – злом контрольного зразка зі звичайної фанери, на нижньому – злом зразків з модифікату. Звичайна фанера, як і очікувалось, зламається з утворення численних розпушених волокон шпону і характеризується великою площею руйнування матеріалу.

Модифікат переламується як тверде однорідне тіло, незалежно від напрямку прикладної сили. На нижньому фото справа – вигляд області перелому при згинанні в перпендикулярному (поперечному) напрямку. Це підтверджує висновок, що в шарах, прилеглих до поверхні зразку модифіката, утворюється полімер з розгалуженою структурою і зв'язаний («пришитий») з волокнами деревини. Така

композиція забезпечує ефект мікроармування полімеру, чим і визначається більша міцність модифікату. Тут проявляється синергетичний ефект радіаційних технологій, який крім функцій гідрофобності одночасно забезпечує вигідну модифікацію усієї структури (і властивостей) нового матеріалу.

Встановлення реальної щільності фанери до і після радіаційної гідрофобізації досліджувалось на лабораторних зразках за схемою, наведеною на рис. 6.37.

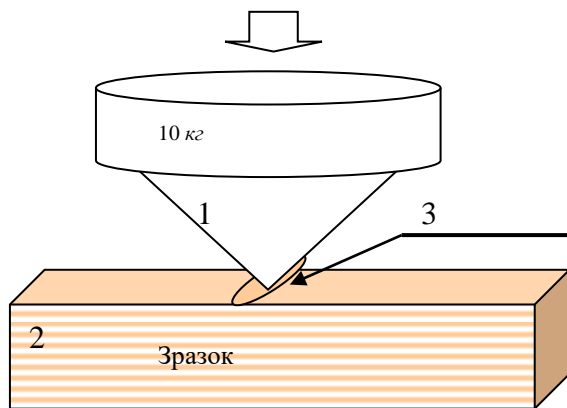


Рис. 6.37 Схема вимірювання щільності



Рис. 6.38 Фото відбитків конуса  $45^{\circ}$  з навантаженням 10 кг на поверхні зразків радіаційно модифікованої (4) і звичайної (6) фанери

Показником опору матеріалу був переріз відбитку (3) на поверхні дослідного зразка (2) від металевого конуса  $45^{\circ}$  вагою 10кг (1) в результаті його заглиблення в товщу матеріалу. Отримані результати наведено на рис. 6.38.

Цей показник також контролювався шляхом порівняння з контрольними зразками зі стандартної фанери. З метою отримання коректної інформації про динаміку показника опору матеріалу на заглиблення конуса стандартної ваги (фактично – щільності), навколо місця заглиблення вістря конуса на поверхні зразків нанесено калібрувальні кола однакового діаметру, що дозволяє оперативно аналізувати мікрофотографії відбитків. Наведені фото дозволяють зробити висновок, що в результаті радіаційної гідрофобізації, опір модифікату на заглиблення конуса не погіршився. Відповідно подальше застосування гідрофобізованої фанери не буде вимагати додаткового удосконалення звичних будівельникам і тривалий час опрацьованих ними технологій використання фанери.

*Основні результати.* Проведено дослідження перспектив застосування радіаційних технологій для модифікації фанери з метою підвищення її стійкості до вологи та несприятливих умов експлуатації.

Показано, що досягти поставленої мети можна шляхом насичення шарів фанери рідкими олігомерами та подальшою радіаційно-стимульованою полімеризацією олігомерів безпосередньо в товщі опромінюваного матеріалу.

Вперше в практиці радіаційної модифікації деревини замість традиційних екологічно небезпечних акрилових мономерів використовуються нові матеріали - кремній-органічні олігомери, безпечні для людей та екології.

Запропоновано і експериментально випробувано технологію гідрофобізації цього пористого матеріалу. Показано, що запропонована технологія в 16 разів підвищує стійкість фанери до поглинання води, зростає міцність матеріалу, покращується зовнішній естетичний вигляд.

Вперше випробувано і опрацьовано усі стадії радіаційно-хімічної модифікації композитного матеріалу з деревини (фанери). Встановлено оптимальні режими опромінення електронами 4 МеВ промислової фанери.

### **6.2.3 Дослідження можливості використання енергії випромінювань для виробництва термостійкого асфальту підвищеної міцності**

Завданням було дослідження та визначення економічно вигідних фізичних факторів, здатних збільшувати хімічну активність поверхні полімерних матеріалів з метою покращення адгезії та спорідненості з бітумом при утворенні різноманітних композицій (сумішей) дорожнього покриття.

Досліджено ефективність залучення енергії іонізуючих випромінювань для виробництва термостійкого асфальту підвищеної міцності. Розроблено і випробувано можливість радіаційно-хімічної модифікації асфальту (асфальтобетону) мономерами акрилової групи.

Вперше такий матеріал для дорожнього покриття було отримано на радіаційній установці ІЯД НАН України [96] шляхом модифікації традиційної асфальтної суміші акриловими мономерами. За допомогою радіаційної технології

було отримано оригінальний гідрофобний матеріал (радіаційно-модифікований асфальт (асфальтобетон) для дорожнього покриття, придатний до застосування в широкому діапазоні температур (рис. 6. 39). Цей матеріал має унікальні властивості композитів – одночасно є вологонепроникним і термостійким.



Рис. 6.39 Радіаційно-модифікований асфальт

На рис. 6.40 наведено результати досліджень водопоглинання звичайного (верхній зразок) асфальтобетону та модифікованого (нижній зразок) відходами фіброматеріалів та акриловими мономерами шляхом опромінення електронами.

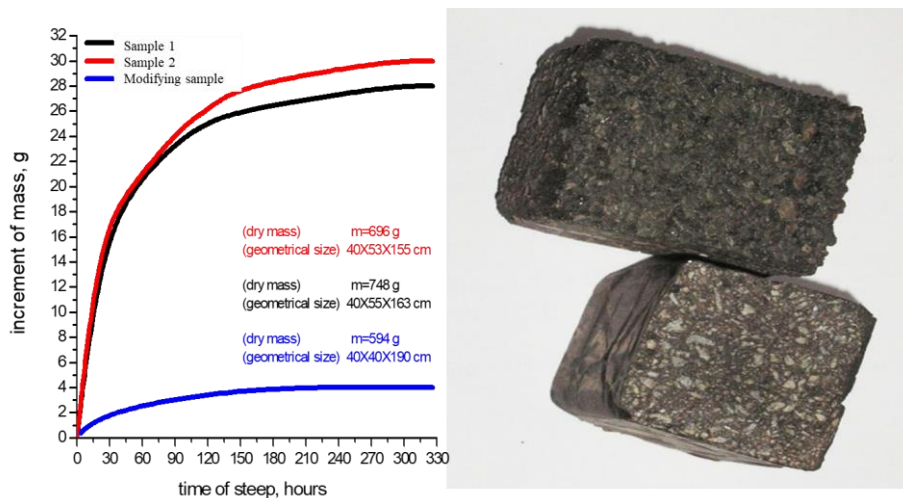


Рис. 6.40 Водопоглинення звичайного асфальту (верхні графіки і радіаційно-модифікованого відходами фіброматеріалів і акриловими мономерами (нижній)

Два верхніх графіки – 2 зразки двох марок поширеного промислового асфальту, на нижньому – радіаційно-модифікований. Високі показники модифікату є результатом ініційованих електронами процесів радіаційно-хімічного зшивання бітуму з мінеральними складовими та відходами фіброматеріалів [96] (міцність), додаткової об'ємної полімеризації органічного зв'язуючого (морозостійкість).

Використання хімічно активних акрилових мономерів забезпечує підвищену адгезію модифікату до усіх будівельних матеріалів (щільність і мінімальне водопоглинання).

Технологічні особливості – опромінення повинно здійснюватися безпосередньо при укладці асфальту в полотно дороги, що створює проблеми його швидкого впровадження.

Як альтернативу розроблено технологію отримання термостійкого асфальту без застосування мономерів. Було вперше досліджено технологію виготовлення асфальту шляхом попередньої радіаційної модифікації основного природного зв'язуючого асфальтної суміші (бітуму) активованими гранульованими полімерними відходами (вторинними полімерами) і подальшого виготовлення асфальтної суміші з такою бітум-полімерною композицією.

Іонізуючі випромінювання залучено до вирішення основної проблеми реалізації такої технології – подолання хімічної нейтральності вторинних полімерів, яка перешкоджає утворювати з бітумом монолітну масу модифікату.

Попередні пошукові дослідження показали, що активацію поверхні гранульованих полімерних відходів можна здійснювати шляхом радіаційної обробки опромінюванням гама-променями, мегавольтними електронами чи іонами низьких і наднизьких енергій. В результаті на поверхні утворюються хімічно-активні центри, що сприяють утворенню хімічних зв'язків полімеру з бітумом. Опроміненими гранулами модифікують бітум – в'язучий компонент асфальту. Далі отриманий модифікат вносять до асфальту звичайним способом вже на підприємстві з виробництва асфальту або на будівельному майданчику. Така технологія (рис. 6.41) дозволяє використати величезні маси відпрацьованих полімерних виробів для покращення якості доріг, а радіаційний процес винести за межі виробництва асфальту і здійснювати його на спеціалізованому підприємстві лише для генерування на поверхні вторинних полімерів хімічно-активних центрів за механізмами радіаційно-стимульованої деструкції.

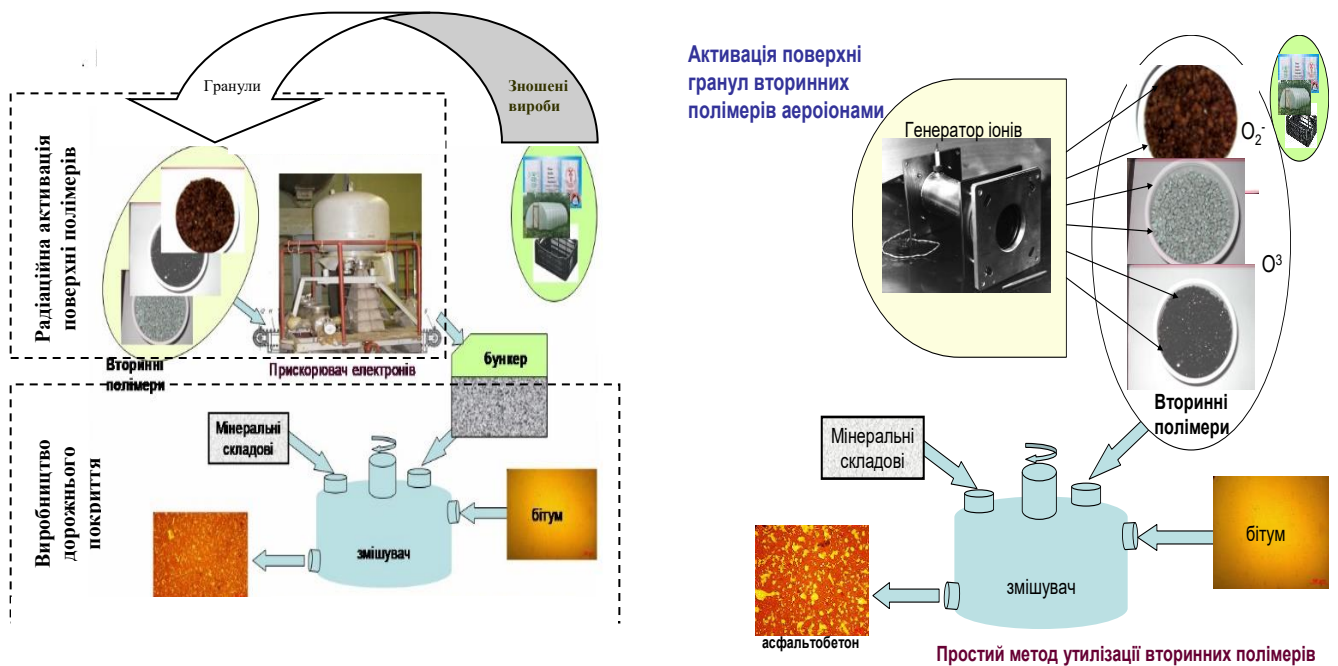


Рис. 6.41 Два досліджених і випробуваних варіанта радіаційної модифікації бітуму вторинними полімерами (відходами) [218-221]  
Справа – за допомогою опромінення аеріонами. Зліва – прискореним електронами

Експериментально встановлено, що електрони та аеріони, хоча і з різною ефективністю, здатні збільшити хімічну активність поверхні полімерів, їх адгезію та спорідненість з бітумом для подальшого формування термостійких і міцних бітум-полімерних композицій (сумішей) для виготовлення дорожнього покриття. На рис. 6.41 показано технологічну схему, що є розробленою та випробуваною для виробництва дорожнього покриття, модифікованого радіаційно-стимульованою композицією бітуму з гранульованими вторинними полімерами з виростанням іонізуючих випромінювань та аеріонів.

Розроблені варіанти цієї радіаційної технології дозволяють отримувати в'язкий композит при мінімальних додаткових витратах, Радіаційний метод є екологічно безпечним, не вимагає технічного доукомплектування діючих підприємств-виробників та одночасно вирішує дві актуальні проблеми – утилізація вторинної сировини та створення інноваційного технологічного напрямку виготовлення міцного дорожнього покриття.

## 6.2.4 Висновки

Метою даних досліджень було теоретичне і експериментальне встановлення основних закономірностей і моделей процесів, де іонізуюче випромінювання може виступати як технологічний інструмент виробництва твердих композитних конструкційних матеріалів широкого вжитку. Актуальність роботи визначається потребами реального сектору виробництва як одного з актуальних напрямків прискореного прогресу вітчизняної економіки.

Враховуючи великий попередній позитивний досвід і унікальні можливості іонізуючої радіації модифікувати атоми можна очікувати, що цей напрямок є перспективним для швидкого впровадження у виробництво.

Встановлена здатність впливати на структуру і енергетичний стан високомолекулярних органічних сполук групи твердих полімерних матеріалів, які відносяться до переліку надзвичайно стабільних і хімічно нейтральних матеріалів, для яких існують проблеми утилізації (для такої синтетики в природі немає механізмів їх деструкції і утилізації).

Підтверджено припущення про можливість застосування цих ефектів в промислових технологіях утилізації зношених полімерних виробів та відходів їх виробництва.



## ПРАКТИЧНІ РЕЗУЛЬТАТИ ДИСЕРТАЦІЇ

Вирішено науково-технічну проблему використання іонізуючих випромінювань та модернізації ядерно-фізичних установок ІЯД НАН України для створення наукових основ розвитку новітніх радіаційних технологій в різних галузях промисловості.

1. Досліджено і визначено перспективні напрямки використання ядерної енергії для технологічного розвитку. Такими є:

- Виробництво покращених матеріалів для будівельної індустрії;
- Виробництво продуктів харчування;
- Знешкодження патогенної мікрофлори;
- Функціональні випробування і сертифікація техніки об'єктів критичної інфраструктури шляхом імітації комплексних факторів дії ядерної енергії;
- Підвищення ефективності медичних матеріалів;
- Створення високоефективних технологій промислового виробництва з залученням заряджених частинок низької та наднизької енергії.

2. Розроблено шляхи удосконалення дослідницької електрофізичної радіаційної техніки ІЯД НАНУ з метою використання в прикладних дослідженнях.

В їх переліку:

- Установа для досліджень з інтенсивними пучками електронів низьких енергій;
- Установки з генераторами іонів низької та наднизької енергії для досліджень методів застосування енергії заряджених частинок до реального виробництва;
- Модернізація діючої техніки з метою розширення діапазону і спектру генерованих випромінювань.

3. Розроблено та експериментально доведено ефективність багатоцільових технічних комплексів імітації діючих факторів ядерної енергії як перспективного шляху вирішення актуальних завдань економічного розвитку з залученням унікальних науково-дослідних установок і радіаційної техніки ІЯД НАН України.

4. Створено низку спеціальних технічних засобів для адаптації радіаційних установок ІЯД для прикладних досліджень і розробок, в тому числі придатних до експлуатації в інтенсивних радіаційних полях. До них належать:

- Багатофункціональна транспортна система з прецизійними характеристиками для подачі, переміщення та маніпуляції зразків в зону радіаційної обробки;
- Електропровідні з дистанційним керуванням підпучкові засоби механізації і автоматизації експериментів;
- Оригінальні засоби радіаційних вимірювань інтенсивних змішаних радіаційних полів та удосконалена система технологічної дозиметрії;
- Засоби і системи внутрішнього протирадіаційного захисту;
- Засоби і спектрометрична техніка для вимірювань параметрів потоків іонів низьких енергій;
- Засоби та прилади технологічного контролю за результатами опромінювання матеріалів.

5. Розроблено:

- Методи прикладного використання радіаційної техніки ІЯД для завдань сучасної промисловості та іонні інноваційні радіаційні технології виробництва харчових продуктів, що не мають аналогів у світі;
- Технології органо-мінеральних радіаційно-модифікованих цементуючих систем та радіаційно-модифікованого полімер-бетону;
- Радіаційні технології покращення експлуатаційних характеристик пористих матеріалів;
- Новий оригінальний гідрофобний покрівельний матеріал для будівельної індустрії;
- Радіаційні технології підвищення ефективності медичних розчинів;
- Радіаційні технології функціональних випробувань обладнання, критичного для експлуатації АЕС.

6. Розроблено проекти інноваційних технологій з використанням ядерної енергії для різних галузей промисловості.

## ВИСНОВКИ

1. Визначено перелік і встановлено вимоги до фізичних параметрів, які необхідно забезпечити за допомогою технічних засобів на сучасному етапі розвитку радіаційних технологій. Для фізичних досліджень – випромінювання  $e^-$ ,  $\gamma$ ,  $W_{e^-}$ -const. з мінімальною шириною енергетичного спектру та з максимально можливим діапазоном регулювання інтенсивності. Для прикладних досліджень – випромінювання  $e^-$ ,  $\gamma$ ,  $\alpha$ ,  $n$ ,  $e$  ( $W < 10 \text{ MeV}$ ) з обмеженим діапазоном регулювання інтенсивності відкриває можливості отримання потоків радіації великого перерізу.

2. Досліджено методи використання енергії випромінювань для вирішення екологічних проблем. Встановлено необхідність удосконалення підпучкової техніки реакційної камери експериментальної установки. З цією метою створено додаткові засоби механізації та автоматизації експериментів. Їх призначення – дистанційна маніпуляція зразками різних промислових відходів і матеріалів, переміщення датчиків радіаційних і технічних параметрів, у тому числі в процесі опромінювання.

3. Вивчено можливості удосконалення радіаційної техніки до потреб будівельної індустрії. Встановлено, що необхідно опромінювати габаритні важкі матеріали та вироби. З цією метою для установки створено оригінальну прецизійну технологічну лінію з операційним конвеєром, яка складається з механічних і електронних елементів, засобів захисту, контролю переміщення, індикаторів стану, логіки керування, засобів місцевого та централізованого управління через канали зв'язку з пультом установки. Модернізація забезпечує високу стабільність переміщення матеріалу та стабільність поглинутої дози опромінювання та можливість маніпуляції дослідними зразками, в тому числі під пучком.

4. Досліджено проблеми формування радіаційних полів великого перерізу, необхідних для подальшого прогресу функціональних випробувань і сертифікації критичного обладнання в ядерній енергетиці. Встановлено, що основною проблемою таких технологічних процесів є отримання рівномірних радіаційних полів (чистих та змішаних) великих розмірів, для розміщення там габаритних зразків чи обладнання і забезпечення рівномірного розподілу поглинутої енергії

електронів по об'єму опромінюваного об'єкту, що можна вирішувати шляхом трансформації емітансу виведеного пучка електронів системою розсіювальних і відбиваючих екранів.

5. Експериментально досліджено ефективність трансформації емітансу, специфіку роботи елементів системи, їх можливі конструкції, розроблено оперативні методики розрахунків та технічні засоби контролю. Така система трансформації надала можливість сформувати «чисте» радіаційне поле електронів з нерівномірністю менше 15% і об'ємом  $0,8 \text{ м} \times 0,8 \text{ м} \times 0,8 \text{ м}$  та змішане гама-електронне поле з нерівномірністю менше 20%. Створена система дозволяє формувати радіаційні поля у великих об'ємах до  $1 \text{ м}^3$ , в тому числі «чистих» полів з мегавольтних електронів, а з використанням гальмівних мішеней – полів фотонів гальмівного випромінювання.

6. Модернізовано радіаційну установку ІЯД НАН України та отримано можливість проведення кваліфікаційних випробувань елементів ядерних енергоустановок, габаритними розмірами до  $0,8 \text{ м} \times 0,8 \text{ м} \times 0,8 \text{ м}$  (типу М76341) систем аварійного газовідведення та захисту. Описано проведену модернізацію радіаційної техніки для цільових програм використання ядерної енергії.

7. Встановлено, що в конфігурації радіаційної установки відсутні технічні можливості досліджень взаємодії радіації з промисловими матеріалами і виробами в діапазоні енергій 0,1-0,5 МеВ. Створено додаткове інтенсивне джерело електронів енергією 0,4-0,5МеВ. Вибрано варіант використання прискорювача електронів прямої дії 0,5 МеВ/20-30 кВт, який складається з джерела високої напруги 500 кВ, генератора-інжектора електронів, блоку прискорення, системи випуску пучка в атмосферу через титанову фольгу 20 мкм. Вузли установки охоплено системою управління через центральний пульт. Основні елементи нової установки змонтовано в спеціально підготовлених приміщеннях, в тому числі з протирадіаційним захистом, для розташування прискорювача та створено технічний комплекс для прикладних досліджень з електронами та фотонами пікометрового діапазону електромагнітних хвиль.

8. Встановлено, що перспективним для подовження термінів зберігання харчових продуктів є використання потоків аероіонів, іонів газів атмосфери невисокої енергії до 50 кеВ з концентраціями понад  $10^7$  іон/см<sup>3</sup>. Розроблено електрофізичну експериментальну установку, здатну опромінювати матеріали, сировину та харчові продукти іонами відносно невисоких енергій. Встановлено перелік матеріалів, здатних до модифікації іонами їх фізичної структури та хімічного складу – органічні матеріали штучного (полімери) і природного (харчова сировина) походження. Розроблено низку прискорених енергоефективних харчових технологій в'ялення риби.

9. Досліджено процеси генерації аероіонів в робочих камерах іонних електрофізичних установок. Встановлено особливості динаміки їх прискорення та формування направлених потоків аероіонів. Експериментально підтверджено, що конструювання іонних генераторів на принципах прискорювачів заряджених частинок прямої дії є дієвим методом отримання концентрованих потоків аероіонів.

10. Встановлено, що при опроміненні іонами, в результаті активації тепломасових процесів, відбувається інтенсивне видалення вологи із сировини та перебудова фізичної структури органічної речовини. В присутності аероіонів темпи втрати маси майже вдвічі вищі, ніж при висушуванні такого ж зразка на тій же установці, але з виключеним генератором іонів. Встановлено, що динаміка процесу залежить від концентрації іонів і складу сировини. Процеси зневоднення нелінійні та суттєво залежать від вмісту ліпідів у харчовій сировині. В аероіонних технологіях досягається висока ефективність – скорочуються терміни приготування, зменшується енергоспоживання, подовжуються терміни зберігання харчових продуктів.

11. Випробувано нові методики радіаційних технологій для дослідження функціональності критичного обладнання АЕС, технології наноматеріалів для промисловості та медицини, можливості ядерних і радіаційних методів в технологіях матеріалів для промисловості та інші перспективні методи промислового використання ядерної енергії, що ґрунтуються на ефектах дії на

зовнішні оболонкові структури атомів з метою керування радикальним механізмом модифікації матеріалів.

12. Розроблено імітатори як перспективний напрямок прикладних досліджень з використанням ядерної енергії. Розроблено варіант імітатора на одному електрофізичному джерелі випромінювання. При утворенні цього імітатора розширено діапазон регулювання інтенсивності пучка, створено засоби конверсії енергії електронів у інші види випромінювань, засоби формування конфігурації і складу радіаційних полів (чистих та змішаних), розроблено засоби забезпечення життєдіяльності дослідних біологічних об'єктів, засоби метрології експериментальних робіт, необхідні засоби місцевого протирадіаційного захисту тощо. Проведено дослідження характеристик і можливостей імітатора. Вперше здійснено оригінальну методику передачі енергії випромінювання до віддалених об'єктів через проміжні реакції з гідролізатами для лікування складних радіаційно-термічних опікових ран.

13. Досліджено ефективність імітатору складної структури для технологічних умов виробництва термостійких ядерних фільтрів, утвореного на базі двох електрофізичних установок – 120-сантиметрового дейтронного циклотрона 12 МеВ та лінійного прискорювача електронів 4 МеВ. Встановлено, що така структура імітатора забезпечує можливість розробки та випробування технологій з використанням легких іонів та фотонів мегавольтних енергій.

14. Досліджено оригінальну трекову технологію термостійких ядерних фільтрів (мембран) підвищеної міцності та інших нанопористих полімерних матеріалів для різних галузей виробництва, яка дозволяє отримувати міцні мембрани завтовшки до 100 мкм, що є недоступними традиційним технологіям.

15. Досліджено й експериментально випробувано шляхи залучення інших діючих ядерно-фізичних установок до функціонального випробування та сертифікації, критичного обладнання АЕС. Встановлено, що це забезпечить підвищення точності експертних висновків і урахування функціональності комплектуючих матеріалів.

16. Досліджено можливості радіаційних технологій для харчової галузі. Встановлено, що пікохвильова обробка, а саме опромінення гама-променями до 5 MeV або електронами до 10 MeV, повністю знищує всю мікрофлору, тобто виключає мікробіологічне псування харчових продуктів при зберіганні та необхідність застосування синтетичних консервантів, і є енергоощадною й прискореною альтернативою теплової чи хімічної стерилізації.

17. Експериментально встановлено, що в харчових пікохвильових технологіях енергію електронів 4 MeV доцільно вважати граничною. При опроміненні електронами повинна бути обмежена потужність дози на рівні 0,02 кГр/с. Встановлено, що в такому режимі електронної обробки поглинутими дозами 2-3 кГр найбільш виразно проявляється іонізаційний механізм знешкодження мікрофлори та селективність дії радіації на мікроорганізми та не змінюється біологічна цінність харчового продукту, тобто такий режим опромінювання не впливає на температуру продукту і не відбуваються небажані зміни його хімічного складу.

18. Експериментально доведено високу економічність пікохвильової обробки харчових продуктів потоками електронів з енергіями 2-4 MeV – енерговитрати процесу складають 10 Вт·кг продукції.

19. Встановлено, що вирішальним супутнім фактором опромінення харчових продуктів є радіоліз води, що входить до їх складу, тому режим опромінювання повинен враховувати динаміку процесів радіолізу, які не становлять ніяких токсичних проблем, але можуть впливати на фізичні властивості (колір, щільність, запах) та смакові показники продуктів («електронний» присмак).

20. Для пікохвильової технології морської нерибної сировини з неоднорідною структурою м'язових тканин визначено оптимальні методи використання мегавольтних електронів системою розсіювачів і рефлекторів з фокусом на приповерхневих шарах, де розміщені максимальні об'єми твердих включень. Це може бути використано і для модифікації структури сировини при виробництві суріми та іншої багатокомпонентної харчової продукції з комбінованої сировини (рулети), пресерви з важко визріваючої прісноводної риби.

21. Розроблено методику радіаційно-хімічної модифікації бетону, яка не спотворює традиційних для нього базових показників – вмісту кисню, алюмінію, кальцію, магнію. Енергію радіації використано для керування процесами хімічного поєднання високомолекулярної органічної речовини з мінеральними компонентами бетонної суміші шляхом модифікації мегавольтними електронами з метою формування потоків ковалентних електронів і утворення суцільної монолітної структури бетону. Радіаційна методика модифікації забезпечує отримання бетону з суттєво кращими технічними характеристиками, а саме: в 32 рази зменшується водопоглинання, на 34% зростає міцність на стискання, в 4 рази зростає водонепроникність, в 2 рази підвищується морозостійкість.

22. Розроблено методи радіаційної модифікації виробів з дерева шляхом введення розчину олігомерів та подальшого опромінення електронами впродовж 100-150 с. Радіаційно-хімічна модифікація в 16 разів підвищує стійкість деревини до поглинання води, зростає міцність матеріалу, покращується зовнішній вигляд.

23. Досліджено можливості використання енергії випромінювань для виробництва терmostійкого асфальту підвищеної міцності. Розроблено і випробувано можливість радіаційно-хімічної модифікації асфальтобетону мономерами акрилової групи. Вперше отримано щільний і гідрофобний матеріал для покриття доріг, придатний до застосування в діапазоні перепаду температур - 30...+50°C.



## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Ahmedzade P., Fainleib A., Grigoryeva O., Günay T., Kultayev B., Sakhno V., Starostenko O., Kovalinska T. Modification of bitumen by recycled post-consumer low density polyethylene with surface activated using air ion irradiation. 3rd International Conference on Sustainable Construction Materials & Technologies : Book of Abstracts, Kyoto, Japan. August 18-21, 2013. Kyoto, Japan, 2013. P. 134.
2. Ahmedzade P., Fainleib A., Günay T., Starostenko O., Grigoryeva O., Sakhno V., Kovalinska T., Martinez-Barrera G. Modification of bitumen by gamma irradiated recycled low density polyethylene for pavement application. ROSAM is a Polychar satellite meeting : Book of Abstracts, Rouen, France June 3-7, 2013. Rouen, France, 2013. P. 78.
3. Ahmedzade P., Fainleib A., Günay T., Starostenko O., Kovalinska T. Effect of Gamma Irradiated Recycled Low Density Polyethylene on the High and Low Temperature Properties of Bitumen. International Journal of Polymer Science. 2013. vol. 2013. 07/2013. Article ID 141298. P. 9.
4. Apel P. Radiat. Meas. 2001. 559 p.
5. Apel P.Yu., Blonskaya I.V., Dmitriev et al. Nanotechnology S.N. 2007. 18. 305302.
6. Apel P.Yu., Blonskaya I.V., Orelovitch O.L. et al. Nucl. Instrum. Meth. 2003. B209. 329.
7. Apel P.Yu., Korchev Yu.E., Siwy et al. Nucl Instrum Z. Meth. 2001. B184. 337.
8. Borzakovskii A.E., Zhabrovec O.V., Kuts V.I., Zelinskii A.G., Kovalinska T.V., Sakhno V.I., Application of cyclotron U-120 in technologies of promising track membranes of low dielectric inductive capacity. XIX Annual Scientific Conference of Institute of Nuclear Research of NASU, Kiev (Ukraine), January 24-27, 2012.
9. Applo H.C., Groeneboom M., Lisser J., Hazemeyer B.V. The zero-flux Current transformer a high precision bipolar wide-band measuring device. IEEE Transactions on Nuclear Science. 1977. № 3. June. P. 5-24.

10. Borzakovskii A.E., Zhabrovec O.V., Kuts V.I., Zelinskii A.G., Sakhno V.I., Gusakova K.G., Fainleib O.M., Grigoryeva O.P., Starostenko O.M., Espuche E., Grande D. Application of cyclotron U-120 in technologies of promising track membranes of low dielectric inductive capacity XIX Annual Scientific Conference of Institute of Nuclear Research of NASU, Kiev (Ukraine), January 24-27, 2012.
11. Buxton G.V., Greenstock C.L., Helman W.P., Ross A.B. Critical review of rate constants for reactions of hydrated electrons, hydrogen atoms and hydroxyl radicals (OH/ O-) in aqueous solutions, J. Phys. Chem. Ref. Data 17.- 1988.- P.513-886.
12. Codex Alimentarius (CAC/Vol, XV – Ed. I) Rome: FAO/WHO, 1984. 48 p.
13. Combination processes for irradiation: proceedings of the Final Research Co-ordination Research Programme on Irradiation in Combination with Other Processes for Improving Food Quality / organized by the Joint FAO/IAEA Division of Nuclear Techniques in Food and Agriculture and held in Pretoria, South Africa. IAEA, (27 February-3 March 1995). 1998. P. 255.
14. Dosimetry for food irradiation. Technical report series. International Atomic Energy Agency. Vienna. 2002. № 409. P. 125-135.
15. Duarte C.L., Sampa M.H.O., Rela P.R., Oikawa H.. Environmental recovery by destruction on toxic Organic Compounds using Electron Beam Accelerator. IAEA-SM-366, Book of Extended Synopses, San Paulo, Brazil, 2001. P. 103-104
16. Dunkel J.A., Donaldson A.R. Precision current transducer for Supply. IEEE Transaction on Nuclear Science. 1975. № 3 June. vol. NS-22.
17. Dynamotor – the World’s Powerful Electron Beam Accelerator for Radiation Processing: RDI. 1979.
18. Fainleib A. Thermostable polycyanurates. Synthesis, modification, structure and properties. Nova Science Publishers. New York. 2010. 362 p.
19. Fainleib O, D. Kolesnik, V. Sakhno Radiation curing of silicone blends10th European Symposium on polymer Blends (Germany). - 2010.
20. Fainleib O.M., Grigoryeva O.P., Gusakova K.G., Sakhno V.I., Zelinsky A.G., Grande D. Novel nanoporous thermostable polycyanurates for track membranes”. Physics and Chemistry of Solid State, 10: 692-696. 2009.

21. Frank N.W. Introduction and historical review of electron beam processing for environmental pollution control, *Radiat. Phys. Chem.* 45. 1995. P. 989-1002.
22. Gomez Alvarez-Arenas T. E., Gonzalez B., Yu. Apeletal P.. *Appl. Phys. Lett.*, 2005, 87, 111911.
23. Grigoryeva O., Fainleib A., Starostenko O., Gusakova K., Sakhno V., Borzakovskiy A., Kovalinska T., Youssef B., Gouanve F., Espuche E., Grande D. Thermally Stable Nanoporous Cyanate Ester Resin/Linear Polyurethane Hybrid Networks Created by Nuclear Technologies. *Polymer*. 2021. 123831.
24. Grigoryeva O.P., Gusakova K.G., Fainleib O.M., Zelinsky A.G., Borzakovsky A.T., Grande D., Lacoudre N. Obtaining of porous polymer membranes based on cross-linked polycyanurates Annual Scientific Conference of the Institute of Nuclear Research of the NAS of Ukraine, Kyiv (Ukraine), January 23-26, 2007.
25. Gusakova K.G., Grande D. Grigoryeva O.P, Fainleib A.M., Zelinsky A.G., Hines R.L., Arndt R. Radiation effects of bombardment of quartz and vitreous silica by 7,5 keV positive ions. *Phys.Rev.* 1960. 623 p.
26. International Scientific Conference. Membrane and Sorption Processes and Technologies, March 5-7. 2007.
27. Irradiation and Achievement of Policy Goals. Food Safety (including HACCP). Proposed programme of Work for 1996-88. International Consultative Group on Food Irradiation (ICGFI), IAEA, Vienna, Austria, 1995. P. 10-18.
28. Kopcansky P., Kovalinska T., Sakhno V. The radiation stability of magnetic fluids for bioapplications and technical applications. Міжнародна конференція молодих учених і аспірантів «ІЕФ-2013»: матеріали конф. м. Ужгород, 20-23 травня 2013 р. Ужгород, 2013. С. 57-58.
29. Kovalinska T., Sakhno V. Complex research and qualification methods of cement products for the processing, accumulation and storage of radioactive waste. 2nd International Symposium on Cement-based Materials for Nuclear Wastes. Book of Abstracts, Avignon, France. June 3-6, 2014. Avignon, France, 2014. P. 77.
30. Kovalinska T., Sakhno V., Maievska T., Mikhneva E. Electrophysical radiation technologies in the production of food products. Compiled by International

Cooperation Department Shandong Academy of Sciences. Jinan, 30th October 2017. Jinan, 2017. P. 36-48.

31. Kovalinska T., Sakhno V., Vyshnevskyy I., Fainleib A.. Research and developments of radiation technologies and technical means of new cementation systems production for atomic energy necessities //Conference talks and posters, 1st International Symposium on cement-based materials for nuclear wastes. (Avignon-Palais des Papes France, 11-13 October, 2011). – P.117.

32. Kovalinska T.V., Zelinskyi A.G., Sakhno V.I., Fainleib O.M., Kolesnik D.Yu., Sheinich L.O. Physical and technological basics and new generation technologie of radiation-modified polymer concrete. Науковий вісник Ужгородського університету. Серія фізика. 2015. № 37. С. 116-122.

33. Machi S. Application of Radiation and Isotope Technology for Industry and Environmental Protection. Report of a Working Group, Technical University of Bucharest, Romania, Oct. 1995, P. 15.

34. Nablo S.V. Cheever R.N. Low Electron for Posteurisation and Aseptic Practice // Rad/Phys. And Chem.- 1979.- Vol. 14.- № 3-6.- P. 360.

35. Nanoporous thermostable polycyanurate-based film-forming materials. New thermostable polycyanurate-containing nanoporous materials. Project of the DC-60 Cyclotron With Smoothly Ion Energy Variation for Research Center at L.N.Gumilev Euroasia State University in Astana (Kazakhstan), Proc. Ceclotrons. 04. Tokyo. Japan. 2005.

36. Radiation processing: environmental applications.-Vienna: IAEA.-2007.- P.71

37. Sakamoto I., Mizusawa K. The Present State of Industrial Application of Electron Processing System. Japan and Asian Countries. Radiat. Phys. Chem. 1985. V. 25. № 4-6. P. 911-916.

38. Sakhno V.I, Demyanov A.V., Gorschkova M.M, Blinov Yu.G. Negative ion source for treatment of seafoodprodukts (FISH) // International Conference on Ion Sources Taormina Italy, Setember 7 - 13, 1997. Abstracts. - P.57.

39. Sakhno V.I. Accelerator in Ukraine. Institute for Nuclear Research.1995. Nov. V. 11. № 4. P. 11.
40. Sakhno V.I. Fish products processing. Institute for Nuclear Research, Accelerator. 1994. Dec. V. 1. № 4. P. 15.
41. Sampa M.H. Ongoing research in Brazil using electron beam liquid waste treatment, Status of Industrial Scale Radiation Treatment of Wastewater and its Future, IAEA-TECDOC-1407, IAEA, Vienna 2004. P. 29-36.
42. Sample preparation techniques in trace element analysis by X-Ray emission spectroscopy. IAEA-TECDOC-300. Vienna, 1983. Nov. 188 p.
43. Settzer S.M., Berger M.J. Transmission and Reflection of Electrons by Foils. Nucl. Instrum. and Meth. 1974. Vol. 119. P. 157-179.
44. Somogyi G. Srivastava D. Alpha-radiography with plastic track detectors. Intern. J. Appl. Rad. Isotopes. 1971. V. 22. 289 p.
45. Starostenko O., Gusakova K., Grigoryeva O., Fainleib A., Sakhno V., Borzakovskiy A., Grande D. XIII International Conference on Physics and Technology of Thin Films and Nanosystems, Ivano-Frankivsk (Ukraine). May 16-21. 2011.
46. The Present State of Industrial Application of Electron Processing System // Japan and Asian Countries / I. Sakamoto, K. Mizusawa // Radiat. Phys. Chem. -1985.- V.25.- №4-6.- P. 911-916.
47. Vishnevskiy I.N., Sakhno V.I., Sakhno A.V., Tomchay S.P., Zelinskiy A.G. Radiation facilities with electron accelerator of institute for nuclear research of Ukraine // XVIII конференция по ускорителям заряженных частиц «PUPAC –2002».- 2002.- Т.2.- С. 483.
48. Vyshnevskyy I.M., Sakhno V.I., Tomchay S.P., A.G. Zelinskiy, Sakhno O.V., Khrin T.V. The problems of radiation methods usage of testing the NPP's equipment. Current Problems in Nuclear Physics and Atomic Energy. Kyiv, June 9-15. CD-ROM Windows 98/ 2000 NT/XP. 2008.
49. Дослідження збуджених атомних ядер і механізмів ядерних процесів в біляпорогових реакціях звіт про НДР (заключний) ІЯД НАН України; кер. В.Ю. Денисов. Київ, 2017. Розділ 9.

50. Witting S., Spiegel G., Platzer R., Willbald U., Simulate Rauchgasreinigung durch Elektronenstrahl, Rep. KFK-PEF 45, Kernforschungs-zentrum Karlsruhe. 1988. P. 111.
51. Wolfe R., North J., Lai Y.P. Suppression, of hard bubbles in magnetic garnet film by ion implantation : dependence on ion species, dose, energy and annealing. Appl. Phys. Lett. 1973. M. 22. 683 p.
52. Zelinskyy A.G., Kovalinska T.V., Khalova N.V., Sakhno V.I.. The problems of KINR radiation technological technical base development // The 3-d International conference "Current Problems in Nuclear Physics and Atomic Energy". Proceedings. In two parts. (Kyiv, Ukraine, June 7-12, 2010).
53. Zimek, Z. High power accelerator and processing system for environmental application. Radiation Treatment of Gaseous and Liquid Effluents for Contaminant Removal, IAEA-TECDOC-1473, IAEA, Vienna. 2005. P. 19.
54. Абрамян Е.А. Промышленные ускорители электронов. М., Энергоатомиздат. 1986. 248 с.
55. Абрамян Е.А., Ю.С. Симахов, И.Л. Черток. Установки для дезинсекции зерна // Доклады 4-го Всесоюзного совещания по использованию ускорителей в народном хозяйстве и медицине. Ленинград. - Февраль 1971.- С. 2-8.
56. Абрамян Е.А., Альтеркоп Б.А., Кулешов Г.Д. Интенсивные электронные пучки. Физика. Техника. Применение. М., Энергоатомиздат. 1984. 233 с.
57. Акапьев Г.Н., Барашенков В.С., Самойлова Л.И., Третьякова С.П. К методике изготовления ядерных фильтров. Депонированная публикация ОИЯИ Б1-14-8214, Дубна. 1974.
58. Аккерман А.Ф. Моделирование траекторий заряженных частиц в веществе. М., Энергоатомиздат. 1991. 200 с.
59. Алексеев В.А., Барановский А.Е., Белоусов А.В. Разработка и результаты испытаний ускоряющих устройств новых коммерческих резонансных ЛУЭ для радиационной стерилизации. Сб. докл. XI Международное совещание по применению ускорителей заряженных частиц в промышленности и медицине. С-Петербург. 2005. С. 65-68.

60. Альбертинский Б.И. Высоковольтный ускоритель «Аврора –IV» / Б.И. Альбертинский, В.А.Глухих, О.А.Гусев и др. Труды Четвертого Всесоюзного Сопещения по применению ускорителей заряженных частиц в народном хозяйстве. -Л.,-1982.-Т.1.- С.46-50.- (НИИЭФА).

61. Альбертинский Б.И., Иванов А.С., Свиньин М.П. Ускорители с ИРЗ для радиационной технологии. Доклады Четвертого Всесоюзного Сопещения по применению ускорителей заряженных частиц в народном хозяйстве и медицине. Л., НИИЭФА. 1971.

62. Амуся М.Я. Тормозное излучение. М., Энергоатомиздат. 1990. 208 с.

63. Анатычук Л.И. Термоэлементы и термоэлектрические устройства. Справочник. К., Наукова думка. 1979. 105 с.

64. Апель П.Ю., Блонская И.В., Орелович О.Л. Коллоидный журн. 2004. 66. 1.

65. Арсеньев А.Б., Беляков В.А., Бондаренко И.М. Метрологическое обеспечение электрофизических установок. Обзор ОГ-46. Л., Ленинград, НИИЭФА. 1982. 119 с.

66. Ауслендер В.Л., Брызгин Импульсные высокочастотные линейные ускорители электронов серии ИЛУ для промышленного применения. Сб. докл. XI междуна. совещ. по применению ускорителей заряженных частиц в промышленности и медицине. С-Петербург. 2005. С. 78-81.

67. Ауслендер В.Л., Р.А. Салимов. Ускорители электронов Института ядерной физики СО АН СССР для народного хозяйства// Атомная энергия.-1978.- т.64.- Вып.5.- С.403-408.

68. Ауслендер В.Л., Салимов Р.А. Ускорители электронов Института ядерной физики СО АН СССР для народного хозяйства. Атомная энергия. 1978. Т. 64. Вып. 5. С. 403-408.

69. Ауслендер В.Л., Ческидов В. Г. Ускоритель ИЛУ-12 на энергию 5 МэВ и мощностью до 300 кВт. Сб. докл. XI междуна. совещ. по применению ускорителей заряженных частиц в промышленности и медицине. С-Петербург. 2005. С. 86-89.

70. Баклаков Б.А. Магнитномодуляционный измеритель тока пучка заряженных частиц ПТЭ. 1979. № 3. С. 23-24.
71. Балыкин В.И., Борисов П.И., Летохов В.С Письма в ЖЭТФ. 2006. 84. 544.
72. Барашенков В.С. Использование ядерных фильтров для очистки технологических сред в производстве полупроводниковых приборов. ОИЯИ. Б1-14-7857.
73. Барашенков В.С. Новые профессии тяжелых ионов. М., Атомиздат. 1977. 120 с.
74. Базиладзе С.Г. Электронная регистрирующая аппаратура в стандарте КАМАК. Приборы и техника эксперимента. 1981. №2. С. 7-21.
75. Блинов Ю.Г., Шульгина Л.В., Солодова Е.А., Сахно В.И.. Аэроионная технология пищевых рыбных продуктов // Сб. тез. докл. научно-технического симпозиума «Современные средства воспроизводства и спользования водных ресур-сов». – 2000. – Т.3. - С.135-137
76. Бондаренко Д.В., Зелінський А.Г., Ковалінська Т.В., Лебська Т.К., Сахно В.І., Халова Н.В. Дослідження шляхів адаптації аероіонних технологій до виробництва в'яленої продукції з чорноморських видів риби. ХІХ щорічна конференція Інституту ядерних досліджень НАН України : зб. тез доп. наук.-практ. конф., м. Київ, 24-27 січня 2012 р. Київ, 2012. С. 154-155.
77. Борзаковський А.Є., Ковалінська Т.В., Сахно В.І., Іванов Ю.В., Куц В.І., Боровець М.І., Рилошко В.О., Фанлейб О.М. Дослідження перспектив реалізації трекових технологій нанопористих матеріалів на ядерно-фізичних радіаційних установках ІЯД НАН України. ХХVІ щорічна конференція Інституту ядерних досліджень НАН України : зб. тез доп. наук.-практ. конф., м. Київ, 8-12 квітня 2019 р. Київ, 2019. С. 104.
78. Борзаковський А.Є., Ковалінська Т.В., Сахно В.І., Хомич І.А. Удосконалення технології виготовлення трекових мембран. Ядерна фізика та енергетика. 2018. Т. 19. № 4. С. 400-405.



79. Борискин В.Н. Системы контроля и управления технологическими и исследовательскими линейными ускорителями электронов. ВАНТ. Сер.: Ядерно-физические исследования. 1997. Вып. 4,5 (31,32). С. 53-54.

80. Брегер А.Х., Вайнштейн Б.И., Сыркус Н.П. Основы радиационно-химического аппаратостроения. М.: Атомиздат. 1967. 40 с.

81. Бровченко В.Г. Измерение импульсов тока магнитными поясами. ПТЭ. 1966. № 3. С. 74.

82. Бродер Д.Л. Бетон в защите ядерных установок. М., Атомиздат. 1966. 67с.

83. Бугаев С.П., Крейндель Ю.Е., Щанин П.М. Электронные пучки большого сечения. М., Энергоатомиздат. 1984. 78 с.

84. Бугров В.К. Опытная промышленная установка для радиационно-химической отделки тканей / В.К.Бугров, Б.М. Ванюшин, А.Е. Воскобоев и др.- Доклады 2-го Всесоюзного совещания по применению ускорителей заряженных частиц.: Л. 1976.-Т.1. С.391-397.

85. Булатов Б.П., Андрюшин Н.Ф. Обратное рассеянное гамма-излучение в радиационной технике. М., Атомиздат. 1971. С. 239.

86. Вальднер О.А., Власов А.Д., Шальнов А.В. Линейные ускорители. М., Атомиздат. 1969. 247 с.

87. Вейс М.Э., Голубенко А.А. Ускорители электронов типа ЭЛВ для применения в энергоемких радиационно-технологических процессах. Сб. докл. XI междунар. совещ. по применению ускорителей заряженных частиц в промышленности и медицине. С-Петербург. 2005. С. 104-105.

88. Визначення радіаційної стійкості конструкційних елементів ядерних реакторів в сильних радіаційних полях: звіт про НДР (проміжний) ІЯД НАН України; кер. С.П. Томчай. Київ, 2009. 27с. № 0107U004926.

89. Виленский А.И., Олейников В.А., Маков Н.Г., Мчедливили Б.В., Донцова Э.П. Полиамидные трековые мембраны для ультра- и микрофльтрации. Высокомолек. Соед., Т. 36, № 3, 1994. С. 475-485.

90. Винтерингам Ф.П.. Изотопные методы в сохранении качества пищевых продуктов и окружающей среды // Бюллетень МАГАТЭ.- 1975.- Т.17.- №5. С.14-25.

91. Вишне夫斯基 И.Н., Зелинский А.Г., Сахно А.В., Сахно В.И., Томчай С.П. Радиационная установка с ускорителем электронов ИЯИ НАН Украины // Атомная энергия. – 2003.- Т.94. - Вып.2. - С.163-166

92. Вишне夫斯基 И.Н., Сахно В.И., Томчай С.П., Сахно А.В., Хрин Т.В., Зелинский А.Г., Халова Н.В.. Проблемы создания технической базы для квалификации кабельной продукции АЭС // I Міжнародна конференція «Продление срока эксплуатации энергоблоков АЭС. Оценка технического состояния и управление старением оборудования и кабельных изделий». - CD-ROM Windows 98/ 2000 NT/XP. -Київ. - 2007.

93. Вишневський І. М., Сахно В.І., Сахно О. В., Зелінський А. Г., Томчай С. П., Хрін Т. В.. Проблеми радіаційних випробовувань кабелів АЕС на установці ІЯД // Вопросы атомной науки и техники. Сер.: Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение. - 2007.- № 6(91). С.128-130.

94. Вишневський І. М., Хрін Т. В., Сахно В.І., Сахно О. В., Зелінський А. Г., Томчай С. П., Халова Н. В. // Дослідження розсіяного випромінювання лінійного прискорювача електронів // Ядерна фізика та енергетика. – 2007. - №2(20). С.126-130.

95. Вишневський І.М., Гайдар Г.П., Коваленко О.В, Ковалінська Т.В., Коломієць М.Ф, Липська А.І., Литовченко П.Г., Сахно В.І., Шевель В.М. Радіаційні та ядерні технології в Інституті ядерних досліджень НАН України. XXII щорічна конференція Інституту ядерних досліджень НАН України : зб. тез доп. наук.-практ. конф., м. Київ, 26-30 січня 2015 р. Київ, 2015. С. 120.

96. Вишневський І.М., Гайдар Г.П., Коваленко О.В., Ковалінська Т.В., Коломієць М.Ф., Липська А.І., Литовченко П.Г., Сахно В.І., Шевель В.М. Радіаційні та ядерні технології в Інституті ядерних досліджень НАН України : монографія. Київ : Ін-т ядерних досліджень. 2014. 176 с.

97. Вишневський І.М., Зелінський А.Г., Ковалінська Т.В., Остапенко І.А., Пилипець Д.Т., Сахно В.І., Халова Н.В. Дослідження проблем використання

радіаційної установки ІЯД НАН України в технологіях нових конструкційних матеріалів в ядерній енергетиці. XIX щорічна конференція Інституту ядерних досліджень НАН України : зб. тез доп. наук.-практ. конф., м. Київ, 24-27 січня 2012 р. Київ, 2012. С. 96-97.

98. Вишневський І.М., Зелінський А.Г., Сахно В.І., Сахно О.В., Томчай С.П.. Система вимірювання розподілу полів випромінювання на радіаційній установці ІЯД // Збірник наукових праць ІЯД. – 2004. - №2(13). - С. 159-162.

99. Вишневський І.М., Ковалінська Т.В., Сахно В.І. Історія, стан та перспективи розвитку радіаційних технологій в ІЯД НАН України. XX щорічна конференція Інституту ядерних досліджень НАН України : зб. тез доп. наук.-практ. конф., м. Київ, 28 січня-1 лютого 2013 р. Київ, 2013. С. 116.

100. Вишневський І.М., Сахно А.В., В.І. Сахно, С.П. Томчай, А.Г. Зелінський. Розробка та дослідження параметрів датчика струма пучка електронів радіаційної установки ІЯД // Збірник наукових праць ІЯД. – 2003. - №2(10). - С.146-149.

101. Вишневський І.М., Сахно В.І., Сахно О.В., Зелінський А.Г., Томчай С.П., Хрін Т.В., Н.В. Халова. Спеціалізований стенд для функціональних випробувань кабельних виробів АЕС. Ядерна фізика та енергетика. Вып. 2. 1994. С. 163-166.

102. Вишневський І.М., Сахно В.І., Сахно О.В., Томчай С.П., Хрін Т.В., Зелінський А.Г. Установка для радіаційних випробувань обладнання АЕС. International conference "Current Problem in Nuclei Physics and Atomic Energy" : Book of abstracts. Kyiv, May 29-June 3. 2006. P. 188.

103. Вишневський І.М., Сахно В.І., Томчай С.П., Зелінський А.Г., Сахно О.В.. Впровадження технологій радіаційної пастеризації та консервації продуктів харчування. Наука та інновації. 2005. Том.1. №3. С. 51-61.

104. Вишневський І.М., Сахно В.І., Томчай С.П., Халова Н.В. Радіаційно-технологічна установка з лінійним прискорювачем електронів НЦ"ІЯД"НАН України // Матеріали щорічної наукової конференції інституту ядерних досліджень. – 1998. – 27-30 січня, Київ, с.111.

105. Вишневський І.М., Сахно В.І., Томчай С.П.. Радіаційні технології ІЯД НАН України // зб. тез. доп. науково-практичної конференції «Ядерні і радіаційні технології в Україні: можливості, стан та проблеми впровадження». – 2009.

106. Вишневський І.М., Хрін Т.В., Сахно В.І., Сахно О.В. , Зелінський А.Г., Томчай С.П., Халова Н.В. Дослідження розсіяного випромінювання лінійного прискорювача електронів. Ядерна фізика та енергетика. 2007. №2 (20). С. 126-130.

107. Ворогушин М.Ф., Гавриш Ю.Н. и др. Установка для стерилизации электронным пучком на основе линейного ускорителя на 3 МэВ // XVIII конференция по ускорителям заряженных частиц. «PUPAC –2002».- 2002.- Т.2.- С.487-489.

108. Ворогушин М.Ф., Гавриш Ю.Н., Будтов А.А. Медицинские линейные ускорители разработки НИИЭФА им. Д.В.Ефремова. Сб. докл. XI Международное совещание по применению ускорителей заряженных частиц в промышленности и медицине. С-Петербург. 2005. С. 188-192.

109. Воронов А.А. Основы теории автоматического управления: Особые линейные и нелинейные системы. М., Энергоатомиздат. 1981. 303 с.

110. Выставкин А.Н. Проблемно-ориентированные информационно-вычислительные комплексы на базе ЭВМ СМ-3 и СМ-4 и аппаратуры КАМАК для автоматизации научных исследований. Автометрия. 1980. № 3. С. 114-117.

111. Гавриш Ю.Н., Крестьянинов А.С., Бакланов А.В. Радиационная стерилизационная установка 3 МэВ-1 кВт с локальной радиационной защитой. Сб. докл. XI междун. совещ. по применению ускорителей заряженных частиц в промышленности и медицине. С-Петербург. 2005. С. 389-390.

112. Герасимов Е.И., Солнышков А.И. Методы измерения фазового объема пучка заряженных частиц. Обзор ОД-3, Л., Ленинград, НИИЭФА. 1974. 49 с.

113. Гикал Б.Н., Гульбекян Г.Г., Дмитриев С.Н. и др. Сообщения ОИЯИ, 39-2003-121, Дубна, 2003.

114. Гольдин Л.Л. Физика ускорителей. М., НАУКА. 1983. 144 с.

115. Горшкова М.М., Блинов Ю.Г., Шульгина Л.В., Солодова Е.А, Демьянов А.В., Сахно В.И. Аэроионная технология пищевых рыбных продуктов // Рыбное хозяйство. – М., 1988. - №3. - С.62
116. ГОСТ 1.25-76 ГСС. Метрологическое обеспечение. Основные положения.
117. ГОСТ 13600-68 ГСИ. Классы точности. Общие требования.
118. ГОСТ 16263-70 ГСИ. Метрология. Термины и определения.
119. ГОСТ 22491-77. Ускорители заряженных частиц. Основные виды и функциональные элементы.
120. ГОСТ 26.201-80. Единая система стандартов приборостроения. Система КАМАК. Крейт и сменные блоки.
121. ГОСТ 8.001-71 ГСИ. Организация и порядок проведения государственных испытаний средств измерений.
122. ГОСТ 8.010-72 ГСИ. Общие требования к стандартизации и аттестации методик выполнения измерений.
123. Григорьева О.П., Гусакова К.Г., Файнлейб О.М., N. Lacoudre, D. Grande. Нові нанопористі матеріали на основі термостійких поліціануратів. Полімерний журнал. 2008. Т. 30, № 1. С.27-36.
124. Грызлов А.В., Ильин В.Н., Ламонов С.В. Технологический ускоритель на энергию 10 МэВ. Сб. докл. XI междуна. совещ. по применению ускорителей заряженных частиц в промышленности и медицине. С-Петербург. 2005. С. 132-135.
125. Гусакова К.Г. Синтез, структура і властивості пористих сітчастих плівкоотвірних поліціануратів. Канд. дис. ІХВС, Київ. 2010.
126. Гусев Н.Г. Защита от излучений ядерно-технических установок. М., Энергоатомиздат. 1972. 126 с.
127. Дослідження фундаментальних основ функціональних випробувань обладнання ядерних енергетичних установок: звіт про НДР (заключний) ІЯД НАН України; кер. Т.В. Ковалінська. Київ, 2016. 60с. № 0115U004374.
128. Дюлдя С.В., Братченко М.И., Скоробогатов М.А. Радионуклиды европия как источники излучения для гамма-радиационных технологий: моделирование

распределения поглощенной дозы в гомогенных средах. Вопросы атомной науки и техники. Сер.: Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение. 2004. №3 (85). С. 128-140.

129. Електрофізичний технічний комплекс для імітації уражуючих факторів ядерного впливу: звіт про НДР (проміжний) ІЯД НАН України; кер. В.І. Сахно. Київ, 2020. 34 с. № 0119U101835

130. Жучко В.Е., Ципенюк Ю.Б. Расчет спектров тормозного излучения под различными углами в диапазоне энергий 1-30 МэВ. Атомная энергия. 1975. Т. 39, Вып.1. С. 66.

131. Зайцев Л.Н., Комочков М.М., Сычев Б.С. Основы защиты ускорителей. М., Атомиздат. 1971. 398 с.

132. Зелинский А.Г. Разработка технических средств измерения энергии ускоренных электронов. Вопросы атомной науки и техники Сер.: физика радиационных повреждений и явлений в твердых телах. 2008. № 2. С. 191-192.

133. Зелинский А.Г., Желтоножский В.А., Сахно В.И., Ковалинская Т.В., Халова Н.В. Применение технологического ускорителя электронов для ядерных исследований. Ядерна фізика та енергетика. 2011. Т.12. №3. С. 311-315.

134. Зелінський А.Г., Ковалінська Т.В., Лебська Т.К., Голембовська Н.В., Сахно В.І., Халова Н.В. Дослідження ефективності використання пікохвильових технологій ІЯД НАН України для виробництва пресервів з прісноводних риб. ХІХ щорічна конференція Інституту ядерних досліджень НАН України : зб. тез доп. наук.-практ. конф., м. Київ, 24-27 січня 2012 р. Київ, 2012. С. 156-157.

135. Зелінський А.Г., Ковалінська Т.В., Лебська Т.К., Маєвська Т., Сахно В.І., Халова Н.В. Дослідження процесів радіаційної модифікації міофібрилярних білків у харчових продуктах. ХІХ щорічна конференція Інституту ядерних досліджень НАН України : зб. тез доп. наук.-практ. конф., м. Київ, 24-27 січня 2012 р. Київ, 2012. С. 161.

136. Зелінський А.Г., Ковалінська Т.В., Лебська Т.К., Міхнева К., Сахно В.І., Халова Н.В. Експериментальне дослідження впливу електронного опромінювання на структурно-механічні властивості тканин рапани, восьминогів та кальмарів на

радіаційній установці ІЯД НАН України. XIX щорічна конференція Інституту ядерних досліджень НАН України : зб. тез доп. наук.-практ. конф., м. Київ, 24-27 січня 2012 р. Київ, 2012. С. 162.

137. Зелінський А.Г., Ковалінська Т.В., Остапенко І.А., Сахно В.І. Дослідження радіаційної стійкості конструкційних матеріалів АЕС України. XX щорічна конференція Інституту ядерних досліджень НАН України : зб. тез доп. наук.-практ. конф., м. Київ, 28 січня-1 лютого 2013 р. Київ, 2013. С. 103.

138. Зелінський А.Г., Сахно О.В., Томчай С.П., Вишневецький І.М., Сахно В.І., Розробка та дослідження параметрів датчика струму пучка електронів радіаційної установки ІЯД. Збірник наукових праць ІЯД. 2003. № 2 (10). С. 146-149.

139. Иванов В.С. Радиационная химия полимеров. Л., Химия. 1988. 320 с.

140. Иванов Ю.В., Сахно В.І., Ковалінська Т.В., Жернов О.А., Зелінський А.Г., Сахно Л.О., Ніколаєв В.Г. Модернізація радіаційної установки СРТ для медико-біологічних досліджень *in-vivo*. XXV щорічна конференція Інституту ядерних досліджень НАН України : зб. тез доп. наук.-практ. конф., м. Київ, 16-20 квітня 2018 р. Київ, 2018. С. 128-129.

141. Kovalinska T.V., Zelinskyu A.G., Sakhno V.I.. Radiation technologies of corrosion resistant concret for NPPs // The 3-d International conference "Current Problems in Nuclear Physics and Atomic Energy". Proceedings. In two parts. (Kyiv, Ukraine, June 7-12, 2010).

142. Карасев С.П., Уваров В.Л., Цветков И.И. Система метрологического обеспечения радиационных технологий с применением электронного и тормозного излучений. ВАНТ, 1997. Вып. 2,3 (29,30). Т. 1. С. 54-56.

143. Касперович А.Н. Крейт измерительной системы сбора данных в стандарте КАМАК. Автометрия. 1976. № 1. С. 7-20.

144. Кирюшин Ю.Г., Колесников Ю.М. Расчет пояса Роговского с ферритовым сердечником для точного измерения импульсов токов. ПТЭ. 1976. № 6. С. 116.

145. Kovalinska T.V., Khalova N.V., Ostapenko I.A., Sakhno V.I., Shlapatska V.V., Zelinskyu A.G. The problems of the usage of powerful electrons accelerators for the

irradiation of Nuclear Power Stations' equipment and materials. The 4th International Conference "Current Problems in Nuclear Physics and Atomic Energy". Proceedings. In two parts. Part I., Kyiv, September 3-7 2012. Kyiv, 2012. P. 504-509.

146. Kovalinska T.V., Ostapenko I.A., Sakhno V.I., Zelinskyy A.G. The development of new projection methods of radiation protection of industrial radiation installations. The 4th International conference "Current Problems in Nuclear Physics and Atomic Energy". Proceedings. In two parts. Part I., Kyiv, September 3-7 2012. Kyiv, 2012. P. 150-154.

147. Kovalinska T.V., Ostapenko I.A., Sakhno V.I., Zelinskyy A.G. The improvement of KINR NASU experimental base and methods of nondestructive control offunctional characteristics of Nuclear Power Stations' equipment and materials. The 4th International conference "Current Problems in Nuclear Physics and Atomic Energy". Proceedings. In two parts. Part I., Kyiv, September 3-7 2012. Kyiv, 2012. P. 155-159.

148. Ковалев В.П. Вторичные излучения ускорителей электронов. М., Атомиздат. 1979. 200 с.

149. Ковалев В.П. Ускорители в неразрушающем контроле. М., Энергоатомиздат. 1983. С. 101.

150. Ковалинская Т.В., Михнева Е.Г., Сахно В.И., Голембовская И.В. Ионные технологии в переработке рыбы. VII Міжнародна науково-практична конференція вчених, аспірантів і студентів НУБіП України : збірник праць, м. Київ, 27-28 квітня 2017 р. Київ, 2017. С. 254-255.

151. Ковалинская Т.В., Сахно В.И., Михнева Е.Г. Электрофизика – инновационное технологическое направление в производстве продуктов питания из гидробионтов. VII Міжнародна науково-практична конференція вчених, аспірантів і студентів НУБіП України : збірник праць, м. Київ, 27-28 квітня 2017 р. Київ, 2017. С. 247-248.

152. Ковалінська Т. В. Дослідження та модернізація радіаційної установки ІЯД для функціональних випробувань обладнання та нових матеріалів АЕС [Текст] : автореф. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : спец. 05.14.14 – «Теплові та ядерні енергоустановки». - Київ, ІЯД НАН України. – 2011. – С.18.



153. Ковалінська Т.В. Актуальні напрямки радіаційних технологій. XXII щорічна конференція Інституту ядерних досліджень НАН України : зб. тез доп. наук.-практ. конф., м. Київ, 26-30 січня 2015 р. Київ, 2015. С. 126.

154. Ковалінська Т.В. Дослідження та модернізація радіаційної установки ІЯД для функціональних випробувань обладнання та нових матеріалів АЕС: дис. ... канд. технічних наук: 05.14.14 / ІЯД НАН України . Київ, 2011. 159с.

155. Ковалінська Т.В. Електромеханічний прилад для контролю конфігурації пучка електронів потужного промислового прискорювача радіаційної установки. Науковий вісник Ужгородського університету. Серія фізика. 2014. № 35. С. 131-135.

156. Ковалінська Т.В. Електромеханічний прилад для контролю конфігурації пучка електронів потужного промислового прискорювача радіаційної установки. Міжнародна конференція молодих учених і аспірантів «ІЕФ-2013»: матеріали конф. м. Ужгород, 20-23 травня 2013 р. Ужгород, 2013. С. 297–298.

157. Ковалінська Т.В. Радіаційні технології в різних галузях економіки. Вісник НАНУ. Розробки Інституту ядерних досліджень НАН України. 2014. № 12. С. 64-69.

158. Ковалінська Т.В., Сахно В.І., Іванов Ю.В., Міхнева Є.Г., Зелінський А.Г. Радіаційна технологія гідрофобізації будівельних матеріалів. Ядерна фізика та енергетика. 2016. Т. 17. № 4. С. 418–424.

159. Ковалінська Т.В., Борзаковський А.Є., Сахно В.І., Файнлейб О.М., Григор'єва О.П., Старостенко О.М., Гусакова К.Г., F. Gouanve, E. Espuche, D. Grande. Дослідження перспектив створення трекових мембран з поліціануратів на радіаційному комплексі ІЯД НАН України. Полімерний журнал. 2019. № 3. С. 159-166.

160. Ковалінська Т.В., Жернов О.А., Сахно В.І., Маєвська Т.М., Іванов Ю.В., Ніколаєв В.Г., Сахно Л.О., Шлапацька В.В. Дослідження можливостей застосування продуктів радіолізу води в медичних цілях. Науковий вісник Ужгородського університету. Серія фізика. 2018. Том 43. С. 137-146.

161. Ковалінська Т.В., Зелінський А.Г., Міхнева Є.Г., Сахно В.І. Розробка і випробування радіаційних технологій промислової дезінфекції готових харчових

продуктів. XXIV щорічна конференція Інституту ядерних досліджень НАН України : зб. тез доп. наук.-практ. конф., м. Київ, 10-13 квітня 2017 р. Київ, 2017. С. 201-203.

162. Ковалінська Т.В., Зелінський А.Г., Сахно В.І., Остапенко І.А., Халова Н.В., Шлапацька В.В. Проблеми технологічної дозиметрії радіаційних процесів. XX щорічна конференція Інституту ядерних досліджень НАН України : зб. тез доп. наук.-практ. конф., м. Київ, 28 січня-1 лютого 2013 р. Київ, 2013. С. 115.

163. Ковалінська Т.В., Зелінський А.Г., Сахно В.І., Файнлейб О.М., Колесник Д.Ю., Шейніч Л.О. Фізико-технічні основи і технологія нового покоління радіаційно-модифікованого полімербетону. Міжнародна конференція молодих учених і аспірантів «ІЕФ-2013»: матеріали конф. м. Ужгород, 18-22 травня 2015 р. Ужгород, 2015. С. 141–142.

164. Ковалінська Т.В., Іванов Ю.В., Зелінський А.Г., Міхнева Є.Г., Сахно В.І., Хамбір С.І. Радіаційна модифікація пористих будівельних матеріалів. XXIV щорічна конференція Інституту ядерних досліджень НАН України : зб. тез доп. наук.-практ. конф., м. Київ, 10-13 квітня 2017 р. Київ, 2017. С. 145-146.

165. Ковалінська Т.В., Іванов Ю.В., Сахно В.І. Імітація уражуючих факторів ядерного впливу. XXVII щорічна конференція Інституту ядерних досліджень НАН України. До 50-річчя ІЯД НАН України : зб. тез доп. наук.-практ. конф., м. Київ, 21-25 вересня 2020 р. Київ, 2020. С. 166-167.

166. Ковалінська Т.В., Іванов Ю.В., Сахно В.І., Файнлейб О.М., Григор'єва О.П., Старостенко О.М., Мельниченко О.В., Шлапацька В.В., Пилипенко А.М. Дослідження радіаційної стійкості плівок для ядерних мембран з поліціануратів. XXVII щорічна конференція Інституту ядерних досліджень НАН України. До 50-річчя ІЯД НАН України : зб. тез доп. наук.-практ. конф., м. Київ, 21-25 вересня 2020 р. Київ, 2020. С. 164-165.

167. Ковалінська Т.В., Остапенко І.А., Сахно В.І., Зелінський А.Г. Шляхи вдосконалення радіаційної техніки для кваліфікації обладнання АЕС. Ядерна фізика та енергетика. 2013. Т.14. №1. С. 91-96.

168. Ковалінська Т.В., Остапенко І.А., Сахно В.І. Технологія рівномірного електронного опромінення промислових виробів великих габаритів. Ядерна фізика та енергетика. 2016. Т. 17. № 2. С. 199-203.

169. Ковалінська Т.В., Остапенко І.А., Сахно В.І., Желтоножський В.О. Актуальність дослідження впливу іонізуючих випромінювань та заряджених частинок низьких енергій на функціональні характеристики обладнання для ядерної енергетики. XX щорічна конференція Інституту ядерних досліджень НАН України : зб. тез доп. наук.-практ. конф., м. Київ, 28 січня-1 лютого 2013 р. Київ, 2013. С. 102.

170. Ковалінська Т.В., Остапенко І.А., Сахно В.І., Зелінський А.Г., Халова Н.В. Проблеми оптимізації опромінювання промислових виробів. XX щорічна конференція Інституту ядерних досліджень НАН України : зб. тез доп. наук.-практ. конф., м. Київ, 28 січня-1 лютого 2013 р. Київ, 2013. С. 114.

171. Ковалінська Т.В., Сахно В.І. Аналіз результатів радіаційних випробувань магнітних рідин і обговорення перспектив радіаційних технологій створення магнетизованих біопрепаратів. Міжнародна конференція молодих учених і аспірантів «ІЕФ-2013» : матеріали конф. м. Ужгород, 20-23 травня 2013 р. Ужгород, 2013. С. 116-117.

172. Ковалінська Т.В., Сахно В.І. Електрофізичний імітатор ушкоджуючих факторів ядерної енергії. Ядерна фізика та енергетика. 2019. Т. 20. № 1. С. 84-89.

173. Ковалінська Т.В., Сахно В.І., Іванов Ю.В. Експлуатація промислового прискорювача електронів при мінімальній інтенсивності пучка. Ядерна фізика та енергетика. 2018. Т. 19. № 3. С. 293-298.

174. Ковалінська Т.В., Сахно В.І., Іванов Ю.В., Міхнєва Є.Г., Зелінський А.Г. Радіаційна технологія гідрофобізації будівельних матеріалів. Ядерна фізика та енергетика. 2016. Т. 17. № 4. С. 418-424.

175. Ковалінська Т.В., Сахно В.І., Іванов Ю.В., Хомич І.А., Маєвська Т.І. Розробки радіаційних технологій гідролізних наноматеріалів для ядерної та традиційної медицини. XXVI щорічна конференція Інституту ядерних досліджень НАН України : зб. тез доп. наук.-практ. конф., м. Київ, 8-12 квітня 2019 р. Київ, 2019. С. 104-105.

176. Ковалінська Т.В., Сахно В.І., Іванов Ю.В., Шлапацька В.В., Мельниченко О.В., Файнлейб А.М., Григор'єва О.П., Старостенко О.М., Grande D. Функціональні випробування полімерних плівок щільними електронними пучками. Полімерний журнал. 2020. № 4. С. 254-261.

177. Ковалінська Т.В., Хомич І.А., Сахно В.І., Іванов Ю.В., Мельниченко О.В., Шлапацька В.В. Радіаційні функціональні дослідження тонких полімерних плівок для кваліфікації на використання в критичному обладнанні ядерних об'єктів. Національний вісник Ужгородського університету. Серія Фізика. 2020. №47. С. 63-73.

178. Ковалінська Т.В., Вишневський І.М., Остапенко І.А., Сахно В.І., Файнлейб А.М. Методи дослідження і кваліфікації цементних виробів для переробки та зберігання радіоактивних відходів. XXI щорічна конференція Інституту ядерних досліджень НАН України : зб. тез доп. наук.-практ. конф., м. Київ, 27-31 січня 2014 р. Київ, 2014. С. 108.

179. Козлов Ю.Д. Разработка установок с ускорителями электронов для резации процессов РХТ. М. Энергоатомиздат. 1986. 70 с.

180. Козлов Ю.Д. Расчет параметров и конструирование радиационно-химических установок с ускорителями электронов. М., Атомиздат. 1976. 205 с.

181. Колесник Д.Ю., Сахно В.І., Шейнич Л.О., Файнлейб О.М.. Структурні зміни в цементному камені просоченому силіконами та опроміненому прискореними електронами // Будівництво України. - 2011. - №2

182. Колесник Д.Ю., Файнлейб О.М., Сахно В.І.. Органосилікани при радіаційно-хімічній санации бетону // XII Українська конференція з високомолекулярних сполук. – 2010.

183. Кочегуров В.А., Саблин Н.И. Вопросы надежности эксплуатируемых ускорителей заряженных частиц. Тр. НИИЯФ, электроники и автоматизации. 1976. Вып.1. С. 19.

184. Красовский А.А. Справочник по теории автоматического управления / Под ред. А.А. Красовского. М., Наука. 1987. 712 с.

185. Краус А.Д. Охлаждение электронного оборудования. Пер. с англ. М., Энергия. 1971. 211 с.

186. Круглова Е.В., Шваб В.В. Использование линейного ускорителя УЭЛВ-10-2Д-40 в ОАО «Уралмашзавод». Сб. докл., XI Международное совещание по применению ускорителей заряженных частиц в промышленности и медицине. С-Петербург. 2005. С. 38-39.

187. Куликовский К.Л., Купер В.Я. Методы и средства измерений. М., Энергоатомиздат. 1986. 448 с.

188. Лебедев А.Н., Шальнов А.В. Основы физики и техники ускорителей. М., Энергоатомиздат. 1983. 200 с.

189. Лебська Т.К., Борисенко Р.В., Бондаренко Є.В., Ковалінська Т.В., Сахно В.І. Перспективи аероіонних технологій у процесах в'ялення риби. XXVII щорічна конференція Інституту ядерних досліджень НАН України. До 50-річчя ІЯД НАН України : зб. тез доп. наук.-практ. конф., м. Київ, 21-25 вересня 2020 р. Київ, 2020. С. 254.

190. Линевиц Ф.И. Измерение температуры в технике. М., Metallurgy. 1980. 113с.

191. Лякин Д.А., Статевич Ю.Б. Программно-аппаратный комплекс для измерения энергетического спектра пучка заряженных частиц на выходе линейного ускорителя. ВАНТ. Сер.: Ядерно-физические исследования. 1997. Вып. 4,5 (31,32). С. 70-71.

192. Материалы и конструкции защит ядерных установок. Труды Московского инженерно-строительного института. М., Энергия. 1968. № 56. С. 123.

193. Митрофанов А.В., Апель П.Ю., Блонская И.В., Орелович О.Л. Журн. Техн. Физики. 2006. 121 с.

194. Михнева Е.Г., Ковалинская Т.В., Сахно В.И. Радиационные технологии переработки моллюсков. Науковий вісник Ужгородського університету. Серія фізика. 2015. № 38. С. 171-177.

195. Михнева Е.Г., Ковалинская Т.В., Сахно В.И. Радиационные технологии переработки. Міжнародна конференція молодих учених і аспірантів «ІЕФ-2013» : матеріали конф. м. Ужгород, 18-22 травня 2015 р. Ужгород, 2015. С. 154-155.

196. Модули систем автоматизации научного эксперимента в стандарте КАМАК: Каталог проспектов, СКБ ИРЭ АН СССР, М., ВИНТИ. 1978. 231 с.

197. Н.Г. Коньков, В.Ф. Карпухин, Ю.А. Панин Очистка сточных вод производства антибиотиков ускоренными электронами // Тез. докл. II Всесоюз. Конф. по прикладной радиационной химии, г. Обнинск. - 1973. С. 113.

198. Нанопористі термостійкі полімерні матеріали – «Полінанопор»: звіт про НДР (проміжний) ІЯД НАН України; кер. Т.В. Ковалінська. Київ, 2019. 54с. №0119U102067.

199. Нанопористі термостійкі полімерні матеріали – «Полінанопор»: звіт про НДР (проміжний) ІЯД НАН України; кер. Т.В. Ковалінська. Київ, 2020. 41с. №0120U103160.

200. Наукові основи технологій складних органічних матеріалів природного походження звіт про НДР (заключний) ІЯД НАН України; кер. Т.В. Ковалінська. Київ, 2015. 30с. № 0115U004106.

201. Наума Г., Майлинг В., Щербина А. Стандартные интерфейсы для измерительной техники. М., Мир. 1982. 304 с.

202. Нечаев А.Ф. Пиковолновая обработка пищевых продуктов. Химическая промышленность. Сер. «Радиационная химия и технология; радиационная стойкость», - М., 1991. С. 55.

203. Нормы радиационной безопасности Украины (НРБУ-97). Киев. 1988. с 135.

204. Обработка отходов облучением// МАГАТЭ в кн: 17, №5, октябрь 1975. С.39-42 .

205. Одиннадцатое международное совещание по применению ускорителей заряженных частиц в промышленности и медицине. Сборник докладов международной конференции. СПб.: СПбГУ, НИИ ВМ и ПУ, ВВМ, Санкт-Петербург, 10-14 октября 2005. 2005. 448 с.

206. Остапенко І.А., Вишневецький І.М., Ковалінська Т.В., Сахно В.І. Дослідження параметрів поля радіаційної установки ІЯД НАН України з метою проведення кваліфікаційних випробувань обладнання АЕС. XXI щорічна конференція Інституту ядерних досліджень НАН України : зб. тез доп. наук.-практ. конф., м. Київ, 27-31 січня 2014 р. Київ, 2014. С. 114.

207. Остапенко І.А., Ковалінська Т.В., Сахно В.І. Дослідження нетрадиційних методів вимірювання інтенсивних змішаних радіаційних полів. Міжнародна конференція молодих учених і аспірантів «ІЕФ-2013»: матеріали конф. м. Ужгород, 18-22 травня 2015 р. Ужгород, 2015. С.177-178.

208. Остапенко І.А., Ковалінська Т.В., Сахно В.І. Проект удосконаленого дослідницького радіаційного комплексу ІЯД НАН України. Науковий вісник Ужгородського університету. Серія фізика. 2014. №35. С. 167-171.

209. Остапенко І.А., Ковалінська Т.В., Сахно В.І. Характеристики лічильника СИ5007 в оберненому включенні. Науковий вісник Ужгородського університету. Серія фізика. 2015. №38. С. 141-148.

210. Патент 2089073 Российская Федерация, МКП А 23 L 1/025, А 61 L 9/22. Способ получения потоков аэроионов при атмосферном давлении и устройство для его осуществления/ Сахно В. И, Демьянов А.В, Горшкова М.М., Блинов Ю.Г. - авторы; патентообладатель - Тихоокеанский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии; - 95107625/13; заявл. 12.05.1995; опубл. 10.09.1997.

211. Патент 2104648 Российская Федерация, МКП А 23 В 4/015. Способ снижения скорости созревания пресервов из рыбы / Б.Л. Нехамкин, В.В. Голенкова, В.И. Сахно - авторы; патентообладатель - Атлантический научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии; - 96121846/13; заявл. 12.11.1996; опубл. 20.02.1998.

212. Патент 2115321 Российская Федерация, МКП А 23 В 4/00. Общие способы консервирования мяса, колбасных изделий, рыбы или рыбных продуктов/ Сахно В. И, Горшкова М.М., Акулин В.Н., Блинов Ю.Г., Стрельцова О.И., Солодова Е.А. - авторы; патентообладатель - Тихоокеанский научно-исследовательский

институт рыбного хозяйства и океанографии; - 96124404/13; заявл. 27.12.1996; опубл. 20.07.1998, Бюл. № 20.

213. Патент № 2061501 Российская Федерация, МКП А 61 L 9/22. Ионизатор газа/ Сахно В.И., Демьянов А.В, Горшкова М.М., Блинов Ю.Г. - авторы; патентообладатель - Тихоокеанский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии; - 93055185/13; заявл. 10.12.1993; опубл. 10.06.1996.

214. Патент на винахід Україна 27628. МКП 6 А 23 В4/015. Спосіб зниження швидкості дозрівання пресервів з риби / В. І. Сахно, Б. Л. Нехамкін, В. В. Голенкова - автори; власник - Атлантичний науково-дослідний інститут рибного господарства і океанографії; - № 97073807; заявл. 16.07.97; опубл. 15.09.2000, Бюл. №4.

215. Патент Укр. № 93815 Спосіб радіаційно-хімічного зміцнення цементного каменю Д.Ю.Колесник, О.М.Файнлейб, Н.Г. Лекішвілі, В.І. Сахно

216. Патент України № 50519. Спосіб отримання поліціанурату. Зареєстровано у Державному реєстрі патентів України на корисні моделі 10.06.2010.

217. Певчев Ю.Ф. Финогенов К.Г. Автоматизация физического эксперимента. М., Энергоатомиздат. 1986. 386 с.

218. Полімербітумна композиція: пат. № 107760 Україна. № 201313780; заявл. 27.11.2013; опубл. 10.02.15, Бюл. № 3. 5 с.

219. Полімербітумна композиція: пат. № 108432 Україна. № 201313781; заявл. 27.11.2013; опубл. 27.04.15, Бюл. № 8. 5 с.

220. Полімербітумна композиція: пат. №108433 Україна. № 201313782; заявл. 27.11.2013; опубл. 27.04.15, Бюл. № 8. 6 с.

221. Полімербітумна композиція: пат. №108434 Україна. № 201313783; заявл. 27.11.2013; опубл. 27.04.15, Бюл. № 8. 7 с.

222. Прайс Б.И Защита от ядерных излучений. Пер. с англ. М., Иностран. лит. 1959. 89 с.

223. Применение европия в гамма-радиационных технологиях. Материалы научной конференции, Харьков. 2004. С. 64.



224. Пучеров Н.Н., Борзаковский А.Е., Романовский С.В., Чеснокова Т.Д. Таблицы пробегов заряженных частиц с энергией до 8 МэВ. Наукова думка. Киев.1977. С 314.

225. Пучеров Н.Н., Романовский С.В., Чеснокова Т.Д. Таблицы массовой тормозной способности и пробегов заряженных частиц с энергией 1 – 100 МэВ. Наукова думка. Киев. 1975. С. 296.

226. Радиация. Дозы, эффекты, риск. пер. с англ. М., Мир. 1988. 79 с.

227. Радіаційні зміни органічних матеріалів поширених у виробництві кабельних виробів, що застосовуються на АЕС: звіт про НДР (заключний) ІЯД НАН України; кер. Т.В. Ковалінська. Київ, 2012. 58с. № 0111U007039.

228. Розробка нових методів та технічних засобів радіаційних випробувань обладнання АЕС: звіт про НДР (заключний) ІЯД НАН України; кер. В.І. Сахно. Київ, 2008. 58с. № 0107U004926.

229. Розробка нових радіаційно-технологічних методів подовження термінів експлуатації бетонних конструкцій на об'єктах атомної енергетики: звіт про НДР (проміжний) ІЯД НАН України; кер. Т.В. Ковалінська. Київ, 2014. 51 с. №0113U005377.

230. Розробка радіаційних технологій отримання та дослідження методів застосування гідролізних наноматеріалів для ядерної та традиційної медицини: звіт про НДР (заключний) ІЯД НАН України; кер. В.І. Сахно. Київ, 2018. 94 с. № 0116U002989.

231. Розробка та дослідження параметрів датчика струму пучка електронів радіаційної установки ІЯД. Збірник наукових праць ІЯД. 2003. №2 (10). С. 146-149.

232. Рубин Б.И., Гочалиев Г.З. Распределение поглощенной дозы по глубине облучаемого объекта на ускорителях электронов. 1989. Т. 66. Вып. 5. май 1989. С. 324-328.

233. Рубин Б.И., Гочалиев Г.З. Распределение поглощенной дозы по глубине облучаемого объекта на ускорителях электронов. Атомная энергия. 1989. Т.66. Вып. 5. май 1989. С. 324-328.

234. Рыба провесная аэроионной обработки. Технические условия. ТУ9263-047-00472012-97.

235. Рябухин Ю.С., Шальнов А.В. Ускоренные пучки и их применение. М., Атомиздат. 1980. 192 с.

236. Саблин Н.И. Надежностные характеристики и оптимизация ремонтно-профилактических работ эксплуатируемых ускорителей. Материалы Всесоюзного научно-технического совещания по использованию ускорителей в народном хозяйстве. Л., НИИЭФА 1971. 108 с.

237. Санитарные правила размещения и эксплуатации ускорителей электронов с энергией до 100 МэВ. М. № 1858-78, МЗО СССР, 1981. 145 с.

238. Сахно А.В., Сахно В.И., Томчай С.П. Устройство контроля охлаждения оборудования ускорителя // Збірник наукових праць ІЯД. – 2002. - №1(7). - С.179-182.

239. Сахно В. И., Нехамкин Б. Л., Голенкова В. В. Технология низкотемпературной пастеризации пресервов // Новые направления в области традиционных технологий переработки рыбы: сб. науч. трудов. – Изд.-во АтлНИРО, Калининград, 1996.- С.116.

240. Сахно В.І. Дослідження механізмів структурної модифікації біосировини під дією аероіонів // Рибне господарство України. - 1999. - №3. - С.75 – 77.

241. Сахно В.И. Высокопроизводительный генератор аэроионов для промышленных технологий // Вопросы атомной науки и техники: Сер. физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение. - 1998. - Вып.1(67), 2(68).- С.171.

242. Сахно В.И. Жук В.В., Можжухин Э.Н. Стабилизированный источник питания магнита СП-61. Вопросы атомной науки и техники. Харьков. 1983. Вып. 2 (21). С. 29.

243. Сахно В.И. Новые возможности электрофизики в технологиях морепродуктов // сб. трудов Международ. конференции «Повышение качества

рыбной продукции - стратегия развития рыбопереработки в XXI веке». (г. Калининград, 03-08 сентября 2001г.). - С.44

244. Сахно В.И. Радиационная установка для технологических исследований и производства дорожных покрытий. XIII Международная конференция по физике радиационных явлений и радиационному материаловедению. Тезисы докладов (Алушта, Украина, 08-13 сентября). 2008. С. 396.

245. Сахно В.И. Техническая диагностика и защита оборудования ядерно-физических установок К., ИЯИ. 1995. 8 с.

246. Сахно В.И. Электрофизический комплекс ИЯИ НАН Украины для облучения пищевых продуктов. Сборник докладов 11-го международного совещания по применению ускорителей заряженных частиц в промышленности и медицине. С.-Петербург. 2005. С. 403-406.

247. Сахно В.И., Аристов А.И., Иванов Ю.В., Ключников А.А. Исследование и разработка источников силового стабилизированного питания линз тракта транспортировки пучка. К., Препринт / АН УССР, Киевский ин-т ядерных иссл.; КИЯИ-89-11ИЯИ. 1989.12 с.

248. Сахно В.И., Иванов Ю.В., Соколова Н.А. Автоматическая система технической диагностики и защиты ускорителя. В сб. 12 Вс. совещ. по ускорителям заряженных частиц. Тез. докл., М. 1990. С. 67.

249. Сахно В.И., Михнева Е.Г., Ковалинская Т.В., Лебская Т.К. Исследование возможностей применения ионизирующих излучений в качестве инструмента пищевых технологий. VII Міжнародна науково-практична конференція вчених, аспірантів і студентів НУБіП України : збірник праць, м. Київ, 27-28 квітня 2017 р. Київ, 2017. С. 253-254.

250. Сахно В.И., С. П. Томчай. Исследование физико-технических проблем создания технологической линии лучевой пастеризации рыбных продуктов питания // Сб. докладов АтлантНИРО. – Калининград. - 2005.- С.41.

251. Сахно В.И., Сахно А.В., Зелинский А.Г., Томчай С.П., Хрин Т.В. Разработка технологических процессов радиационной модификации

фиброматериалов с применением ускорителей заряженных частиц. Ядерні та радіаційні технології. 2007. Т.7. № 1-2. С. 14-18.

252. Сахно В.И., Томчай С. П. Опыт и перспективы использования радиационных технологических процессов в рыбной промышленности // Рыбное хозяйство Украины. – 2000. - №3-4.

253. Сахно В.И., Томчай С. П. Пищевые технологии с использованием электро-физических установок // XVIII конференция по ускорителям заряженных частиц «PUPAC –2002».- 2002.- Т.2.- С.826

254. Сахно В.И., Томчай С. П. Электрофизические способы обработки рыбы // Сб. докладов АтлантНИРО. – Калининград. - 2005.- С.43.

255. Сахно В.И., Томчай С. П., Хрин Т.В. Исследования путей использования радиационных технологий для утилизации промышленных отходов и изношенных гумовых изделий // Инженер. Технолог. Рабочий.- 2007. - №5(77). С.2-3

256. Сахно В.И., Томчай С. П., Шлапацкая В.В.. Аэроионные технологии рыбных пресервов // сб. трудов Международ. конференции «Повышение качества рыбной продукции - стратегия развития рыбопереработки в XXI веке». (г. Калининград, 03-08 сентября 2001г.). - С.114

257. Сахно В.И., Томчай С. П.. Аэроионные технологии рыбных пресервов // Рыбное хозяйство Украины. - 2002. - №1. - С.35-37

258. Сахно В.И., Томчай С. П.. Технические и технологические проблемы регенерации бутилкаучука из промышленных отходов и изношенных изделий // IV международная конференция «Материалы и покрытия в экстремальных условиях: исследования, применение, экологически чистые технологии производства и утилизации изделий» // под ред. Академика НАН Украины В. В. Скорохода. (Большая Жуковка, Крым, 18 – 22 сентября). - 2006.

259. Сахно В.И., Томчай С.П., Закусило О.К. Исследование перспектив создания систем технологической защиты оборудования ЭФУ на ранних стадиях формирования аварийных ситуаций. ИЯИ, Препринт. НАН Украины, Киевский ин-т ядерных иссл.; КИЯИ-95-4. 1995. 6 с.

260. Сахно В.И., Томчай С.П., Сахно О.В. Дослідження радіаційно-стимульованих факторів деградації обладнання АЕС. Збірник наукових праць ІЯД. 2001. №1(3). С. 102-105.

261. Сахно В.И., Томчай С.П., Сахно О.В., Зелинский А.Г., Хрин Т.В., Халова Н.В. Особенности построения технических средств для пиковолновых технологий // VI Международная научно-практическая конференция «Производство рыбной продукции: проблемы, новые технологии, качество». (г. Светлогорск, Россия, 3-10 сентября). 2005.

262. Сахно В.І Діагностика пучка в радіаційно-технологічній установці з лінійним прискорювачем електронів. Вопросы атомной науки и техники. Сер.: Ядерно-физические исследования. 1999. №4 (35). С. 66-67.

263. Сахно В.І. Проблеми оптимізації протирадіаційного захисту промислових радіаційних технологічних установок. XVI Міжнародна конференція по фізиці радіаційних явищ та радіаційном матеріалознавстві. (Алушта, Крим, 6-11 вересня). 2004. С. 286.

264. Сахно В.І. Створення електрофізичних радіаційних установок та дослідження змін властивостей матеріалів при промислових радіаційних технологіях: дис. ... д-ра. технічних наук: 01.04.16/ ІЯД НАН України . Київ, 2009. 349с.

265. Сахно В.І. Створення електрофізичних радіаційних установок та дослідження змін властивостей матеріалів при промислових радіаційних технологіях. Автореферат дисертації, Київ, 2009 р. 36 с.

266. Сахно В.І., Вишневський І.М., Сахно О.В., Зелінський А.Г., Томчай С.П., Хрін Т.В. Проблеми радіаційних випробовувань кабелів АЕС на установці ІЯД. Вопросы атомной науки и техники. Сер.: Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение (91). 2007. № 6. С. 128-130.

267. Сахно В.І., Вишневський І.М., Зелінський А.Г., Ковалінська Т.В., Остапенко І.А., Халова Н.В. Дослідження та розробка прискорювача 0,5 МеВ для експериментального радіаційного комплексу. XXI щорічна конференція Інституту

ядерних досліджень НАН України : зб. тез доп. наук.-практ. конф., м. Київ, 27-31 січня 2014 р. Київ, 2014. С. 121.

268. Сахно В.І., Вишневський І.М., Зелінський А.Г., Томчай С.П., Сахно А.В. Система вимірювання розподілу полів випромінювання на радіаційній установці ІЯД. Збірник наукових праць Інституту ядерних досліджень. 2004. №2 (13). С. 159-162.

269. Сахно В.І., Горшкова М.М., Блінов Ю.Г., Солодова Е.А. Компанец, О.В. Бірюкова, І.В. Патент України № 56160, Бюл.№5, 2003.

270. Сахно В.І., Жернов О.А., Ковалінська Т.В., Сахно Л.О., Ніколаєв В.Г., Іванов Ю.В. Аналіз спектра гідролізатів радіаційної технології модифікації медичних розчинів. XXV щорічна конференція Інституту ядерних досліджень НАН України : зб. тез доп. наук.-практ. конф., м. Київ, 16-20 квітня 2018 р. Київ, 2018. С. 225-226.

271. Сахно В.І., Іванов Ю.В., Ковалінська Т.В., Жернов О.А., Зелінський А.Г. Дослідження шляхів експлуатації потужного промислового прискорювача при низьких і наднизьких струмах пучка. XXV щорічна конференція Інституту ядерних досліджень НАН України : зб. тез доп. наук.-практ. конф., м. Київ, 16-20 квітня 2018 р. Київ, 2018. С. 140-141.

272. Сахно В.І., Ковалінська Т.В., Вишневський І.М., Зелінський А.Г., Остапенко І.А. Удосконалена система вимірювань змішаних  $\beta$ -,  $\gamma$ -полів у реакційній камері радіаційної установки ІЯД НАН України. XXII щорічна конференція Інституту ядерних досліджень НАН України : зб. тез доп. наук.-практ. конф., м. Київ, 26-30 січня 2015 р. Київ, 2015. С. 109.

273. Сахно В.І., Ковалінська Т.В., Вишневський І.М., Зелінський А.Г., Остапенко І.А. Техніка та методи радіаційних вимірювань у дослідженнях на пучках електронів 4 МеВ радіаційної установки ІЯД. XXII щорічна конференція Інституту ядерних досліджень НАН України : зб. тез доп. наук.-практ. конф., м. Київ, 26-30 січня 2015 р. Київ, 2015. С. 109-110.

274. Сахно В.І., Ковалінська Т.В., Вишневський І.М., Зелінський А.Г., Остапенко І.А., Халова Н.В. Дослідження та розробка прискорювача 0.5 МеВ для

експериментального радіаційного комплексу. XXII щорічна конференція Інституту ядерних досліджень НАН України : зб. тез доп. наук.-практ. конф., м. Київ, 26-30 січня 2015 р. Київ, 2015. С. 110-111.

275. Сахно В.І., Томчай С.П., Сахно О.В. Дослідження радіаційно-стимульованих факторів деградації обладнання АЕС // Збірник наукових праць ІЯД. - 2001. - №1(3). - С.102-105.

276. Сахно В.І., Томчай С.П.. Дослідження аероіонних процесів та розробка технологічних установок // Збірник наукових праць ІЯД. – 2001. - №1(3).- С.122-126

277. Сахно В.І., Томчай С.П. Патент України № 61086 Бюл.№11, 2003

278. Сахно В.І., Шлапацька В.В., Солодовнік Л.В., Томчай С.П.. Проблеми практичної реалізації радіаційної технології регенерації бутылкаучукових відходів // Ядерні і радіаційні технології. – 2004. – Т.4. - №3 - С.23-27

279. Сахно В.І.. Дослідження механізмів структурної модифікації біосировини під впливом аероіонів // Рыбное хозяйство Украины. – 1999. - №3. - С.42-44

280. Сахно В.І.. Створення електрофізичних радіаційних установок та дослідження змін властивостей матеріалів при промислових радіаційних технологіях [Текст] : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня доктор техн. наук : спец. 01.04.16 – «Фізика атомного ядра, елементарних частинок і високих енергій». - Київ, ІЯД НАН України. – 2009. – С.32.

281. Сахно О.В. Дослідження і розробка методів та технічних засобів радіаційних випробувань обладнання АЕС на електрофізичних установках: дис. ... канд. технічних наук: 05.14.14/ ІЯД НАН України. Київ, 2008. 120с.

282. Свињин М.П. Расчет и проектирование высоковольтных ускорителей для радиационной технологии. М., Энергоатомиздат. 1989. 143 с.

283. СН 245-71. Санитарные нормы проектирования промышленных предприятий.

284. Совещание по дозиметрии интенсивных потоков ионизирующих излучений. Тез. докл. М., изд. ВНИИФТРИ. 1992. С. 136.

285. Спектор С.А. Электрические измерения физических величин. Л., Энергоатомиздат. 1987. 320 с.

286. Способ приготовления пищевых продуктов и устройство для его осуществления / В.И Сахно, М.М. Горшкова, Ю.Г Блинов и др. - с. 97-119544/13 (020505), 1997

287. Стародубцев С.В., Романов А.М. Взаимодействие гамма-излучения с веществом. Ташкент. 1964. 67 с.

288. Стародубцев С.В., Романов А.М. Прохождение заряженных частиц через вещество. Ташкент Изд. АН УССР. 1962. 362с.

289. Ступин Ю.В. Методы автоматизации физических экспериментов и установок на основе ЭВМ. М., Энергоатомиздат. 1983. 288 с.

290. Трековая мембрана – продукт высоких технологий. Официальный сайт предприятия «Реатрек-Фильтр». Режим доступа: <https://reatrack.ru>.

291. Уроки аварий на промышленных облучательных установках. STI/PUB/1015, ISBN 92-0-403597-8. Бюлл. МАГАТЭ, Вена. 1997. 66 с.

292. Ускоритель «Электроника». Проспект ЦНИИИ «Электроника. 4 с.

293. Установка аэроионной обработки пищевых рыбных продуктов. Технические условия НЗ-ИАЭУ.00.000 ТУ. - г.Владивосток, 1998.

294. Флеров Г.Н., Апель П.Ю., Дидык А.Ю., Кузнецов В.И., Оганесян Р.Ц. «Использование ускорительной техники для изготовления ядерных мембран» Атомная энергия. Т. 67. 1989. С. 274-280.

295. Флеров Г.Н., Барашенков В.С. Практическое применение пучков тяжелых ионов. М. УФН, т1974, т. 114, с. 351.

296. Хомич І.А., Ковалінська Т.В., Сахно В.І. Радіаційні проблеми функціональних випробувань обладнання АЕС на електрофізичній установці ІЯД НАН України. Національний вісник Ужгородського університету. Серія Фізика. 2019. №45. С. 61–72.

297. Хомич І.А., Ковалінська Т.В., Сахно В.І., Іванов Ю.В. Ефективність та перспективи реалізації заходів кваліфікації обладнання, важливого для безпеки у



вітчизняній ядерній енергетиці. Ядерна фізика та енергетика. 2020. Т.21. №4. С. 369-376.

298. Хомич І.А., Ковалінська Т.В., Сахно В.І., Іванов Ю.В. Проблеми та засоби формування радіаційних полів для функціональних випробувань і кваліфікації електротехнічного обладнання АЕС. Ядерна фізика та енергетика. 2019. Т. 20. № 4. С. 420-427.

299. Хомич І.А., Сахно В.І., Ковалінська Т.В. Аналіз результатів кваліфікації обладнання у вітчизняній атомній енергетиці. XXVII щорічна конференція Інституту ядерних досліджень НАН України. До 50-річчя ІЯД НАН України: зб. тез доп. наук.-практ. конф., м. Київ, 21-25 вересня 2020 р. Київ, 2020. С. 153–154.

300. Шубин В.Н. Брусенцева С.А., Никонорова Г.К. Радиационно-полимеризационная очистка производственных стоков. Под ред. П.И.Долина. Москва. 1979. 136 м.- (Атомиздат).

301. Щедрин И.С., Дворников В.А, Кузьмин И.А. Линейные ускорители электронов МУЛ МИФИ для радиационных технологий. Сб. докл. XI междунар. совещ. по применению ускорителей заряженных частиц в промышленности и медицине. С-Петербург. 2005. С. 136-139.

302. Дослідження впливу іонів низьких енергій на структури матеріалів (заключний) ІЯД НАН України; кер. В.І. Сахно. Київ, 2008. 258с. ДР №0112U003596.

303. Ковалінська Т.В., Римаренко Т.І., Сахно В.І. Електрофізична інноваційна технологія рибної кулінарії з комбінації морських і прісноводних риб // Інтегроване управління водними ресурсами. Київ. 2013. №1. С.294-306.