

<https://doi.org/10.31891/2219-9365-2023-75-3>

УДК 006.86:615.074:615.099-056.2:621.039:543.6:351.773

ЗАЙЦЕВ Сергій

Національний університет «Одеська політехніка»

<https://orcid.org/0000-0002-1166-3243>

e-mail: sdjavdet@ukr.net

ЗАЙЦЕВ Андрій

Одеський національний медичний університет

<https://orcid.org/0000-0002-6467-5168>

e-mail: zaitsevandrii1@gmail.com

МЕТОДИ ВИЗНАЧЕННЯ ШКІДЛИВИХ РЕЧОВИН У ПОВІТРІ ПРИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ОБЛАДНАННЯ АТОМНОЇ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ

Представлені результати дослідження джерел виникнення шкідливих радіоактивних і нерадіоактивних речовин та методи визначення їх вмісту в повітрі при експлуатації обладнання двоконтурної атомної електростанції. Доведено, що при експлуатації обладнання двоконтурної АЕС в навколишнє повітря поступають шкідливі речовини, які далі можуть потрапляти в органи дихання людини у вигляді радіоактивних або нерадіоактивних речовин; значущими методами визначення вмісту шкідливих радіоактивних та нерадіоактивних речовин у повітрі є: газова хроматографія; газова хромато-мас-спектрометрія; рідинна сцинтиляція; фотометричні, іонметричні, полярографічні, титриметричні, турбидиметричні, атомно-абсорбційні, радіометричні та γ-спектрометричні вимірювання; запропоновано удосконалену структурну схему 7-ми каналного газового хроматографа для визначення в навколишньому повітрі обладнання атомної електростанції вмісту пароподібних та(або) газоподібних шкідливих речовин.

Ключові слова: шкідливі радіоактивні речовини, шкідливі нерадіоактивні речовини, повітря, екологічний моніторинг, атомна енергетика, методи вимірювань.

ZAITSEV Sergii

National University "Odesa Polytechnic"

ZAITSEV Andrii

Odesa National Medical University

METHODS OF DETERMINING HAZARDOUS SUBSTANCES IN THE AIR DURING OPERATION OF NUCLEAR POWER PLANT EQUIPMENT

The article presents the results of studying the sources of harmful radioactive and non-radioactive substances and methods for determining their content in the air during the operation of equipment of a double-circuit nuclear power plant (NPP). Purpose: to identify appropriate methods for determining the content of harmful radioactive and non-radioactive substances in the air during operation of NPP equipment to ensure its reliability, radiation and environmental safety, and further improve methods and means for protecting human health. Methods: analytical analysis of the sources of harmful radioactive and non-radioactive substances and modern methods for determining their content in the air during the operation of equipment of a double-circuit NPP. Results: the most significant radioactive and non-radioactive substances in the air during the operation of equipment of a double-circuit NPP are: ^{41}Ar , ^{85}Kr , $^{85\text{m}}\text{Kr}$, ^{87}Kr , ^{88}Kr , ^{133}Ce , $^{133\text{m}}\text{Ce}$, ^{135}Ce , $^{135\text{m}}\text{Ce}$, ^{131}I , ^{133}I , ^{135}I , HTO, DTO, T2O, HT, DT, T2, CH3T, ^{137}Cs , ^{134}Cs , ^{238}Pu , ^{239}Pu , ^{240}Pu , ^{89}Sr , ^{90}Sr , ^{91}Sr , ^{51}Cr , ^{54}Mn , ^{55}Mn , ^{59}Fe , ^{58}Co , ^{60}Co , $^{110\text{m}}\text{Ag}$, ^{95}Nb , NO, NO2, HNO3, SO2, SO3, H2SO4, SF6, H2O2, Cl2, HCl, H2S, CS2, CCl4, NH3, NaOH, KOH, HCN, COCl2, hydrazine, acetic acid, formaldehyde, perfluorooctylene, freons; elements, organic and inorganic compounds of elements - Al, Si, B, V, W, Fe, Cd, Ca, Co, Mn, Cu, Ni, Mo, Sn, Pb, Ti, Cr, Zn, Zr, fluorine salts, HF, O3; an improved structural diagram of a 7-channel gas chromatograph for determining the content of vapour and (or) gaseous harmful substances in the ambient air of NPP equipment is proposed. Conclusions: during the operation of the equipment of a double-circuit NPP, harmful substances are released into the ambient air, which can then enter the human respiratory system in the form of radioactive or non-radioactive substances; the most important methods for determining the content of harmful radioactive and non-radioactive substances in the air are gas chromatography; gas chromatography-mass spectrometry; liquid scintillation; photometric, ionometric, polarographic, titrimetric, turbidimetric, atomic absorption, radiometric and γ-spectrometric measurements.

Key words: harmful radioactive substances, harmful non-radioactive substances, air, environmental monitoring, nuclear energy, measurement methods.

Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

Основними об'єктами атомної енергетики є атомні електростанції з використанням керованих ядерних реакцій у ядерних реакторах. Викиди з обладнання атомних електростанцій в атмосферу негативно впливають на навколишнє середовище і здоров'я людини. Україна має розвинену ядерну енергетичну галузь, основу якої складають двоконтурні атомні електростанції (АЕС) – Хмельницька, Рівненська, Запорізька та Південно-Українська. Ці АЕС є об'єктом підвищеної небезпеки, а тому перспективи їх розвитку пов'язані з питаннями їх безпечного функціонування та захисту територій, цивільного населення та навколишнього природного середовища на території розміщення станції; за різних негативних факторів (порушення технологічних процесів, меж і умов безпечної експлуатації, техногенні аварії та інциденти,

природні явища, диверсії з терористичною метою, бойові дії тощо) на АЕС можуть виникати надзвичайні ситуації, які створюють значний ризик для природного середовища, здоров'я персоналу та населення прилеглих територій [1]. Це потребує безперервного дослідження джерел виникнення шкідливих радіоактивних та нерадіоактивних речовин та сучасних методів визначення їх вмісту в повітрі при експлуатації обладнання АЕС.

Аналіз досліджень та публікацій

АЕС внаслідок накопичення в процесі експлуатації значних кількостей радіоактивних продуктів і наявності принципової можливості виходу їх при аваріях за передбачені межі представляють собою джерело потенційної небезпеки або джерело ризику радіаційного впливу на персонал, населення і навколишнє середовище [2]. Відомо, що: а) для забезпечення безперервної роботи АЕС на їх території розташовані та функціонують різні допоміжні техногенні об'єкти, які здійснюють викиди та скиди нерадіаційних забруднюючих речовин в навколишнє середовище; б) протягом всього періоду експлуатації АЕС за різних негативних обставин технічного та природного характеру (порушення технологічного процесу, вибух обладнання через влучення блискавки, несприятливі метеорологічні умови, несанкціоновані викиди тощо) можуть виникати надзвичайні ситуації, зумовлені значним хімічним забрудненням довкілля в зоні спостереження АЕС, та які здатні призвести до матеріальних збитків і людських жертв; в) найбільш хімічно небезпечними техногенними об'єктами на території АЕС є пуско-резервна котельня, дизель-генераторні станції, маслосмазутне господарство, зварювальні дільниці, дільниці металообробки, бакове господарство хімічних реагентів, автозаправочна станція, а також обладнання, що містить озоноруйнуючі хладагенти (фреони) та інші [3]. В результаті їх функціонування утворюються різні забруднюючі речовини, які викидаються в атмосферу через димові труби. Основними забруднюючими речовинами є: оксиди азоту, сполуки сірки, оксиди вуглецю, суспендовані тверді частинки, сполуки хлору, сполуки фтору, сажа, неметанові леткі органічні сполуки, CH_4 , NH_3 , метали та їх сполуки, фреони тощо [3]. Так, в процесах нормованої експлуатації або аварій обладнання Рівненської АЕ, джерелами потрапляння шкідливих радіоактивних та нерадіоактивних речовин в атмосферне повітря, є: реакторне відділення з ядерними енергетичними установками; системи установки для витримки газових здувок в період перевантаження ядерного палива; спеціальні вентиляційні системи; блок термо-каталітичного спалення потоків газоподібного водню; технічні системи для забезпечення водно-хімічних режимів оборотного охолодження обладнання першого та другого контурів ядерних енергетичних установок; спеціальна каналізація; система очищення води реакторного контуру; система очищення продувної води реакторного контуру і організованих протікань; система очищення трапних вод; система очищення вод басейнів і баків аварійного запасу борної кислоти; система очищення продувної води парогенераторів; система регенерації борної кислоти; система очищення стічних вод спеціальних пралень; підрозділ зрідження атмосферного повітря для отримання кисню та азоту із застосуванням для охолодження фреонів; установки для охолодження водню в турбогенераторі із водневим охолодженням із застосуванням фреонів; підрозділ технічного обслуговування та ремонту із дільницями для механічної обробки, газового та електричного різання або зварювання металевих і пластмасових конструкцій (зварювання, різання, наплавлення, напилення); обладнання для установок вентиляції; підрозділ забезпечення автомобільним транспортом; теплова та електрична станції для власних потреб АЕС із застосуванням рідкого палива – мазуту; дизельні електростанції для аварійного електрозабезпечення АЕС; технічні системи забезпечення питною водою; технічні системи очищення стічних вод для виведення їх в водойми; хімічні лабораторії; лабораторії дозиметричного контролю; склади з твердими та рідкими радіоактивними відходами АЕС, які виведені з експлуатації, із системами вентиляції; установка виготовлення газоподібного H_2 та O_2 за електролізом водних розчинів; установки для поводження з твердими та рідкими радіоактивними відходами з системами вентиляції; хімічний склад із системами вентиляції; склад з мінеральними енергетичними оливами; склад з синтетичними вогнестійкими енергетичними оливами; склад з дизельним паливом [4–6]. Одним з пріоритетних напрямків національної безпеки в Україні є забезпечення радіаційно-безпечних умов життєдіяльності громадян і суспільства, збереження навколишнього середовища та раціональне використання природних ресурсів, і реалізація цієї мети може бути виконана, в тому числі, за рахунок контролю вмісту радіоактивних і нерадіоактивних шкідливих речовин в навколишньому повітрі обладнання АЕС [7]. При цьому гострі ураження радіоактивними і нерадіоактивними шкідливими речовинами супроводжуються формуванням низки патологічних процесів: роздратуванням та запальними процесами в дихальних шляхах (гострий ларингіт і трахеобронхіт), паренхіми легень (гостра пневмонія), а також токсичним набряком легень [8]. Часто радіоактивні і нерадіоактивні шкідливі речовини знаходяться в повітрі у вигляді аерозолів, та мають дію пульмоноотоксичного та фіброгенного характеру, що підвищує ризик розвитку професійних патологій органів дихання. Відомо, що є зв'язок між присутністю радіоактивних і нерадіоактивних шкідливих речовин в повітрі при експлуатації обладнання АЕС у концентраціях, що перевищують встановлені норми, та перебігом захворювань органів дихання людини внаслідок її дихання таким повітрям [8]. Таким чином, є необхідність у безперервному дослідженні методів

визначення вмісту радіоактивних і нерадіоактивних шкідливих речовин в оточуючому повітрі обладнання АЕС.

Формулювання цілей статті

Метою роботи є виявлення відповідних методів визначення вмісту шкідливих радіоактивних та нерадіоактивних речовин в повітрі при експлуатації обладнання АЕС для забезпечення його надійності, радіаційної і екологічної безпеки, подальшого удосконалення методів та засобів для захисту здоров'я людей.

При виконанні дослідження в статті застосовано методи аналітичного аналізу джерел виникнення шкідливих радіоактивних та нерадіоактивних речовин та сучасних методів визначення їх вмісту в повітрі при експлуатації обладнання двоконтурної АЕС.

Виклад основного матеріалу

Навіть при абсолютній надійності і безаварійній роботі будь-яка АЕС істотно впливає на навколишнє середовище через газоаерозольні (зокрема, радіоактивні) викиди в атмосферу [9]. Більшість радіонуклідів, що містяться в газоаерозольних викидах, утримуються очисними фільтрами або швидко розпадаються, втрачаючи радіоактивність, але серед них є ще значна кількість, що потрапляє в навколишнє середовище та забруднює його, наприклад, сполуками трітійу (Т), такими, як Т₂, НТ, НТО, Т₂О, DTO, DT, СН₃Т. Крім звичайних газоаерозольних викидів будь-яка АЕС періодично викидає в атмосферу аерозолі, які утворюються в результаті корозії ядерного реактора і його першого контуру. Ці аерозолі містять радіонукліди, що є продуктом поділу ядер урану. Серед радіонуклідів найбільш значущими є: ⁵¹Cr; ⁵⁴Mg; ⁶⁰Co; ⁹⁵Nb; ¹⁰⁶Ru; ¹⁴⁴Ce та ін. Потрапляючи в біосферу, радіоактивні ізотопи або продукти їх розпаду зрештою залучаються в біохімічні та біофізичні процеси, які протікають всередині кожного живого організму. Деякі з цих ізотопів або продуктів їх розпаду небезпечні для всього живого, оскільки можуть порушити процеси обміну речовин. В роботі [9]: обґрунтована необхідність створення нових технологій та технічних засобів для виявлення аерозольних радіоактивних викидів АЕС та встановлення радіоекологічного моніторингу і контролю над ними в режимі реального часу; наведені основні технічні характеристики створеного комплексу контролю за α- та β-випромінюванням радіоактивних аерозолів. В роботах [10, 11] відзначено застосування таких ксенобіотиків, як NH₃, H₃BO₃, КОН, C₂H₇NO (моноетаноламін), C₄H₉NO (морфолін), N₂H₄ (гідазин) для забезпечення водно-хімічних режимів обладнання, в тому числі Запорізької АЕС. Під час експлуатації обладнання АЕС ці речовини можуть поступати в оточуюче повітря у вигляді пару, газу або аерозолу, а далі можуть потрапляти в органи дихання людини.

Аварії із розливом рідких радіоактивних середовищ, наприклад теплоносія першого контуру реакторної установки з реактором типу ВВЕР, призводять до підвищення концентрацій таких радіонуклідів, як ⁵¹Cr; ⁵⁴Mg; ⁶⁰Co; ⁹⁵Nb; ¹⁰⁶Ru; ¹⁴⁴Ce, у повітрі технологічного приміщення та у вентиляційних викидах [12, 13]. В роботі [14] показано, що для забезпечення водно-хімічного режиму системи технічного водопостачання відповідальних споживачів реакторного відділення та резервних дизельних електростанцій Рівненської АЕС застосовано такі ксенобіотики, як C₂H₈O₇P₂ (оксигетилідендифосфенова кислота) та NaOCl. В роботі [15] запропоновано технологію очищення промислових водних відходів АЕС, яка заснована на використанні природного мінерального сорбенту – бентоніту. Показано можливість очищення рідких радіоактивних відходів (РРАВ) на прикладі трапних вод, що мають значний сольовий вміст, а також енергетичні оливи та поверхнево-активні речовини. Для реалізації такої технології потрібно застосовувати озон (O₃) та ультразвукове опромінювання. В роботі [16] розглянуто процеси очищення стічних промислових вод за допомогою обробки їх озоном. В роботі [17] запропоновано технологію очищення промислових водних радіоактивних відходів АЕС із застосуванням O₃ і ультразвукової кавітації або електричного розряду, при високих значеннях рН рідких відходів. В роботі [18]: наведено критичний аналіз існуючих експериментальних і практично впроваджених окиснювальних способів руйнування металоорганічних комплексів РРАВ; висвітлено результати комбінованого окиснення (ультрафіолет і O₃), надкритичне окиснення за присутності пероксиду водню (H₂O₂), кавітаційний розряд із використанням озону). Показано, що сьогодні головним джерелом радіоактивних відходів (РАВ) в Україні є АЕС. Найбільшу та найнебезпечнішу частину загальної кількості РАВ становлять РРАВ, які характеризуються значними об'ємами, активністю та потенційною можливістю неконтрольованого надходження в природне середовище [18]. У процесі експлуатації АЕС із різних джерел утворюються та накопичуються радіоактивно забруднені стічні (трапні) води. До головних джерел формування трапних вод можна зарахувати: течу водного теплоносія першого контура АЕС та басейнів витримки ядерного палива; дезактиваційні водні розчини; злив спеціальних пралень і душових. Показано, що найбільш ефективним способом руйнування високостійких комплексів РРАВ сьогодні є їхній окиснювальний розклад або видалення органічних сполук за допомогою фізико-хімічних процесів – озонування, кавітації (електро-гідророзрядного методу), надкритичного водного окиснення (гідротермальної обробки), додавання у водні розчини H₂O₂ або застосування реагентів, що здатні утворювати окисники в процесі хімічних реакцій, наприклад KMnO₄ або

реагент Фентона [18]. Відомо, що радіоактивний йод – один із дозоутворюючих радіонуклідів при опроміненні населення від викидів ядерних реакторних установок [19–21]. Ізотоп йоду ^{131}I розглядається, як важливий фактор радіаційного впливу від викидів ядерних реакторів, і особливістю контролю викидів радіоактивного ізотопу йоду ^{131}I є облік різноманітності фізичних форм і хімічних сполук радіоактивного йоду, так як при взаємодії ^{131}I з водним теплоносієм і конструкційними матеріалами може утворюватися від 150 до 246 продуктів взаємодії радіоактивного йоду [22]. В роботах [5, 6] відзначено, що газоподібні радіоактивні відходи є газовими або аерозольними радіоактивними продуктами в повітрі. Газоповітряна суміш, що видаляється безпосередньо з технологічного обладнання АЕС, містить значну кількість їдких, токсичних та радіоактивних речовин. До складу домішок входять: а) інертні радіоактивні гази – ^{41}Ar , ^{85}Kr , $^{85\text{m}}\text{Kr}$, ^{87}Kr , ^{88}Kr , ^{133}Xe , $^{133\text{m}}\text{Xe}$, ^{135}Xe , $^{135\text{m}}\text{Xe}$; б) нукліди йоду ^{131}I , ^{133}I , ^{135}I ; в) радіоактивні аерозолі як суміш продуктів поділу ядерного палива – ^{131}I , ^{89}Sr , ^{90}Sr , ^{91}Sr , ^{103}Ru , ^{137}Cs , ^{141}Ce , ^{51}Cr , ^{54}Mn , ^{55}Mn , ^{59}Fe , ^{58}Co , ^{60}Co , ^{95}Zr , $^{110\text{m}}\text{Ag}$, ^{22}Na , ^{24}Na , ^{88}Rb , ^{99}Mo , ^{140}Ba , ^{140}La та ін.; г) продукти корозії конструкційних матеріалів, активованих в нейтронному потоці – ^{58}Co , ^{60}Co , ^{54}Mn , ^{110}Ag , ^{59}Fe , ^{51}Cr , ^{95}Zr , ^{95}Nb та ін.; д) продукти активації корегуючих домішок водного теплоносія ядерного реактору – ^{13}N , ^{16}N , ^{17}N , ^{18}F , ^7Li , ^{24}Na , ^1H , ^2H , ^3H , ^{14}C та ін.; д) сполуки ^{14}C в газоподібних викидах – CO , CO_2 , CH_4 , C_2H_6 , C_4H_{10} та ін. Визначення в повітрі вмісту газоподібних і пароподібних радіоактивних та нерadioактивних речовин – H_2O , H_2 , N_2 , O_2 , Ar , CO , CH_4 , CO_2 , C_2H_4 , C_2H_6 , C_2H_2 , C_3H_6 , C_3H_8 , C_4H_8 , C_4H_{10} , CH_3I , Kr , Xe , H_2O_2 , запропоновано виконувати за методами газової хроматографії (ГХ) [23]. У роботі [24] розглянуто результати досліджень у галузі радіаційних фізико-хімічних процесів, що відбуваються в повітряному середовищі під дією різних видів радіоактивного випромінювання, у тому числі в повітрі АЕС. Так, при радіоактивному опроміненні повітря у ньому утворюється O_3 (озон), який хімічно агресивний, легко вступає у хімічні реакції, у тому числі з органічними сполуками, та при інгаляційному надходженні в організм людини може призвести до захворювань органів дихання [25].

Газоподібний O_3 може бути застосовано для очищення відпрацьованих радіоактивних вод АЕС за рахунок деструкції та видалення органічних компонентів з цих вод [19]. При цьому, в навколишньому повітрі обладнання може бути накопичування O_3 в концентраціях, що призведуть до ураження органів дихання людей.

В роботі [26] описано комплекс із переробки твердих радіоактивних відходів з використанням їх плазмової переробки на Рівненській АЕС: при цьому утворюються піролізні гази, що містять токсичний компонент у вигляді CO , NO , NO_2 , SO_2 , SO_3 , HCN , які можуть потрапляти в навколишнє атмосферне повітря і далі в органи дихання людини. В Настанові СОУ-Н МЕВ 40.1-00100227-69:2012 «Виконання робіт з елегазом» та в роботі [27] показано, що під час експлуатації електротехнічного елегазового обладнання АЕС в навколишнє повітря може потрапляти елегаз (SF_6) та токсичні продукти його деградації: газоподібні – SOF_2 , F_2 , SOF_4 , SO_2F_2 , SO_2 , HF , CF_4 , SF_4 , WF_6 ; тверді – S_2 , CuF_2 , AlF_3 , FeF_3 . У роботах [28–30], а також в МУ 4945-88 «Методические указания по определению вредных веществ в сварочном аэрозоле (твердая фаза и газы)», показано, що при виконанні електрозварювальних робіт з використанням металевих конструкцій, в атмосферному повітрі накопичуються зварювальні аерозолі, що включають такі шкідливі індивідуальні речовини або їх з'єднання з іншими індивідуальними речовинами, як: тверді – Al , Si , B , V , W , Fe , Cd , Ca , Co , Mn , Cu , Ni , Mo , Sn , Pb , Ti , Cr , Zn , Zr , солі фтору; газоподібні – CO , CO_2 , O_3 , NO ; NO_2 , HF . Під час зварювальних робіт з використанням пластмасових конструкцій, в атмосферному повітрі накопичуються такі речовини, як: CO ; HCl ; HCN ; COCl_2 ; CH_2O (формальдегід); C_4H_6 (1,3-бутадиєн); $\text{C}_2\text{H}_6\text{O}$ (етанол); $\text{C}_3\text{H}_6\text{O}$ (ацетон); уайт-спірит; $\text{C}_2\text{H}_4\text{O}_2$ (оцтова кислота); $\text{C}_2\text{H}_2\text{O}_4$ (щавлева кислота); C_6H_6 (бензол); C_7H_8 (толуол); C_8H_{10} (ксилоли); $\text{C}_6\text{H}_6\text{O}$ (фенол); хлорангідриди карбонової кислоти; ненасичені вуглеводні; $\text{C}_2\text{H}_4\text{O}$ (ацетальдегід); $\text{C}_{16}\text{H}_{22}\text{O}_4$ (дибутилфталат); $\text{C}_{10}\text{H}_{10}\text{O}_4$ (диметилфталат); $\text{C}_{24}\text{H}_{38}\text{O}$ (ді-(2-етилгексил)-фталат); $\text{C}_2\text{H}_3\text{Cl}$ (вінілхлорид); CHCl_3 (хлороформ); CH_2Cl_2 (дихлорметан); $\text{C}_2\text{H}_4\text{Cl}_2$ (дихлоретан); $\text{C}_4\text{H}_8\text{O}_2$ (диоксан); C_4F_8 (перфторізобутилен); CS_2 [31, 32]. В роботах [33, 34], а також в СТО 1.1.1.01.001.0902-2013 «Кабельные изделия для атомных электростанций. Технические требования эксплуатирующей организации», показано, що фторопласти широко застосовуються в обладнанні АЕС. Під час нагріву таких фторопластів вони руйнуються з потраплянням в оточуюче повітря таких токсичних компонентів, як HF , C_4F_8 (перфторізобутилен); COF_2 (карбонілфторид); C_2F_4 (тетрафторетилен).

Так, в методичних вказівках МУ 2.6.1.15-02 «Третий и его соединения. Контроль величины индивидуальной эффективной дозы внутреннего облучения при поступлении в организм человека. Методические указания» показано можливість контролю величини індивідуальної ефективної дози внутрішнього радіоактивного опромінення при надходженні шкідливих речовин у вигляді радіоактивних сполук HTO , DTO , T_2O , HT , DT , T_2 , CH_3T в організм людини при вимірюванні об'ємної активності у виділеннях організму: в конденсаті парів води з повітря, що видихається та в сечі.

В Таблиці 1 наведено інформацію про найбільш значущі радіоактивні та нерadioактивні шкідливі речовини та методи визначення їх вмісту в повітрі.

Таблиця 1

Радіоактивні та нерадіоактивні шкідливі речовини та методи визначення їх вмісту в повітрі

ШПР; (МВ); [МВВ]	ШПР; (МВ); [МВВ]
⁴¹ Ar, ⁸⁵ Kr, ^{85m} Kr, ⁸⁷ Kr, ⁸⁸ Kr, ¹³³ Xe, ^{133m} Xe, ¹³⁵ Xe, ^{135m} Xe, ¹³¹ I, ¹³³ I, ¹³⁵ I; (RGSM); [IEC 60761-3; IEC 60761-4]	Елементи, органічні та неорганічні сполуки елементів: ¹³⁷ Cs, ¹³⁴ Cs, ²³⁸ Pu, ²³⁹ Pu, ²⁴⁰ Pu, ⁹⁰ Sr, ⁸⁹ Sr, ⁹⁰ Sr, ⁹¹ Sr, ⁵¹ Cr, ⁵⁴ Mn, ⁵⁵ Mn, ⁵⁹ Fe, ⁵⁸ Co, ⁶⁰ Co, ^{110m} Ag, ⁹⁵ Nb; (RGSM; RCR для ⁹⁰ Sr); [IEC 60761-2]
НТО, DTO, T ₂ O, НТ, DT, T ₂ , CH ₃ T; (RGSM); [IEC 60761-3; IEC 60761-4]	НТО, DTO, T ₂ O, НТ, DT, T ₂ , CH ₃ T в конденсаті парів води з повітря, що видихається та в сечі (LSM); [МУ 2.6.1.15-02]
HCN; (ГХ); [МУ 4775-88]	CCl ₄ ; (ГХ); [МУ 1577-77]
N ₂ H ₄ (гідразин); (PhMM); [МУ 1657-77]	H ₂ S; (ГХ); [МУ 5304-90]
NO, NO ₂ ; (PhMM); [МУ 4187-86]	CH ₃ I; (ГХ); [23]
HNO ₃ ; (ICh); [ISO 21438-2:2009]	C ₄ F ₈ (перфторізобутилен); (ГХ); [35]
C ₂ H ₂ O ₄ (щавлева кислота); (PhMM); [МУК 4.1.1732-03]	C ₁₆ H ₂₂ O ₄ (дибутилфталат); (ГХ); [МУ 2222-80]
C ₂ H ₄ O ₂ (оцтова кислота); (ГХ); [МУ 5904-91]	NH ₃ ; (PhMM); [МУ 4785-88]
C ₂ H ₇ NO (моноетаноламін); (PhMM); [МУ 2568-82]	H ₂ , CO, CH ₄ , CO ₂ , C ₂ H ₄ , C ₂ H ₆ , C ₂ H ₂ , C ₃ H ₆ , C ₃ H ₈ , C ₄ H ₈ , C ₄ H ₁₀ ; (ГХ); [ASTM D 3612-012]
Фреони; (PhMM); [МУ 1699-77]	SO ₂ , SO ₃ ; (PhMM); [МУ 4588-88]
H ₂ O ₂ ; (PhMM); [МУ 4586-88]	I ₂ ; (PhMM); [МУ 16446-77]
COCl ₂ ; (PhMM); [МУ 4768-88]	HCl; (IMM); [МУ 5932-91]
CS ₂ ; (ГХ); [МУ 3973-85]	H ₂ SO ₄ ; (TDA); [МУ 08-47/355-2014]
CH ₂ O (формальдегід); (GCh); [МУ 4595-85]	Cl ₂ ; (PhMM); [МУ 1644a-77]
SF ₆ ; (ГХ); [МУ 2697-83]	NaOH, KOH; (PhMM); [МУ 5937-91]
Елементи, органічні та неорганічні сполуки елементів: Al, Si, B, V, W, Fe, Cd, Ca, Co, Mn, Cu, Ni, Mo, Sn, Pb, Ti, Cr, Zn, Zr, солі фтору, HF, O ₃ ; (PhMM, IMM, PGA, AAA, GCh, TMA, AES); [ISO 15202-3:2004; МУ 4945-88]	CH ₂ Cl ₂ (дихлорметан); C ₂ H ₄ Cl ₂ (дихлоретан); C ₆ H ₆ (бензол); C ₇ H ₈ (толуол); C ₆ H ₆ O (фенол); (ГХ-МС); [ГОСТ Р ИСО 16017-1-2007; ISO 16017-1-2000]
Примітки: ШПР – шкідливі речовини; МВВ – методика виконання вимірювань; МВ – метод вимірювань; RGSM – радіометричні та гама-спектрометричні вимірювання; RCR – радіаційно-хімічне видалення; LSM – метод рідинної сцинтиляції; ГХ – газова хроматографія; PhMM – фотометричний аналіз; ICh – іонна хроматографія; IMM – іонометричний аналіз; TDA – турбидиметричний аналіз; TMA – титрометричний аналіз; PGA – полярографічний аналіз; AAA – атомно-абсорбційний аналіз; AES – атомна емісійна спектроскопія; ГХ-МС – газова хромато-мас-спектрометрія.	

На Рисунку 1 наведено запропоновану удосконалену структурну схему 7-ми каналного газового хроматографа для визначення в навколишньому повітрі обладнання АЕС вмісту пароподібних та(або) газоподібних шкідливих речовин, таких як: H₂, CH₄, C₂H₆, C₂H₄, C₃H₈, C₂H₂, CO, CO₂, O₂, N₂, H₂O(пар), H₂O₂(пар), CH₃I, C₄F₈ (перфторізобутилен); етанол, ацетальдегід, етилацетат, метилацетат, метанол, 2-пропанол, 1-пропанол, 2-метил-1-пропанол, 1-бутанол, 3-метил-1-бутанол, ацетон, бензол, толуол, хлорбензол, стирол, етилбензол, анілін, фенол, нітробензол; ізомери ксилолу, бутану, пентану, гексану, гептану, октану. Умови виконання вимірювань та метрологічні характеристики відповідають вимогам та метрологічним характеристикам, що наведені у МВВ, які відзначені в Таблиці 1.

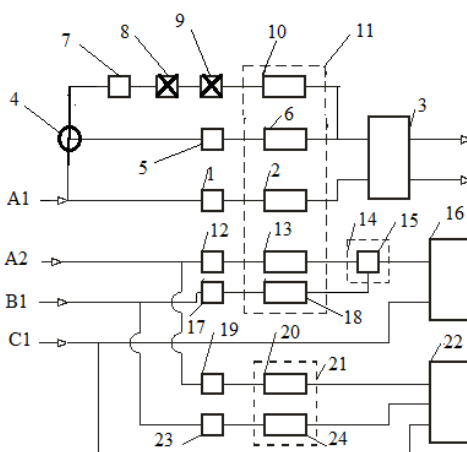


Рис. 1. Удосконалена структурна схема 7-ми каналного газового хроматографа для визначення вмісту пароподібних та(або) газоподібних шкідливих речовин в навколишньому повітрі обладнання АЕС: 1 – газовий кран-дозатор, що нагрівається; 2, 6, 10, 13, 18, 20, 24 – ГХ колонки; 3 – детектор за теплопровідністю; 4 – газовий кран-перемичкач; 5, 7, 12, 17 – газові крани-дозатори; 8 – термодесорбер; 9 – каталітичний реактор; 11, 14, 21 – термостати; 15 – метанатор; 16 – полум’яно-іонізаційний детектор; 22 – полум’яно-іонізаційний детектор (або полум’яно-фотометричний детектор; або детектор електронного захоплення); 19, 23 – випарники; А1 – газ-носії № 1; А2 – газ-носії № 2; В1 – водень; С1 – повітря.

Таким чином, отримані результати дослідження: показують, що під час експлуатації обладнання АЕС в навколишнє повітря можуть поступати радіоактивні та нерадіоактивні шкідливі речовини у вигляді пару, газу або аерозолу, які далі можуть потрапляти в органи дихання людини та наносити їм ураження; дозволяють вдосконалити методи та технічні засоби екологічного моніторингу навколишнього повітря обладнання АЕС для забезпечення радіаційної та екологічної безпеки, зниження ризиків професійних патологій для працівників, захисту здоров'я людей під час аварій або нормованої експлуатації обладнання АЕС.

Висновки з даного дослідження і перспективи подальшого розвитку у даному напрямі

1. Показано, що: а) під час експлуатації обладнання АЕС в навколишнє повітря можуть поступати у вигляді пару, газу або аерозолу шкідливих речовин, які далі можуть потрапляти в органи дихання людини у вигляді радіоактивних або нерадіоактивних речовин – ^{41}Ar , ^{85}Kr , $^{85\text{m}}\text{Kr}$, ^{87}Kr , ^{88}Kr , ^{133}Xe , $^{133\text{m}}\text{Xe}$, ^{135}Xe , $^{135\text{m}}\text{Xe}$, ^{131}I , ^{133}I , ^{135}I , НТО, DTO, T₂O, HT, DT, T₂, CH₃T, ^{137}Cs , ^{134}Cs , ^{238}Pu , ^{239}Pu , ^{240}Pu , ^{89}Sr , ^{90}Sr , ^{91}Sr , ^{51}Cr , ^{54}Mn , ^{55}Mn , ^{59}Fe , ^{58}Co , ^{60}Co , $^{110\text{m}}\text{Ag}$, ^{95}Nb , NO, NO₂, HNO₃, SO₂, SO₃, H₂SO₄, SF₆, N₂H₄, H₂O₂, Cl₂, HCl, H₂S, CS₂, CCl₄, NH₃, NaOH, KOH, HCN, COCl₂, оцтова кислота, формальдегід, перфторізобутилен, фреони; елементи, органічні та неорганічні сполуки елементів – Al, Si, B, V, W, Fe, Cd, Ca, Co, Mn, Cu, Ni, Mo, Sn, Pb, Ti, Cr, Zn, Zr, солі фтору, HF, O₃; б) значущими методами визначення вмісту шкідливих речовин в повітрі АЕС є: газова хроматографія; газова хромато-мас-спектрометрія; рідинна сцинтиляція; фотометричні, іонометричні, полярографічні, титриметричні, турбидиметричні, атомно-абсорбційні, радіометричні та γ-спектрометричні вимірювання; в) дії радіоактивних шкідливих речовин внаслідок радіоактивного опромінення організму в органах дихання призводять до розвитку клінічних і анатомічних ознак променевої патології; г) запропоновано удосконалену структурну схему 7-ми каналного газового хроматографа для визначення в навколишньому повітрі обладнання АЕС вмісту пароподібних та(або) газоподібних шкідливих речовин, таких як: H₂, CH₄, C₂H₆, C₂H₄, C₃H₈, C₂H₂, CO, CO₂, O₂, N₂, H₂O(пар), H₂O₂(пар), CH₃I, C₄F₈ (перфторізобутилен); етанол, ацетальдегід, етилацетат, метилацетат, метанол, 2-пропанол, 1-пропанол, 2-метил-1-пропанол, 1-бутанол, 3-метил-1-бутанол, ацетон, бензол, толуол, хлорбензол, стирол, етилбензол, анілін, фенол, нітробензол; ізомери ксилолу, бутану, пентану, гексану, гептану, октану.

2. Перспективність отриманих результатів досліджень полягає у можливості використання їх для удосконалення систем забезпечення: надійності, радіаційної і екологічної безпеки обладнання АЕС; захисту здоров'я і зниження ризиків професійних патологій при виникненні захворювань органів дихання людей під дією шкідливих речовин при експлуатації обладнання АЕС.

Література

1. Попов ОО, Яцишин АВ, Ковач ВО, Артемчук ВО, Тарадуда ДВ, Собина ВО, et al. *Аналіз можливих причин виникнення надзвичайних ситуацій на АЕС з метою мінімізації ризику їх виникнення. Ядерна та радіаційна безпека.* 2019; 1(81): 75–80. [https://doi.org/10.32918/nrs.2019.1\(81\).13](https://doi.org/10.32918/nrs.2019.1(81).13)
2. Одинець ВВ. *Оцінка безпеки персоналу АЕС у випадку аварійного викиду токсичних хімічних речовин.* Сучасні проблеми наукового забезпечення енергетики: матеріали XVIII Міжнародної науково-практичної конференції молодих вчених та студентів 2020 року. У 2 т. К.: КПІ ім. І.Сікорського. 2020; 1: 45
3. Попов ОО, Яцишин АВ, Ковач ВО, Артемчук ВО, Тарадуда ДВ, Собина ВО, et al. *Фізичні особливості розповсюдження забруднюючих речовин в атмосферному повітрі за умов надзвичайної ситуації на АЕС.* Ядерна та радіаційна безпека. 2019; 4(84): 88–98. [https://doi.org/10.32918/nrs.2019.4\(84\).11](https://doi.org/10.32918/nrs.2019.4(84).11)
4. Кишневский ВА, Чиченин ВВ, Павлышин ПЯ, Бондаренко ВН, Тихомиров АЮ. *Водно-химические режимы оборотных систем охлаждения крупных энергообъектов.* Одесса: Астропринт. 2018: 250. ISBN 978-966-927-494-6
5. Ковальчук ВІ, Козлов ІЛ, Дорож ОА. *Основи поводження з радіоактивними відходами на атомних електростанціях. Принципи, технології, обладнання.* Одеса: Астропринт. 2020: 372. ISBN 978-966-927-603-2
6. Ключников АА, Пазухин ЭМ, Шигера ЮМ, Шигера ВЮ. *Радиоактивные отходы АЭС и методы обращения с ними.* К.: Институт проблем безопасности АЭС НАН Украины. 2005: 487. ISBN 966-96513-0-1
7. Азаров СІ, Попович ОВ, Сидоренко ВЛ. *Концептуальні напрями впровадження культури радіаційної безпеки.* Ядерна енергетика та довкілля. 2015; 2(6): 53–60
8. Багдасарьян АС, Пухняк ДВ, Камалян ЖА, Старицкий АГ, Ермаченко НЕ, Геращенко ЕВ, et al. *Избранные вопросы медицины катастроф практического здравоохранения.* Краснодар: КубГМУ. 2011: 256
9. Алексеева ОВ, Лисиченко ГВ, Забулонов ЮЛ, Буртняк ВМ, Одукалец ЛА. *Моніторинг та контроль над аерозольними радіоактивними викидами АЕС.* Наука та інновації. 2012; № 6(8): 19–25.
10. Мальцева ТВ, Зинченко ЮА, Добровольская ИЮ, Архипенко АВ. *Влияние коррекционной химической обработки теплоносителя первого контура и рабочих сред второго контура АЭС с ВВЭР, PWR на радиационную безопасность.* Ядерна та радіаційна безпека. 2012; 4(56): 37–43
11. *Отчет по периодической переоценке безопасности энергоблоков № 3,4 ОП ЗАЭС. Комплексный*

анализ безопасности энергоблока №3 (21.3.59.ОППБ.00. сентябрь 2017 года). Аналитические материалы ГП НАЭК «Энергоатом», ОП «Запорожская АЭС». 2017:387. URL: <https://www.npp.zp.ua/Content/docs/prolong/kab-znpp-3-170926-2.pdf>

12. Кириленко ЮО, Каменева ІП. Математичне моделювання джерела викиду при аваріях із розливом рідких радіоактивних середовищ. Збірник тез XXXVII науково-технічної конференції молодих вчених та спеціалістів Інституту проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова НАН України, м. Київ. 15 травня 2019 р. ІПМЕ ім. Г.Є. Пухова НАН України. 2019: 19–24.

13. Кириленко ЮО. Особливості радіаційного впливу при аваріях із розливом рідких радіоактивних середовищ. Збірник тез науково-технічної конференції молодих вчених та спеціалістів Інституту проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова НАН України. м. Київ. 16 травня 2018 р. ІПМЕ ім. Г.Є. Пухова НАН України. 2018: 23–26.

14. Кузнецов ПМ, Бедункова ОО. Експериментальні випробування біоцидної обробки охолоджуючої води систем безпеки енергоблоків Рівненської атомної електростанції. Ядерна та радіаційна безпека. 2023; 1(97): 30–40. [https://doi.org/10.32918/nrs.2023.1\(97\).04](https://doi.org/10.32918/nrs.2023.1(97).04)

15. Герлига ВА, Кравченко ВП, Притыка ІА, Ганем Хуссам. Очистка водных растворов от солей и радионуклидов. Ядерна та радіаційна безпека. 2018; № 1(77): 47–51.

16. Jiahao Luo, Xin Jin, Yadong Wang, Pengkang Jin. Advanced Treatment of Laundry Wastewater by Electro-Hybrid Ozonation–Coagulation Process: Surfactant and Microplastic Removal and Mechanism. Water. 2022; 14(4138): 1–16. <https://doi.org/10.3390/w14244138>

17. Ганем Хуссам, Герлига ВА, Кравченко ВП, Македон ВВ, Шульга ОВ. Очищення рідких радіоактивних відходів від поверхнево-активних речовин і органічних сполук. Ядерна та радіаційна безпека. 2019; 1(81): 62–67. [https://doi.org/10.32918/nrs.2019.1\(81\).11](https://doi.org/10.32918/nrs.2019.1(81).11)

18. Шабалін БГ, Лавриненко ОМ. Деструкція органічних речовин радіоактивно забруднених вод АЕС із реакторами ВВЕР (аналітичний огляд). Ядерна енергетика та доквілля. 2020; 3(18): 65–78. <https://doi.org/10.31717/2311-8253.20.3.8>

19. Екидин АА, Жуковский МВ, Васянович МЕ. Идентификация основных дозообразующих радионуклидов в выбросах АЭС. Атомная энергия. 2016; 2(120): 106–108

20. Линге ИИ, Панченко СВ, Горелов ММ. О радиационном контроле радионуклидов для целей государственного регулирования в сфере охраны окружающей среды. Аппаратура и новости радиационных измерений. 2017; 1: 12–19

21. INPRO Methodology for Sustainability Assessment of Nuclear Energy Systems: Environmental Impact. Vienna: IAEA. 2016; 12(13): 40–44. – (IAEA Nuclear Energy Series; № NG-T-3.15).

22. Dickinson S, Bowskill S, Sims H. The iodair model for radiolysis of gaseous iodine species in air: data comparisons and predictions. Proceedings of the International OECD-NEA/NUGENIA-SARNET Workshop on the Progress in Iodine Behaviour for NPP Accident Analysis and Management Paper. 2015; 3: 243–255.

23. Zaitsev S, Kishnevsky V, Oborsky G, Tikhomirov A, Tikhenko V. Improvement of Quality Control Methods for Filters' Adsorbents in Purification of Gas Emissions of Nuclear Power Plants. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Advanced Manufacturing Processes III Selected Papers from the 3rd Grabchenko's International Conference on Advanced Manufacturing Processes (InterPartner-2021). September 7–10. 2021. Odessa. Ukraine. Springer. Switzerland. 720 p.

24. Пшежицкий СЯ, Дмитриев МГ. Радиационные физико-химические процессы в воздушной среде. М.: Атомиздат. 1978: 184

25. Борисова СВ. Озон в атмосфері. Одеса: ОДЕУ. 2011: 113.

26. Корнилов АА, Барбашев СВ. О включении комплекса плазменной переработки твердых радиоактивных отходов в состав комплекса по переработке радиоактивных отходов на Ривненской АЭС. Ядерна енергетика та доквілля. 2018; 1(11): 18–26

27. Кузин ПВ, Якобсон ІА. Наладка элегазового оборудования. М.: Энергоатомиздат. 1990: 112. ISBN 5-283-01091-0

28. Борскивер ІА. Воздействие сварочного аэрозоля на организм электросварщика (ручная дуговая сварка). Рекомендации по измерению. Безопасность и охрана труда. 2016; 4(69): 67–70

29. Солодский СА, Луговцова НЮ, Борисов ІС. Снижение сварочных аэрозолей при дуговой сварке металлов. Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2015; 6: 48–50

30. Зайцев АН. Матеріали і їх поведіння при сварке. М.: Инфро-Инженерия. 2022: 236

31. Оботуров ВІ, Попова МН. Сварка трубопроводов из полимерных материалов. М.: МГСУ. 2014: 165. URL: <http://www.iprbookshop.ru/>

32. Катаев РФ. Сварка пластмасс. Екатеринбург: УГТУ-УПИ. 2008: 138

33. Тришкин ДВ, Чепур СВ, Толкач ПГ, Башарин ВА, Чубарь ОВ, Гоголевский АС, et al. Пульмоноотоксичность продуктов горения синтетических полимеров. Сибирский научный медицинский журнал. 2018; № 4(38): 114–120. DOI: 10.15372/SSMJ20180415

34. Дикерман ДН, Кунегин ВС. Провода и кабели с фторопластовой изоляцией. М.: Энергоиздат. 1982: 144

35. Кочеткова НВ, Павлова ПИ, Соболева ГИ. Генерирование и определение микроколичества перфторизобутилена методом газовой хроматографии с электронно-захватным детектором. Журнал аналитической химии. 1987; 52(12): 2227–2231

References

1. Popov O.O., Yatsyshyn A.V., Kovach V.O., Artemchuk V.O., Taraduda D.V., Sobina V.O., et al. Analysis of possible causes of emergencies at NPPs in order to minimize the risk of their occurrence. Nuclear and radiation safety. 2019; 1(81): 75–80. [https://doi.org/10.32918/nrs.2019.1\(81\).13](https://doi.org/10.32918/nrs.2019.1(81).13)
2. Odinets V.V. Assessment of NPP personnel safety in case of accidental release of toxic chemicals. Modern problems of scientific support of energy: materials of the XVIII International Scientific and Practical Conference of Young Scientists and Students 2020. In 2 vols. K.: Ihor Sikorskyi Kyiv Polytechnic Institute. 2020; 1: 45
3. Popov O.O., Yatsyshyn A.V., Kovach V.O., Artemchuk V.O., Taraduda D.V., Sobina V.O., et al. Physical features of the distribution of pollutants in the atmospheric air under conditions of an emergency at a nuclear power plant. Nuclear and radiation safety. 2019; 4(84): 88–98. [https://doi.org/10.32918/nrs.2019.4\(84\).11](https://doi.org/10.32918/nrs.2019.4(84).11)
4. Kishnevskiy V.A., Chichenin V.A., Pavlyshin P.Ya., Bondarenko V.N., Tikhomirov A.Yu.. Water-chemical regimes of circulating cooling systems of large power facilities. Odesa city: Astroprint. 2018: 250. ISBN 978-966-927-494-6
5. Kovalchuk V.I., Kozlov I.L., Dorozh A.A. Fundamentals of radioactive waste management at nuclear power plants. Principles, technologies, equipment. Odesa city: Astroprint. 2020: 372. ISBN 978-966-927-603-2
6. Kliuchnikov A.A., Pazukhin E.M., Shigera V.M., Shigera V.Yu. Radioactive waste of nuclear power plants and methods of handling them. K.: Institute for NPP Safety Problems of the National Academy of Sciences of Ukraine. 2005: 487. ISBN 966-96513-0-1
7. Azarov S.I., Popovych O.V., Sydorenko V.L. Conceptual directions of implementation of radiation safety culture. Nuclear energy and the environment. 2015; 2(6): 53–60
8. Bagdasarian A.S., Pukhniak DV, Kamalyan Zh.A., Staritskiy A.G., Ermachenko N.E., Gerashchenko E.V., et al. Selected Issues of Disaster Medicine in Practical Healthcare. Krasnodar city: Kuban State Medical University. 2011: 256
9. Alekseeva O.V., Lisichenko G.V., Zabulonov Yu.L., Burtniak V.M., Odukalets L.A. Monitoring and control of aerosol radioactive emissions from nuclear power plants. Science and innovation. 2012; № 6(8): 19–25
10. Maltseva T.V., Zinchenko S.A., Dobrovolskaia I.Yu., Arkhipenko A.V. Influence of Correction Chemical Treatment of the Primary Circuit Coolant and Secondary Circuit Working Medium at NPP with Water-Cooled Water Reactor, PWR on Radiation Safety. Nuclear and Radiation Safety. 2012; 4(56): 37–43
11. Report on periodic safety reassessment of ZNPP Units 3,4. Comprehensive safety analysis of power unit No.3 (21.3.59.OPPB.00. September 2017). Analytical materials State Enterprise National Nuclear Energy Generating Company "Energoatom", "Zaporizhzhya NPP". 2017:387. URL:<https://www.npp.zp.ua/Content/docs/prolong/kab-znpp-3-170926-2.pdf>
12. Kyrylenko Yu.O., Kameneva I.P. Mathematical modeling of the release source in accidents with liquid radioactive media spills. Collection of abstracts of the XXXVII Scientific and Technical Conference of Young Scientists and Specialists of the H. Ye. Pukhov Institute for Modeling Problems in Energy of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv. May 15, 2019. H. Ye. Pukhov Institute for Modeling Problems in Energy of the National Academy of Sciences of Ukraine. 2019: 19–24
13. Kyrylenko Yu.O. Features of radiation exposure in accidents with liquid radioactive media spills. Collection of abstracts of the scientific and technical conference of young scientists and specialists of the H. Ye. Pukhov Institute for Modeling Problems in Energy of the National Academy of Sciences of Ukraine. Kyiv. May 16, 2018, H. Ye. Pukhov Institute for Problems of Modeling in Energy of the National Academy of Sciences of Ukraine. 2018: 23–26
14. Kuznetsov P.M., Bedunkova O.O. Experimental tests of biocidal treatment of cooling water for safety systems of Rivne NPP power units. Nuclear and radiation safety. 2023; 1(97): 30–40. [https://doi.org/10.32918/nrs.2023.1\(97\).04](https://doi.org/10.32918/nrs.2023.1(97).04)
15. Gerliga V.A., Kravchenko V.P., Prityka I.A., Ganem Hussam. Purification of Water Solutions from Salts and Radionuclides. Nuclear and Radiation Safety. 2018; № 1(77): 47–51
16. Jiahao Luo, Xin Jin, Yadong Wang, Pengkang Jin. Advanced Treatment of Laundry Wastewater by Electro-Hybrid Ozonation–Coagulation Process: Surfactant and Microplastic Removal and Mechanism. Water. 2022; 14(4138): 1–16. <https://doi.org/10.3390/w14244138>
17. Ganem Hussam, Gerliga V.A., Kravchenko V.P., Makedon V.V., Shulga O.V. Purification of liquid radioactive waste from surfactants and organic compounds. Nuclear and radiation safety. 2019; 1(81): 62–67. [https://doi.org/10.32918/nrs.2019.1\(81\).11](https://doi.org/10.32918/nrs.2019.1(81).11)
18. Shabalin B.H., Lavrinenko O.M. Destruction of organic substances of radioactively contaminated waters of NPPs with Water-Cooled Water Reactor (analytical review). Nuclear energy and the environment. 2020; 3(18): 65–78. <https://doi.org/10.31717/2311-8253.20.3.8>
19. Yekidin A.A., Zhukovskiy M.V., Vasianovich M.E. Identification of the main dose-forming radionuclides in NPP emissions. Atomic Energy. 2016; 2(120): 106–108
20. Linge A.I., Panchenko S.V., Gorelov M.M. On Radiation Control of Radionuclides for the Purposes of State Regulation in the Field of Environmental Protection. Apparatus and News of Radiation Measurements. 2017; 1: 12–19
21. INPRO Methodology for Sustainability Assessment of Nuclear Energy Systems: Environmental Impact. Vienna: IAEA. 2016; 12(13): 40–44. (IAEA Nuclear Energy Series; № NG-T-3.15).
22. Dickinson S, Bowskill S, Sims H. The iodair model for radiolysis of gaseous iodine species in air: data comparisons and predictions. Proceedings of the International OECD-NEA/NUGENIA-SARNET Workshop on the Progress in Iodine Behaviour for NPP Accident Analysis and Management Paper. 2015; 3: 243–255.
23. Zaitsev S, Kishnevsky V, Oborsky G, Tikhomirov A, Tikhenko V. Improvement of Quality Control Methods for Filters' Adsorbents in Purification of Gas Emissions of Nuclear Power Plants. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Advanced Manufacturing Processes III Selected Papers from the 3rd Grabchenko's International Conference on Advanced Manufacturing Processes (InterPartner-2021). September 7–10. 2021. Odessa. Ukraine. Springer. Switzerland. 720 p.
24. Pshchizhskiy S.Ya., Dmitriev M.T. Radiation physical and chemical processes in the air environment. Moscow city: Atomizdat. 1978: 184
25. Borisova S.V. Ozone in the atmosphere. Odesa city: Odesa State Ecological University. 2011: 113
26. Kornilov A.A., Barbashev S.V. On the Inclusion of the Plasma Processing Complex for Solid Radioactive Waste into the Radioactive Waste Processing Complex at the Rivne NPP. Yadernaya Nuclear energy and the environment. 2018; 1(11): 18–26
27. Kuzin P.V., Yakobson I.A. Gas-insulated equipment adjustment. M.: Energoatomizdat.1990: 112. ISBN 5-283-01091-0
28. Borskiver I.A. Impact of welding aerosol on the body of an electric welder (manual arc welding). Recommendations for measurement. Occupational Safety and Health. 2016; 4(69): 67–70
29. Solodsky S.A., Lugovtsova N.Yu., Borisov I.S. Reduction of welding aerosols in arc welding of metals. International Journal of Applied and Basic Research.2015; 6: 48–50

30. Zaitsev A.N. Materials and their behavior in welding. Moscow: Info-Engineering.2022: 236
31. Oboturov V.I., Popova M.N. Welding of pipelines made of polymeric materials. M.: Moscow State University of Civil Engineering. 2014: 165. URL: <http://www.iprbookshop.ru/>
32. Kataev R.F. Plastics Welding. Ekaterinburg: Ural State Technical University-Ural Polytechnic Institute. 2008: 138
33. Trishkin D.V., Chepur S.V., Tolkach P.G., Basharin V.A., Chubar O.V., Gogolevskiy A.C., et al. Pulmonotoxicity of combustion products of synthetic polymers. Siberian Scientific Medical Journal. 2018; № 4(38): 114–120. DOI: 10.15372/SSMJ20180415
34. Dickerman D.N., Kunegin V.S. Wires and cables with fluoroplastic insulation. M.: Energoizdat. 1982: 144
35. Kochetkova N.V., Pavlova P.I., Soboleva G.I. Generation and determination of microquantities of perfluoroisobutylene by gas chromatography with electron-capture detector. Magazine of Analytical Chemistry. 1987; 52(12): 2227–2231