

В.Д. РОМАНЕНКО, М.І. КУЗЬМЕНКО, С.О. АФАНАСЬЄВ,
Д.І. ГУДКОВ, П.М. ЛИННИК, О.О. ПРОТАСОВ,
В.М. ТИМЧЕНКО, В.І. ЮРИШИНЕЦЬ, В.М. ЯКУШИН

Інститут гідробіології Національної академії наук України
просп. Героїв Сталінграда, 12, Київ, 04210, Україна

ГІДРОЕКОЛОГІЧНА БЕЗПЕКА АТОМНОЇ ЕНЕРГЕТИКИ В УКРАЇНІ

Проаналізовано екологічні проблеми прилеглих до АЕС природних і штучних водойм, зокрема водойм-охолодників, які зазнають комплексного антропогенного навантаження: теплового скидання, хімічного забруднення, евтрофікації, механічного стресу, а також додаткового опромінення штучними радіонуклідами. Розглянуто гідрологічні та гідрохімічні процеси за умов підвищених температур водного середовища, продукційно-деструкційні процеси і формування якості води, біологічні перешкоди, потенційні паразитарні загрози, а також поведінку радіонуклідів та радіоекологічні ризики для гідробіонтів у водних екосистемах. Викладено основні проблемні завдання гідроекологічної безпеки АЕС.

Ключові слова: техно-екологічна система, атомна електростанція, водойма-охолодник, гідробіонти, хімічне і радіонуклідне забруднення, моніторинг.

ВСТУП

В енергозабезпеченні народногосподарського комплексу провідну роль відіграють атомні електростанції, на частку яких припадає близько 50% електроенергії, що виробляється електростанціями України. Одна з найважливіших умов надійної експлуатації АЕС — безперебійне водозабезпечення, джерелами якого слугують ріки, водосховища та водойми-охолодники. Гідроекологічна безпека атомної енергетики — це підтримання такого екологічного стану водойм, який забезпечує оптимальну роботу АЕС, передбачену проектними вимогами. Досягнення гідроекологічної, ядерної безпеки та оптимальної експлуатації техногідроекосистем АЕС без будь-яких негативних впливів на

навколишнє природне середовище має ґрунтуватися на розробленні та впровадженні методології управління екологічним станом водойм-охолодників.

В Україні експлуатуються чотири потужні атомні електростанції, оснащені реакторами типу ВВЕР.

Найпотужніша в Україні та в Європі **Запорізька АЕС** розташована у дефіцитній за водними ресурсами степовій зоні на березі Каховського водосховища. Площа водойми-охолодника Запорізької АЕС становить 8,2 км², об'єм води — 47 млн м³.

Південно-Українська АЕС знаходиться на берегах Південного Бугу в дефіцитній за водними ресурсами Миколаївській області. Південно-Українська АЕС, Олександрівська ГЕС і Ташлицька ГАЕС становлять єдиний Південно-Український енергокомплекс. Площа водойми-охолодника становить 8,6 км², об'єм води — 86 млн м³.

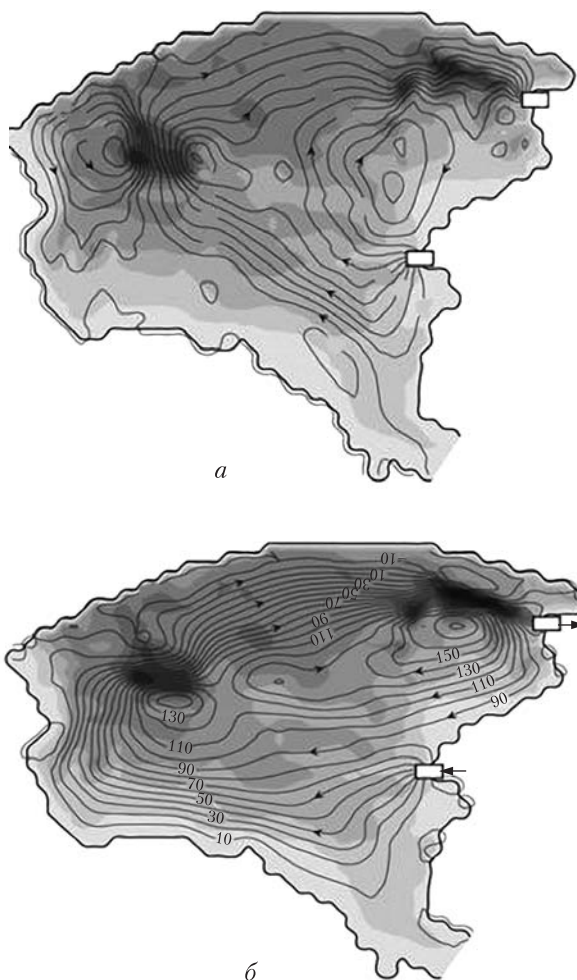


Рис. 1. Схема течій у водоймі-охолоднику Хмельницької АЕС за північного (а) та східного (б) вітрів

Хмельницька АЕС розташована біля р. Горинь — притоки р. Прип'яті. Водойма-охолодник побудована на р. Гнилий Ріг — лівій притоці р. Горинь, має площу — 20 км², об'єм води — 120 млн м³.

Рівненська АЕС розміщена у західному Поліссі, поблизу р. Стир. Водозабезпечення Рівненської АЕС здійснюється за допомогою градирень зі щорічним використанням 36–38 млн м³ води.

Техно-екологічну систему слід розглядати як сукупність біотопів природного й антропогенного характеру з їх біотичним населенням, об'єднаних системою прямих і зворотних зв'язків, що змінюються у просторі й

часі [1]. У Стандарті підприємства «Порядок розробки регламенту гідробіологічного моніторингу водойми-охолоджувача, систем охолодження і системи технічного водопостачання АЕС з реакторами типу ВВЕР» (НАЕК «Енергоатом», 2010) вводиться також поняття «Водна частина техно-екологічної системи», яке уточнює наведене вище визначення. Слід наголосити, що ця концепція техно-екологічної системи зумовлює рівнозначні підходи до біотичних і техногенних чинників, які впливають на функціонування всіх елементів системи, в тому числі й на технологічне обладнання.

ОСОБЛИВОСТІ ГІДРОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ

Серед основних гідрологічних чинників, що визначають умови функціонування екосистем водойм-охолодників атомних електростанцій України, важливе місце посідають водообмін, внутрішньоводоймова гідродинаміка і тепловий (термічний) режим водних мас.

Водообмін водойм-охолодників за генезисом поділяють на дві принципово різні складові. Перша — зовнішній водообмін — формується переважно за рахунок витрат води на випаровування і фільтрацію, з одного боку, та компенсації цих витрат завдяки підживленню з прилеглого природного водного об'єкта (ріки, водоймища), з другого. Зовнішнє підживлення, наприклад, водойми-охолодника Південно-Української АЕС становить за рік 42% його обсягу. Приблизно такі показники характерні й для водойм-охолодників ЧАЕС (з Прип'яті) і Запорізької АЕС (з Каховського водоймища). Друга складова — внутрішній водообмін — зумовлений скиданням нагрітих на станції вод і забором води для охолодження агрегатів. На Південно-Українській АЕС, наприклад, такий водообмін здійснюється понад 60 разів за рік.

Автори оцінювали режим течій у водоймі-охолоднику Хмельницької АЕС. Отримані розрахункові схеми характеризують картину переміщення водних мас під час вітру середньої інтенсивності (3 м/с) різних на-

прямків. Зауважимо, що ізолінії функцій течії води вказують на інтегральний (сумарний за глибиною) напрям переміщення водних мас, а їх густина пропорційна інтенсивності цього переміщення (рис. 1).

Результати наших досліджень на водоймах-охолодниках АЕС України свідчать, що розрахункові схеми течій, побудовані методом повних потоків, дають цілком реальне загальне уявлення щодо розподілу по акваторії водних мас з різними тепловими показниками. Температурні аномалії приурочені зазвичай до систем циркуляційних колообігів: тепліша вода в поверхневих шарах концентрується в зонах розміщення антициклоніальних циркуляцій, у циклоніальних — навпаки.

Сучасні досягнення в галузі дослідження турбулентної дифузії у водних об'єктах дають змогу оцінювати процеси вертикального перемішування, в тому числі у водоймах-охолодниках енергетичних об'єктів. Нехтування цими процесами вже призвело до порушень в експлуатації деяких водойм-охолодників. Так, на водоймі-охолоднику Чорнобильської АЕС значна частина об'єму води (нижче 7–9-метрової ізобати) брала слабку участь в охолодженні підігрітих вод, що скидаються станцією. Те саме стосується і Ташлицької водойми.

ХІМІЧНІ ПРОЦЕСИ ЗА УМОВ ПІДВИЩЕНИХ ТЕМПЕРАТУР ВОДНОГО СЕРЕДОВИЩА

Кисень — один із найважливіших розчинних газів поверхневих вод, який значною мірою впливає на хіміко-біологічний стан різнотипних водних об'єктів, у тому числі й водойм-охолодників теплових та атомних електростанцій. Витрати кисню у поверхневих водоймах зумовлені хімічними й біологічними процесами окиснення органічних та деяких неорганічних речовин (Mn^{2+} , NH_4^+ , NO_2^- , H_2S , CH_4 та ін.), а також диханням водних організмів. Швидкість споживання кисню зростає з підвищенням температури, кількості бактерій та інших водних організмів і речовин, що зазнають хімічного й біохімічного окиснення. Вплив температурного чинника виявляється насамперед у зниженні концентрації розчиненого у воді кисню, оскільки відомо, що розчинність цього газу знижується з підвищенням температури (рис. 2).

Крім того, підвищення температури води призводить до прискорення розкладання органічних речовин та решток гідробіонтів, що неминуче супроводжується зростанням витрат розчиненого у воді кисню на окисні процеси, а також на дихання організмів.

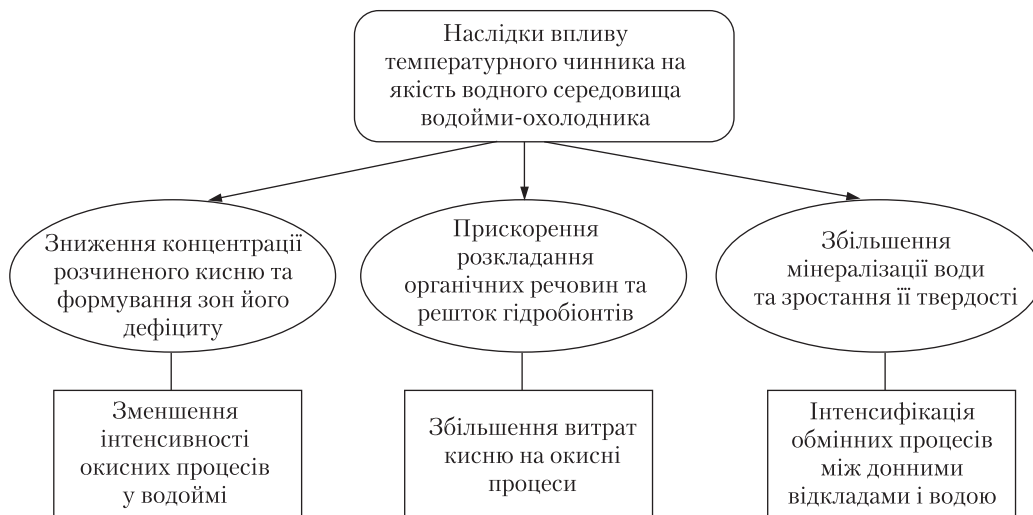


Рис. 2. Вплив температурного чинника на деякі процеси формування якості води у водоймі-охолоднику

Зростання температури води у водоймі-охолоднику може бути важливим чинником підвищення її мінералізації, оскільки збільшується випаровування і відбувається концентрування солей. За таких умов слід очікувати інтенсифікації обмінних процесів між донними відкладами і водою. Особливо небезпечним може бути надходження важких металів з донних відкладів у потенційно токсичній формі, зокрема у вигляді вільних іонів (аквакомплексів).

Погіршення стану кисневого режиму негативно позначається на функціонуванні водних екосистем, оскільки в цьому разі знижується інтенсивність самоочищення водного середовища і накопичення у воді різноманітних речовин у відновленому стані (рис. 3).

Це може бути причиною зростання її токсичності. Зниження концентрації кисню у придонному шарі води сприяє формуванню анаеробних зон та створенню умов для обміну речовин між донними відкладами і водою, що з ними контактує. При цьому істотно

збільшується міграція з донних відкладів біогенних елементів, зокрема амонійного азоту, фосфору, фосфатів та заліза [2]. Через нестачу кисню у воді знижується окиснення амонійного азоту, а це призводить до його накопичення у водному середовищі. За тривалого дефіциту у воді кисню істотно зростає міграційна здатність важких металів, зокрема мангану, цинку, міді, свинцю та багатьох інших та їх накопичення у водному середовищі [3]. Особливо небезпечне підвищення у воді концентрації так званих вільних (гідратованих) іонів металів, як потенційно токсичної і небезпечної для гідробіонтів форми металів. Важливо зазначити, що в анаеробних умовах посилюється також обмін органічними речовинами між донними відкладами і водою, яка з ними контактує. Збільшення їхньої концентрації у воді призводить до подальшого зниження вмісту розчиненого кисню, що витрачається на їх окиснення. Поглиблення дефіциту розчиненого у воді кисню може відбуватися впродовж тривалого періоду, що негативно



Рис. 3. Зниження інтенсивності самоочищення водного середовища та збільшення концентрації речовин у воді внаслідок надходження з донних відкладів

позначається на стані водойми в цілому і водного середовища зокрема.

ПРОДУКЦІЙНО-ДЕСТРУКЦІЙНІ ПРОЦЕСИ І ФОРМУВАННЯ ЯКОСТІ ВОДИ

У зонах впливу підігрітих вод, як правило, видове різноманіття бідніше порівняно із зонами, де умови близькі до природних, проте загалом у водоймах-охолодниках унаслідок усього комплексу факторів складаються умови для вселення і розвитку видів-поселенців, представників флори і фауни інших регіонів, переважно південніших (табл. 1). Фізико-хімічні умови водного середовища сприяють інтенсивному розвитку фотосинтезувальних організмів, особливо фітопланктону, маса якого сягає 200–500 мг/л і більше. З підігріванням води на 7–10°C у 2–2,5 разу зростає швидкість розмноження бактерій та їхня продукція [4], значно збільшується деструкція органічної речовини. Особливості продукційно-деструкційних процесів у водоймах-охолодниках як елемента (складової) техно-екологічної системи АЕС полягають у наявності виражених гетерогенних термічних, гідродинамічних, гідрохімічних умов, що визначають різний характер та інтенсивність біологічних процесів у часовому й просторовому аспектах, або в підсумку – різний баланс органічної речовини. Внаслідок зміни термічного режиму водойми відбувається зміщення фенологічних явищ (рання гідробіологічна весна, запізнена осінь, м'яка зима) і подовжується період активної вегетації первиннопродуцентів. Завдяки переважанню у водоймі-охолоднику продукування над деструкцією відбувається надмірне накопичення нереалізованої вторинної продукції гідробіонтів, у тому числі тих, що мають тривалий життєвий цикл. У замкнених водоймах-охолодниках відбувається накопичення біогенних елементів, які постійно залучаються до колообігу речовин, підтримуючи активні процеси первинного продукування, вторинної продукції та деструкції органічної речовини. Крім того, у деякі водойми-охолодники скидається значна кількість про-

мислово-побутових стічних вод з високим вмістом біогенів, що призводить до погіршення якості води.

БІОЛОГІЧНІ ПЕРЕШКОДИ

На прикладі техно-екосистеми Хмельницької АЕС (ХАЕС) можна продемонструвати, як біотичні чинники впливають на роботу технічних систем та біотичну частину екосистеми водойми-охолодника (табл. 1).

У 2002–2003 рр. у водойму вселився двостулковий молюск *Dreissena polymorpha Pallas*. Це зумовило кардинальні зміни у структурі угруповань планктону, бентосу та перифітону водойми, а також значно вплинуло на характер і рівень кормової бази аборигенних та інтродукованих видів риб.

Загалом вселення дрейсени не призвело до значного збільшення кількості таксонів у донних угрупованнях. Найбільшою кількістю таксонів характеризувалися олігохети та личинки хірономід. Після появи дрейсени біомаса зообентосу зросла у 9 разів, чисельність – у тричі (середні значення).

Дрейсена впливає на вміст кальцію у воді, знижуючи її накипоутворювальні властивості, що є надзвичайно важливим для нормальної роботи теплообмінного обладнання АЕС. Крім того, процес накипоутворення залежить від карбонатної рівноваги, на яку у свою чергу, впливає активна реакція води (рН). Після вселення дрейсени значення рН води у водоймі-охолоднику почали знижуватися, однак через деякий час завдяки значному розвитку планктонних водоростей знову досягли високого рівня. У техно-екосистемі з'явилася велика кількість гідробіонтів, здатних створювати біологічні перешкоди в роботі обладнання АЕС. Так, дрейсена поселяється на будь-яких твердих субстратах, а губки, нитчасті водорості та вищі водні рослини – на поверхнях берегових бетонних споруд і можуть зноситися течією до решіток на насосних станціях. Один із важливих методів обмеження біологічних перешкод – механічне очищення систем водопостачання. З підвідного каналу ХАЕС, з використанням оригінальної методики,

розробленої персоналом станції, за літній сезон (раз на 2–3 роки) вилучається до 700 т дрейсени. Окремі з інвазивних видів можуть створювати біологічні перешкоди.

З 2000 по 2008 р. у різних країнах світу відбулося – 40 аварійних зупинок ядерних енергоблоків унаслідок перекриття постачання охолоджувальної води, абсолютна більшість причин мала біогенну природу. До останнього часу гіперпродукцію водоростей і безхребетних розглядають лише як проблему збільшення біоперешкод у роботі обладнання АЕС, проте вона може слугувати основою для тепловодної аквакультури, сировиною для переробки на кормові добавки для птахівництва, тваринництва тощо.

Розглядаючи водойму-охолодник і станцію як єдину техно-екологічну систему, слід зазначити, що станція відіграє роль основного, постійно діючого абіотичного чинни-

ка, який визначає специфіку біологічних процесів, колообігу речовин і вресіті – екологічний стан водойм даного типу. Загалом ця специфіка полягає у такому:

- внаслідок зміни термічного режиму водойм подовжується період активної вегетації і в надмірних кількостях накопичується нереалізована первинна і особливо вторинна продукція гідробіонтів з тривалим життєвим циклом;

- накопичуються широкий спектр ксенобіотиків, біогенні елементи й органічні речовини, тривалість колообігу яких у техно-екосистемі значно коротша, ніж у природних умовах, за однакових ландшафтних-кліматичних умов, що зумовлює пролонгування розвитку та збільшення біоперешкод, швидке відтворення після вжиття заходів з їх ліквідації, а також ускладнює технологічний процес водопідготовки для систем охолодження станції.

Табл. 1.

Види-інвайдери та рідкісні види (локальні поселенці), виявлені у водоймах-охолодниках АЕС України

Вид	Таксономічна належність	Водойма-охолодник	Можливі наслідки інвазії для техно-екосистеми
<i>Pleurosira laevis</i> (Ehrenberg) Compere	Діатомові водорості	ХАЕС [5]	Може зумовити «цвітіння»
<i>Chaetomorpha henningsii</i> P. Richt.	Зелені нитчасті водорості	ХАЕС [5]	Може спричинити біоперешкоди на насосному обладнанні
<i>Eunapius carteri</i> (Bowerbank)	Прісноводні губки	ХАЕС [5]	Може спричинити біоперешкоди на насосному обладнанні
<i>Craspedacusta sowerbii</i> (Lankester)	Кишковопорожнинні	ХАЕС [5]	Не відомо
<i>Tyrrhenocythere amnicola donetziensis</i> (Sars)	Черепашкові раки	ХАЕС [5]	Не відомо
<i>Dreissena polymorpha</i> (Pallas)	Двостулкові молюски	ХАЕС [5]	Може спричинити біоперешкоди на насосному обладнанні
<i>Theodoxus euxinus</i> (Clessin) <i>Ferrisia</i> (Walker)	Черевоні молюски	ХАЕС [5] ХАЕС [5], Чорнобильська АЕС [6]	Негативний вплив невідомий, можуть поліпшити кормову базу риб
<i>Planorbella</i> (Haldeman)		ХАЕС [5]	
<i>Melanoides tuberculata</i> (Müller)		Південно-Українська АЕС [7]	

ПОТЕНЦІЙНІ ПАРАЗИТАРНІ ЗАГРОЗИ

Паразитичні організми у природних водних екосистемах відіграють стабілізуючу роль, забезпечуючи регулювання чисельності хазяїв-гідробіонтів у разі зростання густоти їх популяцій. Антропогенний вплив призводить до порушення природних механізмів підтримання внутрішньої структури екосистем, в тому числі й їх паразитарних елементів, що збільшує імовірність спалаху епізоотій та подальших деструктивних змін.

Водойми-охолодники енергетичних об'єктів часто мають комплексне призначення і використовуються для додаткових господарських цілей: рибне господарство (або використання риб у біомеліорації, як на ВО Хмельницької АЕС), місце скидання побутових стоків тощо. Таке комплексне використання передбачає існування біологічних ресурсів, які постійно або періодично вилучаються з водойми і потрапляють у навколишнє середовище, або використовуються людиною.

Біологічні ресурси, в тому числі й водне середовище їх існування, мають бути об'єктом постійного гідропаразитологічного моніторингу, через те що умови водойм-охолодників є потенційно сприятливими для розвитку і трансмісії багатьох паразитичних організмів, зокрема збудників небезпечних хвороб людини і тварин (голі амеби, лямблії, гаплоспоридії, гельмінти різних таксономічних груп). Нами запропоновано основні принципи та елементи такого моніторингу.

Проведення періодичного і своєчасного гідропаразитологічного моніторингу є додатковою ланкою контролю біотичної складової водойм-охолодника атомних електростанцій, від стабільності та прогнозованості функціонування якої залежить уся техноекосистема.

Температурний чинник є визначальним у формуванні структури угруповань гідробіонтів і значною мірою впливає на розвиток інвазивного процесу. У водоймах-охолодниках зареєстровано десятки видів водоростей, безхребетних і риб, не характерних для

флори і фауни України. Підвищення температури у водоймах-охолодниках сприяє розвитку патогенних організмів і становить потенційну загрозу як довкіллю, так і населенню регіону.

РАДІОНУКЛІДИ У ВОДОЙМАХ-ОХОЛОДНИКАХ ТА РАДІОЕКОЛОГІЧНІ РИЗИКИ ДЛЯ ГІДРОБІОНТІВ

Специфічним і невід'ємним чинником виробництва електроенергії на АЕС є утворення і накопичення значної кількості штучних радіонуклідів, які за певних обставин можуть надходити у довкілля, зокрема у водне середовище. Багаторічний досвід експлуатації підприємств ядерної енергетики свідчить про те, що атомні електростанції, за штатних умов роботи, є набагато безпечнішими для природного середовища, ніж електростанції, які працюють на органічному паливі. Разом з тим аварійні ситуації на АЕС зумовлюють необхідність оптимізації системи комплексного радіоекологічного моніторингу водойм, які для багатьох біологічно небезпечних, тривалоіснуючих радіонуклідів є «кінцевими пунктами» у процесі біогеохімічної міграції, а також поглибленого дослідження впливу підприємств атомної енергетики на водні організми. Існує також проблема міграції радіонуклідів харчовими ланцюгами водних екосистем, учасником яких є й людина.

Радіоактивність водного середовища в районах АЕС формується радіонуклідами природного походження, глобальними радіоактивними продуктами випробувань ядерної зброї, а також скидами АЕС. Найвразливішою ланкою природного середовища в районах розміщення АЕС є екосистеми водойм-охолодників, які зазнають впливу всього комплексу антропогенних чинників: теплового скидання, хімічного забруднення, евтрофікації, механічного стресу, а також додаткового опромінення штучними радіонуклідами. У рідких скидах реакторів типу ВВЕР, якими оснащені всі діючі АЕС України, міститься широкий спектр радіонуклідів — ^3H , ^{51}Cr , ^{54}Mn , ^{59}Fe , $^{57, 58, 60}\text{Co}$, $^{65, 95}\text{Zn}$, $^{89, 90}\text{Sr}$, ^{95}Nb , ^{99}Mo , $^{103, 106}\text{Ru}$, $^{110\text{m}}\text{Ag}$, $^{124, 125}\text{Sb}$,

^{123m}Te , ^{131}I , 134 , ^{137}Cs , ^{140}Ba , ^{140}La , 141 , ^{144}Ce . Основну частину рідких скидів АЕС становлять продукти поділу. До їх складу входять передусім тритій, а також радіоізотопи таких біологічно значущих елементів та їхніх хімічних аналогів, як йод, стронцій, цезій, церій, рутеній та ін. Другу групу радіонуклідів становлять продукти корозії матеріалів активної зони реактора і першого контуру теплоносія — ^{51}Cr , ^{54}Mn , ^{60}Co та ін. [8]. Нарешті, пошкоджені оболонки твелів можуть бути причиною появи у скидах слідових кількостей трансуранових елементів, проте їхні активності зазвичай нехтовно малі порівняно зі скидами інших радіонуклідів.

Технічні засоби, які використовують на АЕС, за нормальних умов експлуатації дають змогу мінімізувати надходження радіонуклідів у довкілля. Слід також зазначити, що радіоактивні викиди та скиди АЕС регламентовані досить жорсткими нормативами, в результаті чого рідкі скиди порівняно мало змінюють природній радіаційний фон і сумарний вміст радіонуклідів у об'єктах водного середовища. Разом з тим, важливою проблемою є оцінка екологічного балансу та розподілу тривалоіснуючих радіонуклідів у компонентах водних екосистем, оскільки багато водних рослин і тварини здатні концентрувати штучні радіонукліди у життєво важливих органах і тканинах у великих кількостях. З одного боку це впливає на міграцію і розподіл радіонуклідів у водних екосистемах, а з другого — може призводити до істотного збільшення дозових навантажень на водні організми внаслідок внутрішнього опромінення. Незважаючи на порівняно високу радіостійкість більшості гідробіонтів, підвищені хронічні дози опромінення можуть бути причиною різноманітних ушкоджень, зокрема виникнення спадкових змін (мутацій) при дії на генетичний апарат клітин, а також зниження життєздатності організмів (аж до вимирання найчутливіших до іонізуючого випромінювання популяцій), що призводить до збіднення видового різноманіття і зумовлює зміни структури гідробіоценозів. Крім того, геоморфологічні особ-

ливості водойм та динаміка водних мас впливають на транспортування, міграцію та розподіл радіонуклідів у абіотичних компонентах водних екосистем. Завдяки неоднорідності рельєфу дна на ділянках зі збільшеними глибинами та уповільненими течіями посилюється седиментація зависей, в яких у значних кількостях накопичуються радіонукліди. Це може зумовлювати підвищені дозові навантаження на водні організми, що мешкають у донних відкладах або ведуть придонний спосіб життя.

Оскільки донні відклади більшості водойм є основним «депо», що концентрує радіоактивні речовини, картування радіонуклідного забруднення донних відкладів водойм-охолоджувачів заслуговує на особливу увагу як у зв'язку з можливим видаленням забруднених донних відкладів, так із прийняттям рішень щодо майбутнього водойм-охолоджувачів після виведення з експлуатації АЕС.

Важливим інтегральним критерієм впливу АЕС на біоту водойм є доза опромінення різних груп організмів. Формування дозових навантажень на гідробіонти відбувається під впливом внутрішнього опромінення, зумовленого інкорпорованими радіонуклідами, а також зовнішнього опромінення від радіонуклідів, що містяться в об'єктах навколишнього середовища. Гідробіонти ближньої зони АЕС зазнають опромінення вищими дозами порівняно з наземними організмами. Для водних рослин основний внесок у дозу опромінення зумовлений інкорпорованими радіонуклідами, в основному продуктами корозії, а також ^{90}Sr , ^{95}Zr , ^{137}Cs і ^{144}Ce [9]. Додаткове зовнішнє опромінення водних рослин штучними радіонуклідами відбувається у скидних каналах АЕС та у зоні поширення скидних вод.

Середні рівні внутрішнього опромінення різних видів риб від штучних радіонуклідів у районі АЕС набагато менші за опромінення від природних радіонуклідів. Проте для деяких видів риб спостерігається сезонна мінливість у динаміці дози внутрішнього опромінення з максимумом у літні місяці.

Для більшості видів риб техногенна доза внутрішнього опромінення визначається переважно ^{90}Sr і ^{137}Cs глобального походження. У риб, що живуть у скидному каналі АЕС і зазнають опромінення вищими дозами порівняно з рибами інших біотопів, помітну роль у формуванні дози внутрішнього опромінення відіграють ^{60}Co , ^{65}Zn і ^{144}Ce . Потужність дози зовнішнього опромінення для риб, що живуть у заростях вищих водних рослин та поблизу дна, може перевищувати рівень внутрішнього опромінення. Критичним елементом екосистеми з урахуванням цієї обставини можуть стати фітофільні види риб (плітка, окунь, верховодка), що відкладають ікри на поверхні водних рослин. При цьому максимальні рівні зовнішнього опромінення ікри та мальків риб у деякі періоди могли сягати 3 мГр/добу, що у 1000 разів вище за природний рівень опромінення [10].

З метою своєчасного виявлення радіонуклідного забруднення водного середовища, техногенних змін радіаційного й екологічного стану, оцінювання та прогнозування розвитку негативних процесів у довкіллі, а також для інформаційної підтримки прийняття рішень щодо забезпечення радіаційної безпеки потрібно здійснювати радіоекологічний моніторинг як складову комплексного гідроекологічного моніторингу систем водозабезпечення АЕС. В оптимізованій системі радіоекологічного моніторингу водних екосистем мають бути передбачені: регламентоване збирання і аналіз первинних даних спостережень, а також створення баз даних; оперативне виявлення радіоактивних речовин, що потрапили у водне середовище зі скидами АЕС; інформаційне забезпечення для оцінювання і прогнозування рівнів ризику для водних екосистем, а також прийняття рішень щодо радіаційної та гідроекологічної безпеки експлуатації АЕС.

ПРОБЛЕМНІ ЗАВДАННЯ ГІДРОЕКОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ АЕС

Екологічний моніторинг, який постійно здійснюється в регіонах роботи АЕС, має бути доповнений важливим блоком — гідро-

екологічним моніторингом з урахуванням гідрофізичних, гідрохімічних та гідробіологічних процесів, що необхідно для управління екологічним станом, підвищення гідроекологічної безпеки й оптимізації функціонування техно-екосистем водойм-охолодників та АЕС, а також є важливим з огляду на сучасні європейські напрями у природоохоронній діяльності.

У зв'язку з цим актуальними є дослідження змінюваних у часі гідрофізичних, зокрема термодинамічних, гідрохімічних та продукційно-деструкційних процесів, що визначають формування якості води та накопичення біоперешкод у роботі технологічних систем водозабезпечення.

АЕС розташовані поблизу густонаселених регіонів, зон рекреації та інтенсивного сільськогосподарського виробництва, тому особливого значення набуває оцінювання якості води, паразитологічної ситуації та можливих ризиків у розвитку ключових елементів біоти у водоймах-охолодниках і прилеглих акваторіях природних водойм (табл. 2).

В останні десятиліття значного поширення набули методологія і методи моніторингу — комплексної системи спостережень, контролю стану і прогнозування змін, що відбуваються в екосистемах. Проте здебільшого практична реалізація моніторингу для оцінювання стану екосистем обмежується встановленням вмісту радіонуклідів, важких металів та інших токсичних речовин, що також необхідно. Вичерпну характеристику біологічної якості води і загалом екологічного стану екосистеми можна отримати лише на основі оцінювання вмісту забруднень в екосистемі, біотестування та характеристики структурно-функціональної організації біосистем різних рівнів організації. Зважаючи на складність природних біосистем, моніторинг біоценотичних процесів слід здійснювати з урахуванням передусім сезонних та річних змін [11–13].

Водойми-охолодники — штучні техно-екосистеми, геоморфологія і водні ресурси яких спрямовані на виконання основного

Проблемні процеси, гідроекологічні ризики та їх технологічні наслідки для АЕС України

Проблемні процеси	Гідроекологічні ризики	Технологічні наслідки
Скидання підігрітих вод Витрати води на випаровування Ускладнення гідрохімічного режиму Порушення гідробіологічного режиму Хімічне та радіонуклідне забруднення	Гіперпродукція водоростей, «цвітіння» води Гіперпродукція дрейсени Евтрофікація Поява видів-поселенців Потенційні паразитарні ризики для тварин і людини	Втрати енергопотужностей Аварійні зупинки ядерних енергоблоків Витрати на видалення біологічної гіперпродукції

завдання: водозабезпечення технологічних систем АЕС. Разом з тим на особливу увагу заслуговує те, що водойми-охолодники та зосереджені в них величезні об'єми водних мас з численними угрупованнями гідробіонтів різного трофічного рівня і систематичного положення є складовими навколишніх ландшафтів регіонів розміщення АЕС. Методологія гідроекологічної безпеки АЕС має ґрунтуватись на комплексному, екосистемному підході, спрямованому на вивчення, прогнозування і управління тісно взаємопов'язаними абіотичними та біотичними процесами, які визначають ефективність функціонування техно-екосистем АЕС. На основі багаторічного досвіду досліджень водойм-охолодників у вирішенні проблемних завдань гідроекологічної безпеки техно-екосистем АЕС визначено основні науково-практичні пріоритети, які передбачають:

- з'ясування механізмів гідрологічних процесів та їхнього впливу на формування якості води і функціонування екосистем водойм-охолодників;
- установлення кількісних характеристик процесів міграції, трансформації та накопичення хімічних речовин і формування гідрохімічного режиму у джерелах водопостачання та водоймах-охолодниках;
- визначення балансу продукційно-деструкційних процесів та їх залежності від основних гідрофізичних чинників і розроблення елементів методології управління екологічним станом та процесами форму-

вання якості води у водоймах-охолодниках;

- встановлення основних закономірностей функціонування біосистем у водоймах-охолодниках та розроблення практичних заходів з обмеження розвитку біоперешкод у системах водопостачання АЕС;
- реалізацію методів і принципів гідроекологічного моніторингу та прогнозування змін паразитологічної ситуації у водних екосистемах за умов впливу об'єктів атомної енергетики;
- встановлення розподілу і концентрування основних дозоутворювальних радіонуклідів в абіотичних і біотичних компонентах та оцінювання радіоекологічних ризиків для водних біосистем різних рівнів організації.

Наведені результати науково-практичних робіт мають слугувати базою для розроблення методології та принципів управління екологічним станом, підвищення гідроекологічної безпеки і оптимізації функціонування техно-екосистем АЕС. Назріла необхідність екологічної паспортизації водойм-охолоджувачів і джерел водопостачання АЕС.

За умов територіальної нерівномірності розподілу водних ресурсів, їх дефіциту, особливо у південних областях, хімічного й радіонуклідного забруднення та прогресуючого антропогенного навантаження вирішення проблемних завдань гідроекологічної безпеки АЕС має стати складовою загальної життєво важливої енергетичної безпеки України.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Протасов А.А., Панасенко Г.А., Бабарига С.П. Биологические помехи в эксплуатации энергетических станций, их типизация и основные гидробиологические принципы ограничения // Гидробиол. журн. — 2008. — Т. 44, № 5. — С. 36–53.
2. Линник П.М., Морозова А.О. Десорбція сполук азоту, фосфору і заліза з донних відкладів за дії різних чинників // Гідрологія, гідрохімія і гідроекологія. — К.: Обрій, 2006. — С. 73–81.
3. Линник П.Н. Донные отложения водоемов как потенциальный источник вторичного загрязнения водной среды соединениями тяжелых металлов // Гидробиол. журн. — 1999. — Т. 35, № 25. — С. 97–109.
4. Протасов А.А., Сергеева О.А., Кошелева С.И. и др. Гидробиология водоемов-охладителей тепловых и атомных электростанций Украины. — К.: Наук. думка, 1991. — 192 с.
5. Силаева А.А., Протасов А.А., Ярмошенко Л.П., Бабарига С.П. Инвазийные виды водорослей и беспозвоночных в водоеме-охладителе Хмельницкой АЭС // Гидробиол. журн. — 2009. — Т. 45, № 6. — С. 13–24.
6. Semenchenko V., Laenko T. First record of the invasive North American gastropod *Ferrissia fragilis* (Tryon, 1863) from the Pripyat River basin, Belarus // Aquatic Invasions. — 2008. — V. 3, N 1. — P. 80–82.
7. Ляшенко А.В., Слепнёв А.Е. Находка *Melanooides tuberculata* (Muller, 1774) в водоеме-охладителе Южно-Украинской атомной электростанции // Эколого-функциональні та фауністичні аспекти дослідження молюсків, їх роль у біоіндикації стану навколишнього середовища. — Житомир: ЖДУ ім. І. Франка, 2006. — С. 187–190.
8. Кесслер Г. Ядерная энергетика — М.: Энергоатомиздат, 1986. — 262 с.
9. Крышев И.И., Алексахин Р.М., Рябов И.Н. и др. Радиоактивное загрязнение районов АЭС — М.: Ядерное общество СССР, 1990. — 150 с.
10. Крышев И.И., Рязанцев Е.П. Экологическая безопасность ядерно-энергетического комплекса России. — М.: ИздАТ, 2010. — 496 с.
11. Романенко В.Д. Основы гидроэкології. — К.: Обереги, 2001. — 730 с.
12. Кузьменко М.І., Гудков Д.І., Кіреєв С.І. та ін. Техногенні радіонукліди у прісноводних екосистемах. — К.: Наук. думка, 2010. — 263 с.
13. Тимченко В.М. Экологическая гидрология водоемов Украины. — К.: Наук. думка, 2006. — 384 с.

В.Д. Романенко, М.И. Кузьменко, С.А. Афанасьев,
Д.И. Гудков, П.Н. Линник, А.А. Протасов,
В.М. Тимченко, В.И. Юришинец, В.М. Якушин

Институт гидробиологии
Национальной академии наук Украины
просп. Героев Сталинграда, 12, Киев, 04210, Украина

ГИДРОЭКОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ
АТОМНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ В УКРАИНЕ

Проанализированы экологические проблемы прилегающих к АЭС естественных и искусственных водоемов, в частности водоемов-охладителей, которые испытывают комплексную антропогенную нагрузку: тепловой сброс, химическое загрязнение, эвтрофикацию, механический стресс, а также дополнительное облучение искусственными радионуклидами. Рассмотрены гидрологические и гидрохимические процессы в условиях повышенных температур водной среды, продукционно-деструкционные процессы и формирование качества воды, биологические помехи, потенциальные паразитарные угрозы, а также поведение радионуклидов и радиоэкологические риски для гидробионтов в водных экосистемах. Изложены основные проблемные задачи гидроэкологической безопасности АЭС.

Ключевые слова: техно-экологическая система, атомная электростанция, водоем-охладитель, гидробионты, химическое и радионуклидное загрязнение.

V. Romanenko, M. Kuzmenko, S. Afanasyev,
D. Gudkov, P. Linnik, A. Protasov,
V. Timchenko, V. Yurishinets, V. Yakushin

Institute of Hydrobiology
of the National Academy of Sciences of Ukraine
12 Geroyev Stalingrada Ave., Kyiv, 04210, Ukraine

HYDROECOLOGICAL SAFETY OF NUCLEAR
POWER ENGINEERING IN UKRAINE

The ecological problems of natural and artificial reservoirs adjoining to the nuclear power plants are analyzed, in particular cooling ponds, which are influencing of all complexes of anthropogenic factors: thermal discharge, chemical pollution, eutrophication, mechanical stress, and additional irradiation by man-made radionuclides. The hydrological and hydrochemical of processes in condition of the high temperatures of aquatic environment, productional and destructional processes and forming of water quality, biological obstacles, potential vermin threats, and also behaviour of radionuclides and radioecological risks for hydrobionts in aquatic ecosystems are considered. The basic problem tasks of hydroecological safety of nuclear power engineering are stated.

Keywords: technoeological system, nuclear power plant, cooling pond, hydrobionts, chemical and radioactive contamination, monitoring.

Стаття надійшла 01.03.2012 р.