

Украинская академия аграрных наук  
ИНСТИТУТ ГИДРОТЕХНИКИ И МЕЛИОРАЦИИ

На правах рукописи

Казаков Сергей Викторович

НОРМИРОВАНИЕ СБРОСОВ РАДИОАКТИВНЫХ  
ВЕЩЕСТВ В ВОДОЕМЫ-ОХЛАДИТЕЛИ АЭС  
КОМПЛЕКСНОГО ХОЗЯЙСТВЕННОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ

Специальность 05.20.05 - Гидротехнические мелиорации

Автореферат

диссертации на соискание ученой  
степени кандидата технических наук

Киев - 1996

АВ 34.12

Диссертация является рукописью  
Работа выполнена в Институте гидротехники и мелиорации  
Украинской академии аграрных наук (УААН)

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор, академик УААН  
Коваленко Петр Иванович

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор,  
член-корреспондент НАНУ

Олейник  
Александр Яковлевич

кандидат технических наук,  
старший научный сотрудник

Рябцева  
Галина Петровна

Ведущая организация:

Украинский головной арендный проектно-исследовательский и  
научно-исследовательский институт «Укрводпроект»


Защита диссертации состоится 27.03 1996г. в 10<sup>00</sup> на  
заседании специализированного Ученого совета Д.01.26.01 по присужде-  
нию ученой степени доктора наук в Институте гидротехники и мелио-  
рации Украинской академии аграрных наук.

Отзывы и замечания на автореферат в двух экземплярах, заверен-  
ных печатью, просим направить по адресу: 252022, г.Киев - 22, ул. Василь-  
ковская, 37, ИГиМ.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИГиМ УААН.

Автореферат разослан «26» 02 1996 г.

Ученый секретарь  
специализированного совета,  
кандидат сельскохозяйственных  
наук, старший научный сотрудник

  
Фененко Л.М.  
ЛНБ ім. В. Стефаника  
АН України

ЛНБ України ім.В.Стефаника



00740268 (R)

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Украина испытывает острый дефицит водных ресурсов, сдерживающих развитие водоемких отраслей промышленности, сельского хозяйства и роста городов, водопотребление в стране уже достигло 30 млрд куб.м воды в год. Практически, все возобновляемые водные ресурсы вовлечены в техногенный оборот, отмечен рост до 20 млрд куб.м поступлений сбросов отработанных вод в поверхностные водоемы. Нормирование в них загрязняющих компонентов поддерживает условия для комплексного использования водоемов различными водопользователями. На нужды энергетики, в т.ч. атомных станций изымается ежегодно около 10 млрд куб.м воды, часть которой сосредоточена в непроточных или слабопроточных водоемах-охладителях, аккумулирующих в себе вторичное тепло, технологическое загрязнение, содержащее различные радионуклиды, негативно влияющие на ход биологических процессов в организмах растений, животных и человека, роль которых в жизненных цепях биосферы до настоящего времени практически малозвестна. Для привлечения ресурсов водоемов-охладителей АЭС к многоцелевому комплексному использованию требуется решение специфических санитарно-гигиенических и экологических задач, связанных с проблемой регламентирования допустимых сбросов (ДС) радионуклидов в водоемы.

**Цель работы** - разработать методику нормирования поступлений и сбросов радиоактивных веществ с АЭС в водоемы-охладители для их комплексного хозяйственного использования.

Для достижения поставленной цели решены следующие задачи:  
определены источники и пути поступления радиоактивных веществ в водоемы-охладители (В-О) АЭС;

получены и проанализированы данные о распределении радионуклидов в В-О ЧАЭС (в доаварийный и послеаварийный периоды) и в озере Дружский - В-О Игналинской АЭС (в предпусковой период);

разработана математическая модель переноса и накопления радионуклидов в компонентах экосистемы В-О АЭС, модель параметризована на базе экспериментальных натуральных данных;

разработан метод расчета допустимых поступлений и сбросов радиоактивных веществ в В-О АЭС.

**Объекты исследований:** Чернобыльская АЭС и Игналинская АЭС - как источники поступления радиоактивных веществ в их В-О.

В-О ЧАЭС (в до- и послеаварийный периоды) и оз. Дружский - В-О ИАЭС - как накопители, аккумулирующие поступающие с АЭС радионук-

лнды, и как объекты натуральных исследований по распределению радионуклидов по компонентам экосистем водоемов.

**Методика исследований.** Отбор проб гидробионтов производится в соответствии с «Руководством по изучению рыб и гидробионтов», Правдин И.Ф., Л., 1966 г. Отбор проб абиотических компонентов - в соответствии с «Руководством по гидрометеорологическим наблюдениям на озерах и водохранилищах», Л., 1986 г. и ОСТ-ом 9510174-86 «Охрана природы. Гидросфера. Общие требования к отбору проб контролируемых вод для анализа содержания радионуклидов». Определение удельной активности в пробах проводится методами ППД-спектрометрии и радиохимии по стандартизированным методикам «Методические рекомендации по санитарному контролю за содержанием радиоактивных веществ в объектах внешней среды». Под общей редакцией А.Н.Марья и А.С.Зыковой - М., МЗ СССР, 1980. Обработка полученных данных проводится на ЭВМ с использованием математического аппарата анализа случайных процессов.

**Научная новизна** заключается:

в разработке математической модели, основанной на данных натуральных исследований, проведенных на Чернобыльской и Игналинской АЭС, по миграции и накоплению радионуклидов в основных компонентах экосистемы В-О;

в определении структуры и способов вычисления значений  $\lambda_{оч}$  - параметра самоочищения воды В-О от радиоактивных веществ и в получении числовых значений этого параметра для наиболее радиологически значимых радионуклидов;

в разработке методики расчета допустимых поступлений (по всем путям) и сбросов (с жидкими отходами АЭС) радионуклидов в В-О.

**В диссертации защищаются следующие основные положения, полученные лично автором:**

схемы поступления и сбросов радионуклидов в В-О АЭС и данные о реальных поступлениях для В-О ЧАЭС и ИАЭС;

модель расчета накопления радионуклидов в экосистеме В-О комплексного хозяйственного использования;

структура, способы вычисления и числовые значения параметра самоочищения воды В-О от радионуклидов;

метод расчета допустимого поступления и сброса радиоактивных веществ в В-О АЭС.

**Практическая ценность.** Разработанная методика нормирования поступлений и сбросов радиоактивных веществ в В-О позволяет регламентировать радиационное воздействие эксплуатируемых и проектируемых АЭС на В-О и вовлечь их в многопрофильное хозяйственное исполь-

зование. Разработанная модель миграции и накопления радионуклидов в основных компонентах экосистемы В-О позволяет проводить оценки дозы для населения в процессе эксплуатации АЭС при использовании В-О для питьевого водоснабжения, орошения, рыбоводства и рыболовства, рекреационных целей.

**Реализация работы.** Результаты исследований использованы:

для оценок и прогнозов радиационной обстановки в В-О, выполненных по заказу ЧАЭС и ИАЭС;

при вводе в эксплуатацию энергоблоков ЧАЭС в послеаварийный период для оценки загрязнения охлаждающих вод и технологического оборудования, изложенной в документах, утвержденных руководством ЧАЭС и Главным конструктором АЭС с РБМК;

при разработке ОСТ-а - 9510174-86 «Охрана природы. Гидросфера. Общие требования к отбору проб контролируемых вод для анализа содержания радионуклидов»;

при разработке «Методики определения допустимых сбросов радиоактивных веществ в водоемы-охладители АЭС», РД-816-85, М., 1985 г.

**Апробация работы.** Основные положения работы и результаты исследований доложены и одобрены на:

Всесоюзной конференции «Радиационная безопасность населения и защита окружающей среды в связи с эксплуатацией атомных электростанций», г. Димитровград, май 1981 г.,

II-ой конференции стран-членов СЭВ «Обеспечение радиационной безопасности в связи с эксплуатацией АЭС», г. Вильнюс, май 1982 г.,

Конференции «Базовое экологическое состояние региона Игналинской АЭС», г. Зарасай, февраль 1984 г.,

VI Всесоюзной школе молодых ученых и специалистов по проблемам реакторов на тепловых нейтронах «Ядерная энергетика и окружающая среда», посвященной 30-летию ядерной энергетике, г. Каунас, сентябрь, 1984 г.,

Всесоюзном совещании «Радиозкологические исследования в зоне АЭС», п. Заречный, июль, 1985 г.,

I - IV Международных конференциях по проблемам ликвидации последствий аварии на Чернобыльской АЭС, 1988 - 1994 г., г. Чернобыль - в/п Зеленый Мыс.

**Публикации.** Результаты работы опубликованы в монографии и 10 научных статьях; вошли в ОСТ—9510174-86 «Охрана природы. Гидросфера. Общие требования к отбору проб контролируемых вод для анализа содержания радионуклидов» и «Методику определения допустимых сбросов радиоактивных веществ в водоемы-охладители АЭС», РД - 816-85, М., 1985 г.

**Объем работы:** Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, выводов и рекомендаций, списка использованной литературы. Изложена на 110 страницах машиннописного текста, иллюстрирована 10 рисунками, содержит 28 таблиц. Список литературы составляет 130 наименований.

### КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе рассмотрены источники и пути формирования радиоактивного загрязнения водоемов-охладителей АЭС с РБМК. Со стороны станции - это поступление радионуклидов с жидкими сбросами и за счет аэрозольных выпадений. Со стороны глобального загрязнения биосферы - это выпадение аэрозолей на зеркало водоемов, смыв их с территории водосбора, поступление за счет подпитки водоема сторонних источников. По степени значимости источники поступлений располагаются в ряд:

сбросы дебалансных вод ( 1 - 10 Ки/год в начальный период эксплуатации,  $10^{-1}$  -  $10^{-3}$  Ки/год через 4 - 5 лет эксплуатации );

протечки в охлаждающую техническую воду ( 0,1 - 1 Ки/год );

сбросы вод санитарной и душевых ( ( 0,25-5 )  $\cdot 10^{-4}$  Ки/год );

аэрозольные поступления станционных радионуклидов на зеркало (  $2,5 \cdot 10^{-3}$  Ки/год );

смыв аэрозольных радионуклидов с территории водосбора ( 0,004 - 0,4 Ки/год );

другие источники (  $5 \cdot 10^{-5}$  -  $2 \cdot 10^{-2}$  Ки/год по  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$  ).

Сравнение нормализованных сбросов АЭС с РБМК со сбросами АЭС с другими типами реакторов позволяет заключить, что они находятся на уровне сбросов АЭС с ВВЭР и ниже сбросов зарубежных АЭС с реакторами типа BWR и PWR.

В связи с тем, что в целом поступления радионуклидов с АЭС в водные экосистемы невелики, уровни содержания таких радионуклидов, как  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$ , находятся в пределах изменения глобального фона загрязнения биосферы. Радионуклиды чисто станционного происхождения ( $^{60}\text{Co}$ ,  $^{54}\text{Mn}$ ,  $^{65}\text{Zn}$ ) обнаруживаются вблизи АЭС только в биоиндикаторах: водоросли, рыба, моллюски-фильтраторы. Используя высокочувствительную низкофоновую технику гамма-спектрометрирования можно обнаруживать еще такие радионуклиды как  $^{134}\text{Cs}$ ,  $^{51}\text{Cr}$ ,  $^{59}\text{Fe}$ ,  $^{58}\text{Co}$  - нарабатываемые в процессе эксплуатации АЭС.

Охрана В-О АЭС от загрязнения радиоактивными веществами в настоящее время базируется на санитарно-гигиеническом принципе радиационной защиты: человек - самое радиочувствительное звено живой при-

роды. Этот принцип заложен и реализован в основных нормативных документах, регламентирующих радиационное воздействие: НРБ-76/87, ОСП-72/87, СП АС-88. Согласно этим документам нормируется дозовый предел (квота) от предельной годовой дозы для населения за счет хозяйственного использования В-О, при этом для каждой АЭС индивидуально устанавливается годовой допустимый сброс радиоактивных веществ в В-О вместе с жидкими отходами.

Несмотря на то, что в области радиэкологии водных систем накоплен значительный объем знаний о поведении радионуклидов, имеются работы о нормировании содержания радиоактивных веществ в компонентах экосистем, формирующих дозу для населения при многопрофильном использовании В-О, тем не менее методика расчета ДС, основанная на модели миграции радионуклидов в сложных, с точки зрения гидрологии и гидробиологии, водных экосистемах (перегретые, слабoproточные или замкнутые) В-О отсутствует.

Вторая глава посвящена экспериментальным исследованиям поведения радионуклидов в В-О, выполненным в натуральных условиях: на В-О ЧАЭС (как в доаварийный период, так и после аварии) и на озере Дружский - В-О Игналинской АЭС (в предпусковой период). Экспериментальные исследования содержания радионуклидов в различных компонентах В-О выполнялись по стандартным методикам с использованием метрологически аттестованных измерительных установок. При анализе экспериментальных данных выявлен ряд закономерностей. Для оз. Дружский: запас  $^{137}\text{Cs}$  в донных отложениях составляет (99,0 - 99,9)%,  $^{90}\text{Sr}$  - (85 - 95)%; в воде озера запас  $^{137}\text{Cs}$  - (0,06 - 1,0)%,  $^{90}\text{Sr}$  - (5 - 15)%. В биотических компонентах - несмотря на то, что удельная концентрация радионуклидов в них в 20-1000 превышает удельную концентрацию в воде - запас активности пренебрежимо мал по сравнению с абиотическими компонентами. Для В-О ЧАЭС: в процессе нормальной эксплуатации станции, помимо  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$  обнаруживаются в компонентах экосистемы такие радионуклиды стационарного происхождения, как  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{54}\text{Mn}$ ,  $^{134}\text{Cs}$ . Характер распределения по компонентам экосистемы этих радионуклидов: (95-98)% - донные отложения; (0,3 - 3,0)% - вода; (0,25 - 1,0)% - биотические компоненты. Глубина проникновения радионуклидов в донные отложения 10-15 см, причем не за счет диффузии, а за счет роста слоя отложений вверх. В начальный период эксплуатации ЧАЭС (до 1 года) статистически достоверно выявлялось различие в удельной активности воды сбросного канала и остальной акватории В-О; в последующие годы статистически достоверно то, что поле концентраций радионуклидов в воде В-О пространственно - однородно. Содержание радионуклидов в донных отложениях В-О

ЧАЭС зависит не от месторасположения участка дна, а от типа донных отложений на этом участке.

Сделан вывод: модель переноса и накопления радионуклидов в экосистеме В-О можно разрабатывать в рамках динамических моделей с сосредоточенными параметрами. В период аварии 26.04.86 г. на 4-ом энергоблоке ЧАЭС В-О станции подвергся сильнейшему загрязнению как за счет выпадения аэрозольных частиц, так и за счет сбросов в В-О радиоактивных жидких отходов. Существенно шире стал и спектр радионуклидов-загрязнителей:  $^{141}\text{Ce}$ ,  $^{144}\text{Ce}$ ,  $^{103}\text{Ru}$ ,  $^{106}\text{Ru}$ ,  $^{140}\text{Ba}$ ,  $^{140}\text{La}$ ,  $^{131}\text{I}$ ,  $^{95}\text{Zr}$ ,  $^{95}\text{Nb}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{134}\text{Cs}$ ,  $^{90}\text{Sr}$ .

Нужно отметить, что уже через месяц около 95% активности, поступившей в В-О ЧАЭС, сосредоточилось в донных отложениях. В последующие годы наблюдается постепенный спад удельной активности воды (по долгоживущим радионуклидам), депонирование их в донные отложения и осреднение распределения радионуклидов по акватории В-О (как в воде, так и в донных отложениях). Загрязнение воды по радионуклидам  $^{90}\text{Sr}$  и  $^{137}\text{Cs}$  уменьшается очень медленно и определяется процессами вторичного (из донных отложений) загрязнения и постепенного захоронения радионуклидов в толщу отложений, не участвующую в обменных процессах.

В третьей главе представлена модель миграции радионуклидов в экосистеме В-О АЭС, которая может служить основой для нормирования поступлений и сбросов жидких отходов в В-О.

Структура методики расчета допустимых сбросов (ДС):

введение квоты от предела дозы для населения при комплексном использовании В-О АЭС,

нормирование содержания радионуклидов в компонентах экосистемы В-О, участвующих в формировании дозы для населения,

расчет (модель) переноса и накопления радионуклидов в компонентах экосистемы В-О,

расчет допустимого поступления радиоактивных веществ в В-О,

анализ путей поступления радиоактивных веществ в В-О,

расчет допустимого сброса.

Модель миграции и накопления радионуклидов в экосистеме В-О строится из самых общих соображений; первоначально - на уровне популяций, а затем, исходя из целей построения модели, производится ее редуцирование. Таким образом, при санитарно-гигиеническом подходе к нормированию, поведение радионуклидов в В-О можно описать в рамках трехкомпонентной модели: « вода - гидробионты - донные отложения ».

В процессе редуцирования и построения трехкомпонентной модели «вода - гидробионты - донные отложения» использовались основные положения, в которых реализуются общие закономерности поведения радионуклидов в экосистеме В-О: 1) процесс перераспределения поступивших в воду В-О радионуклидов по абиотическим и биотическим компонентам экосистемы и связь компонентов экосистемы В-О со сторонними объектами биосферы определяется действующими гидрологическими и биогеохимическими факторами; 2) в любой момент времени содержание радионуклидов в биокон компонентах В-О много меньше, чем в абиотических компонентах; 3) содержание радионуклидов в биотических компонентах экосистемы В-О является производной величиной от содержания радионуклидов в абиотических компонентах.

Схема перераспределения радионуклидов приведена на рисунке.

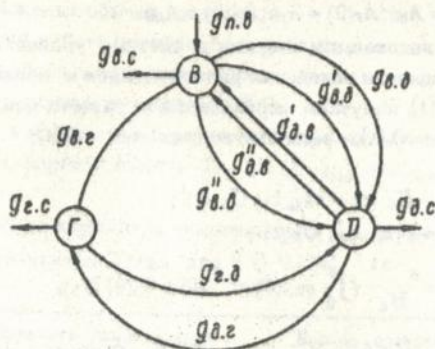


Рис. Схема перераспределения радионуклидов в модели «вода - гидробионты - донные отложения»

В — вода В-О (водный резервуар радионуклидов); Г — гидробионты (биотический резервуар); Д — донные отложения (донный резервуар);  $G$  — перенос радионуклидов (Ки);  $g_{н.в}$  — внешние поступления радионуклидов в воду В-О (источник);  $g_{в.с}$ ,  $g_{г.с}$ ,  $g_{д.с}$  — необратимые потери (стоки) радионуклидов из водного, биотического и донного резервуаров соответственно;  $g_{в.г}$  — накопление радионуклидов гидробионтами из воды;  $g_{г.д}$  — поступление радионуклидов из биотического резервуара на дно В-О за счет отмирания части гидробионтов и их прижизненных выделений;  $g_{д.г}$  — накопление радионуклидов гидробионтами из донных отложений;  $g_{в.д}$  — поступление радионуклидов из воды на дно за счет осаждения минеральных взвесей и фильтрации;  $g'_{в.д}$  — поступление радионуклидов из воды на дно за счет сорбции растворенной фракции радионуклидов донными отложениями;  $g_{д.в}$  — поступление радионуклидов из донных отложений в воду за счет их десорбции со дна;  $g'_{д.в}$  — осаждение взмученной фракции донных отложений из воды на дно В-О;  $g''_{д.в}$  — поступление радионуклидов со дна в воду при взмучивании донных отложений

Динамика накопления радионуклидов в модели «вода - гидробионты - донные отложения» описывается системой уравнений:

$$\begin{aligned}\frac{dA_B(t)}{dt} &= g_{пв} - g_{вг} - g_{вд} - g_{вс} - g_{вд'} + g_{дв} - g_{вд'} + g_{дв'} - \lambda A_B(t); \\ \frac{dA_T(t)}{dt} &= g_{вг} + g_{дг} - g_{гд} - g_{гс} - \lambda A_T(t); \\ \frac{dA_D(t)}{dt} &= g_{вд} + g_{гд} - g_{дг} - g_{дс} + g_{вд'} - g_{дв} + g_{вд'} - g_{дв'} - \lambda A_D(t); \quad (1)\end{aligned}$$

где  $A_B(t)$ ,  $A_T(t)$ ,  $A_D(t)$  — накопленная активность радионуклидов в воде, гидробионтах и донных отложениях (Ки),

$\lambda$  — постоянная распада радионуклида.

Начальные условия для системы (1):

$$A_B(0) = A_B0; A_T(0) = A_T0; A_D(0) = A_D0.$$

Задаваясь потоковыми членами в системе уравнений (1), используя общие закономерности поведения радионуклидов и проводя затем упрощения системы (1), получаем выражения для расчета концентрации радионуклидов в воде —  $C_B(t)$  и в донных отложениях —  $C_D(t)$ :

$$C_B(t) = \bar{C}_B(t) + f(k_D, k_B) \bar{C}_D(t); \quad (2)$$

$$C_D(t) = \varphi(k_B, k_D) \bar{C}_D(t); \quad (3)$$

$$\bar{C}_B(t) = \frac{e^{-\lambda t}}{M_B} \left( \int_0^t g_{пв}(\theta) e^{\lambda \theta} d\theta + C_B(0) M_B \right); \quad (4)$$

$$C_D(t) = \frac{e^{-\lambda t}}{M_D} \left[ \int_0^t w e^{(\lambda - \wedge) \theta} \left( \int_0^\theta g_{пв}(\tau) e^{\lambda \tau} d\tau + C_B(0) M_B \right) d\theta + C_D(0) M_D \right]; \quad (5)$$

$$f(k_D, k_B) = \frac{k_D + k_B + \frac{M_B}{M_D}}{\left( k_D + \frac{M_B}{M_D} \right) \left( k_B + \frac{M_B}{M_D} \right)}; \quad \varphi(k_D, k_B) = \frac{k_D k_B}{\left( k_D + \frac{M_B}{M_D} \right) \left( k_B + \frac{M_B}{M_D} \right)}. \quad (6)$$

$$\lambda = \alpha_{вг} M_T + \varepsilon_{в} \frac{V}{H} + \lambda + \frac{G_{ф} + G_{ст} + \xi_{вп} G_{исп}}{M_B}; \quad (7)$$

$$w = \alpha_{вг} M_T + \varepsilon_{в} \frac{V}{H} + (1 - \xi_{вф}) \frac{G_{ф}}{M_B}. \quad (8)$$

где:  $M_B, M_D, M_T$  — масса воды, донных отложений, гидробионтов, соответственно;  $k_D$  — коэффициент распределения активности в системе вода-взвесь;  $k_B$  — коэффициент, учитывающий переход радионуклидов из донных отложений в воду при их взмучивании;  $G_{ф}$ ,  $G_{ст}$ ,  $G_{исп}$  — расходы воды В-О на фильтрацию, сток и испарение, соответственно;  $\xi_{вп}$ ,  $\xi_{вф}$  — коэффициент распределения дан-

ного радионуклида в системах вода - пар и вода - фильтрат, соответственно;  $V$  - средняя гранулометрическая крупность взвесей в воде В-О;  $H$  - глубина (средняя) В-О;  $\epsilon_{\text{в}}$  - доля активности данного радионуклида в воде В-О, находящаяся на взвесах.

Заметим, что в формулы (7),(8) входит общий параметр

$$\lambda_{\text{оч}} = \alpha_{\text{в,г}} M_{\Gamma} + \epsilon_{\text{в}} \frac{V}{H}; \quad (9)$$

который назовем параметром ( постоянной ) самоочищения воды В-О от данного радионуклида. Определив его значение, выражения (2) - (8) можно использовать в практических расчетах, так как другие параметры, входящие в эти выражения обычно известны.

В диссертационной работе приводится несколько методик расчета  $\lambda_{\text{оч}}$ , в зависимости от набора экспериментальных данных о содержании радионуклидов в воде и донных отложениях В-О.

Для В-О ЧАЭС в доаварийный период получены следующие значения  $\lambda_{\text{оч}}$  (табл.1). Причем, вариабельность  $\lambda_{\text{оч}}$ , т.е.  $(\lambda_{\text{оч}})_{\text{max}} / (\lambda_{\text{оч}})_{\text{min}} = 3$ .

Таблица 1. Значения параметра самоочищения  $\lambda_{\text{оч}}$  и периода полуочищения  $T_{1/2\text{оч}}$  для В-О ЧАЭС

Нуклид	Параметр самоочищения $\lambda_{\text{оч}}$ , сут <sup>-1</sup> (год <sup>-1</sup> )	Период полуочищения $T_{1/2\text{оч}}$ , сут (год)
<sup>54</sup> Mn	0,7 (260)	1,0 (2,8 · 10 <sup>-3</sup> )
<sup>60</sup> Co	0,35 (130)	2,0 (5,6 · 10 <sup>-3</sup> )
<sup>134</sup> Cs	0,045 ( 16)	16 (4,5 · 10 <sup>-3</sup> )
<sup>137</sup> Cs	0,055 ( 20)	13 (3,6 · 10 <sup>-3</sup> )
<sup>90</sup> Sr	1,2 · 10 <sup>-3</sup> (0,45)	570 (1,6)

Для оз. Друкшяй по данным, полученным в предпусковой период, для <sup>137</sup>Cs  $\lambda_{\text{оч}} = (0,03 - 0,25)$  сут<sup>-1</sup>; для <sup>90</sup>Sr  $\lambda_{\text{оч}} = (0,25 - 2,8) 10^{-3}$  сут<sup>-1</sup>.

Наибольшую сложность вызывает определение  $\lambda_{\text{оч}}$  на этапе проектирования норм на поступление радионуклидов в В-О АЭС, т.к. на этапе снятия «нулевого фона» можно получить данные для  $\lambda_{\text{оч}}$  только радио-

нуклидов глобального загрязнения -  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$ , а нормы должны учитывать поступление всего спектра радионуклидов, нарабатываемых в процессе эксплуатации АЭС. В работе предложена процедура вычисления  $\lambda_{\text{оч}}$  для проектных расчетов. Причем, при этом существенно сокращается интервал изменения  $\lambda_{\text{оч}}$ , полученных в ходе обработки экспериментальных данных:

$$\lambda_{\text{оч}}^{\min} (^{137}\text{Cs}) \leq \lambda_{\text{оч}} (^{137}\text{Cs}) \leq \lambda_{\text{оч}}^{\max} (^{90}\text{Sr}) \frac{k_{\text{д}} (^{137}\text{Cs})}{k_{\text{д}} (^{90}\text{Sr})}; \quad (10)$$

$$\lambda_{\text{оч}}^{\min} (^{137}\text{Cs}) \frac{k_{\text{д}} (^{90}\text{Sr})}{k_{\text{д}} (^{137}\text{Cs})} \leq \lambda_{\text{оч}} (^{90}\text{Sr}) \leq \lambda_{\text{оч}}^{\max} (^{90}\text{Sr}); \quad (11)$$

Например, для оз. Друкшяй, таким образом, получаем: для  $^{137}\text{Cs}$   $\lambda_{\text{оч}} - (0,030 - 0,042) \text{ сут}^{-1}$ ; для  $^{90}\text{Sr}$   $\lambda_{\text{оч}} - (2,0 - 2,8) 10^{-3} \text{ сут}^{-1}$ .

Для В-О ЧАЭС:

$$0,040 \text{ сут}^{-1} \leq \lambda_{\text{оч}} (^{137}\text{Cs}) \leq 0,054 \text{ сут}^{-1};$$

$$0,0027 \text{ сут}^{-1} \leq \lambda_{\text{оч}} (^{90}\text{Sr}) \leq 0,0036 \text{ сут}^{-1};$$

т.е. вариабельность значений удаётся снизить до 1,2 - 1,5.

Исходя из значений величин, полученных в ходе снятия «нулевого фона», значения  $\lambda_{\text{оч}}$  для  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$  определяются по формуле, рекомендованной НКДАР:

$$\lambda_{\text{оч}} = \frac{v_3 k_{\text{д}}}{[H (1 + m k_{\text{д}})]}, \quad (12)$$

где  $v_3$  - темп седиментации взвесей (скорость заиления),  $\text{кг}/(\text{м}^2 \text{ год})$ ,  
 $m$  - концентрация взвешенных частиц в воде,  $\text{кг}/\text{м}^2$ ,

а далее по этой же формуле рассчитываются  $\lambda_{\text{оч}}$  для любого радионуклида по рекомендованным НКДАР значениям  $k_{\text{д}}$ .

В послеаварийный период, значения  $\lambda_{\text{оч}}$  для В-О ЧАЭС можно было сравнительно легко рассчитать, наблюдая темп снижения удельной активности воды на протяжении первых месяцев после аварии. Полученные значения  $\lambda_{\text{оч}}$  приведены в табл. 2.

В четвертой главе на основе модели миграции и накопления радионуклидов в компонентах экосистемы В-О, изложенной в главе 3, разработана «Методика определения допустимых сбросов радиоактивных веществ В-О АЭС» (сокращенно - Методика ДС В-О).

С учетом комплексного народохозяйственного использования Методика ДС В-О позволяет определять:

допустимое годовое поступление (ДГП) радиоактивных веществ в В-О - суммарное поступление радионуклидов за год в В-О (отдельно по каждому радионуклиду и для их смеси);

Таблица 2. Значения параметров самоочищения воды В-О ЧАЭС  
( по данным в послеаварийный период )

Нуклид	Постоянная распада сут <sup>-1</sup>	Постоянная само- очищения воды В-О, сут <sup>-1</sup>	Период полувыведе- ния радионуклидов из воды, T <sub>1/2оч</sub> , сут
<sup>141</sup> Ce	0,021	0,099 - 0,149	4,1 - 5,5
<sup>144</sup> Ce	0,0024	0,12 - 0,17	4,1 - 5,5
<sup>103</sup> Ru	0,0176	0,092 - 0,132	4,6 - 6,5
<sup>140</sup> Ba	0,0542	0,066 - 0,106	4,3 - 5,8
<sup>131</sup> I	0,086	0,011 - 0,034	5,8 - 7,1
<sup>95</sup> Zr	0,0108	0,109 - 0,149	4,4 - 6,0
<sup>95</sup> Nb	0,0198	0,10 - 0,14	4,2 - 5,6
<sup>140</sup> La	0,413	0,066 - 0,106	4,3 - 5,8
<sup>134</sup> Cs	9,21 · 10 <sup>-4</sup>	0,037 - 0,072	9,5 - 18,3
<sup>137</sup> Cs	6,35 · 10 <sup>-5</sup>	0,041 - 0,077	9,0 - 17,0
<sup>90</sup> Sr	6,3 · 10 <sup>-5</sup>	0,003 - 0,004	180 - 230

Период полувыведения радионуклидов  $T_{1/2оч} = 0,693 / (\lambda + \lambda_{оч})$ .

допустимый годовой сброс (ДГС) радиоактивных веществ вместе с жидкими отходами АЭС;

допустимое разовое поступление (ДРП) радиоактивных веществ в В-О, с целью разработки мероприятий по эксплуатации В-О при возникновении на АЭС аварийных ситуаций.

Отметим, что ДГП и ДРП характеризуют только водоем как резервуар для потенциального или фактического приема радиоактивных веществ; ДГС является уже характеристикой не только В-О, но и самой АЭС.

В Методике ДС В-О рассматриваются следующие пути формирования дозы для населения: купание, рыбная ловля, плавание на лодке, пребывание на пляже, пребывание на заливных землях, питьевое водоснабжение, пребывание на орошаемых землях, водопой скота (мясо, молоко), потребление рыбы, поливное земледелие (овощи, фрукты), корм скота на орошаемых землях (мясо, молоко).

Кроме установления ДГП, ДГС, ДРП Методика ДС В-О может быть использована для определения:

допустимых значений удельной активности радионуклидов в жидких сбросах АЭС, поступающих в В-О;

значений допустимых концентраций радиоактивных веществ в воде и других компонентах В-О;

консервативной оценки дозы для населения в условиях реальных поступлений радиоактивных веществ в В-О;

объема и направлений мероприятий по снижению поступления радионуклидов в В-О и снижению дозы для населения при комплексном использовании В-О.

Теоретической основой расчета ДГП служит модель (2) - (9). Если  $g_{пв}(t) = \text{const} = g_{пв}$ , т.е. загрязнение носит постоянный характер, при условии:  $C_{в}(t_3) = ДК_{в}$ ;  $C_{д}(t_3) = ДК_{д}$ , где  $t_3$  - время эксплуатации АЭС, имеем:

$$g_{пв}(ДК_{в}) = (ДК_{в} + C_{во} e^{-\lambda t} - C_{во} e^{-\lambda t} f(k_{д}, k_{в}) - f(k_{д}, k_{в}) \frac{w C_{во} M_{в}}{M_{д}(\lambda - \Lambda)} (e^{-\lambda t} - e^{-\Lambda t})) / (\frac{1 - e^{-\lambda t}}{\Lambda M_{в}} + f(k_{д}, k_{в}) \times \frac{w}{\Lambda M_{д}} \frac{\lambda(1 - e^{-\lambda t}) - \Lambda(1 - e^{-\Lambda t})}{\lambda(\lambda - \Lambda)}); \quad (13)$$

$$g_{пв}(ДК_{д}) = (ДК_{д} - \varphi(k_{д}, k_{в}) \left[ \frac{w C_{во} M_{в}}{M_{д}(\lambda - \Lambda)} (e^{-\lambda t} - e^{-\Lambda t}) + C_{до} e^{-\lambda t} \right]) / (\varphi(k_{д}, k_{в}) \frac{w}{\Lambda M_{д}} \left[ \frac{\lambda(1 - e^{-\lambda t}) - (1 - e^{-\Lambda t})}{-\Lambda(\lambda - \Lambda)} \right]). \quad (14)$$

Т.к.  $ДК_{в}$  и  $ДК_{д}$ , вообще говоря, независимы (значения этих величин определяются по различным цепочкам формирования дозы для населения), то получаем:

$$ДГП = \min \{ g_{пв}(ДК_{в}); g_{пв}(ДК_{д}) \}. \quad (15)$$

Для радионуклидов, у которых  $T_{1/2} \ll t_3$ :

$$ДГП = \lambda \Lambda M_{д} \min \left\{ \frac{ДК_{в}}{\lambda \frac{M_{д}}{M_{в}} + w f(k_{д}, k_{в})}; \frac{ДК_{д}}{w \varphi(k_{д}, k_{в})} \right\}. \quad (16)$$

Эта же формула может быть использована в качестве наиболее консервативной оценки ДГП и для тех радионуклидов, у которых  $T_{1/2} = t_3$  или  $T_{1/2} > t_3$ .

$$\text{Для смеси радионуклидов: } ДГП_{\Sigma} = \frac{100\%}{\sum_{i=1}^n (\eta_i / ДГП_i)}, \quad (17)$$

где: ДГП - допустимое годовое поступление радионуклидов в смеси известного состава,  $\eta_i$  - процентный вклад  $i$ -ого радионуклида в смеси,  $n$  - число радионуклидов в смеси.

ДРП находится по формулам (2) - (8) при

$$g_{п.в}(t) = B \delta(t - t_0) + g_{п.в}(t_0), \quad (18)$$

где:  $B$  - активность данного радионуклида в пиковом поступлении,  $t_0$  - момент возникновения такого поступления,  $\delta(t - t_0)$  - дельта-функция,  $g_{п.в}(t_0)$  - известная функция поступления радионуклида до момента  $t_0$ .

ДГС рассчитывается по формуле:

$$ДГС = ДГП - C_{в.пр} G_{пр} - g_{вып} S - Q_{азр}, \quad (19)$$

где:  $C_{в.пр}$  - удельная активность данного радионуклида в воде естественных притоков,  $G_{пр}$  - расход воды притоков,  $g_{вып}$  - плотность поступлений радионуклида на зеркало воды В-О площадью  $S$  за счет глобальных выпадений,  $Q_{азр}$  - поступление радионуклида в В-О из аэрозольного выброса АЭС, определяемое по формуле

$$Q_{азр}(t) = \lambda_{эф} \left( \int_0^t f_{ат}(\theta) e^{(\lambda + \lambda_{эф})\theta} d\theta + s_{вод} P_{пов} \right) e^{(\lambda + \lambda_{эф})t} + f_3(t), \quad (20)$$

где:  $f_{ат}(t)$  - поступление данного радионуклида на территорию водосбора В-О за счет выпадения этого радионуклида из аэрозольного выброса АЭС;  $f_3(t)$  - выпадение радионуклида на зеркало воды В-О;  $s_{вод}$  - площадь территории водосбора В-О;  $P_{пов}$  - плотность поверхностной глобальной загрязнения почв территории водосбора;  $\lambda_{эф}$  - постоянная смыва радионуклида с почв территории водосбора в В-О.

«Методика ДС В-О» является руководящим документом для АЭС и предприятий, занятых вопросами проектирования и эксплуатации АЭС.

## ВЫВОДЫ

1. Определены источники и пути поступления радиоактивных веществ в В-О АЭС. Оценен вклад жидких сбросов, аэрозольных выбросов, глобальных поступлений в загрязнение В-О радиоактивными веществами.

2. Получены и проанализированы данные о распределении радионуклидов в В-О ЧАЭС (в доаварийный и послеаварийный периоды) и оз. Друкшяй - В-О Игналинской АЭС (в предпусковой период). В биотических компонентах В-О содержится 99,0 - 99,9% общего запаса активности в экосистеме. Донные отложения - место депонирования радионуклидов - (85 - 95)% запаса активности. Поле концентраций радионуклидов в воде В-О пространственно однородно, а в донных отложениях - определяется типом донных грунтов.

3. Разработана математическая модель переноса и накопления радионуклидов в компонентах экосистемы В-О АЭС; модель параметризована на базе экспериментальных натуральных данных. Структурная схема поведения радионуклидов в экосистеме В-О представлена трехкомпонентной динамической моделью: вода - гидробионты - донные отложения. Для параметрической идентификации модели введен системный параметр - параметр самоочищения воды В-О от радиоактивных веществ. Разработаны методы определения численных значений этого параметра по данным натурных наблюдений.

4. Разработан метод расчета допустимых поступлений и сбросов радиоактивных веществ в В-О АЭС. С учетом данных о формировании дозы для населения и данных о регламентировании содержания радионуклидов в воде и донных отложениях В-О разработана «Методика определения допустимых сбросов радиоактивных веществ в В-О АЭС».

Результаты работы могут быть применены для решения задач эксплуатации водоемов-хвостохранилищ промышленных объектов и при разработке природоохранных мероприятий для предприятий, на которых имеются сбросы тяжелых металлов в водоемы комплексного хозяйственного использования.

Основные положения диссертационной работы опубликованы в следующих печатных работах:

1. Бадяев В. В., Егоров Ю. А., Казаков С. В. Охрана окружающей среды при эксплуатации АЭС. — М.: Энергоатомиздат, 1990. — 184 с.

2. Егоров Ю. А., Казаков С. В. Принципы математического моделирования при прогнозировании и управлении жидкими радиоактивными сбросами АЭС // Радиационная безопасность и защита АЭС. — 1985. — Вып. 9. — С. 160—173.

3. Егоров Ю. А., Казаков С. В. Прогнозирование допустимого сброса радионуклидов в водоемы-охладители АЭС // Радиационная безопасность и защита АЭС. — 1986. — Вып. 10. — С. 108—118.

4. Егоров Ю. А., Казаков С. В., Стауриш Н. В. Влияние глубины водоема на содержание радионуклидов в донных отложениях // Радиационная безопасность и защита АЭС. — 1986. — Вып. II. — С. 75—86.

5. Казаков С. В., Комаров В. И., Струэнзе Р. Л., Тиханов Э. К. Радиационное состояние пруда-охладителя ЧАЭС в послеаварийный период // Чернобыль - 88. Доклады 1-го Всесоюзного научно-технического совещания по итогам ликвидации последствий аварии на Чернобыльской АЭС. — 1989. — Том 5, часть 2. — С. 193—195.

6. Казаков С. В., Чулкова Е. В. Математическое моделирование в вопросах нормирования радиационного воздействия АЭС на водоемы-охладители // Тез. докл. VI Всесоюзной школы молодых ученых и специалистов по проблемам реакторов на тепловых нейтронах. — Каунас, 1984. — С. 14—23.

7. Конопович А. Л., Хамьяков Л. П., Урываев А. П., Смирнов Н. К., Казаков С. В., Комаров В. Н. Фильтрация загрязненных вод водоема-охладителя Чернобыльской АЭС в р. Припять // Атомная энергия. — 1991. — Том 71, вып. 6. — С. 538—541.

8. Михазяня А. И., Тер-Сааков А. А., Ермаков А. Н., Казаков С. В., Ковалев А. В. Эволюция физико-химических форм радиоактивных выделений в 60-км зоне ЧАЭС // Чернобыль - 92. Доклады 3-го Всесоюзного научно-технического совещания по итогам ликвидации последствий на Чернобыльской АЭС. — в/п Зеленый Мыс, 1992. — Том 1, часть 2. — С. 218—221.

9. Сухоручкин А. К., Казаков С. В., Васильченко Д. Л., Иванов Ю. П. Оценка допустимого сброса стронция - 90 с водами р. Припять // Чернобыль - 92. Доклады 3-го Всесоюзного научно-технического совещания по итогам ликвидации последствий на Чернобыльской АЭС. — в/п Зеленый Мыс, 1992. — Том 1, часть 2. — С. 258 - 270.

10. Методика определения допустимых сбросов радиоактивных веществ в водоемы-охладители ЧЭС. - М., 1985.

11. Моделирование радиоактивного загрязнения водоема-охладителя АЭС с РБМК / Ю. А. Егоров, Е. А. Иванов, С. В. Казаков, В. Д. Толстых // Радиационная безопасность и защита АЭС. — 1982. — Вып. 7. — С. 143—159.

12. Охрана природы. Гидросфера. Общие требования к отбору проб контролируемых вод для анализа содержания радионуклидов. ОСТ - 9510174-86. - М., 1986.

13. Удельная активность радионуклидов в основных компонентах экосистем в предпусковой период в районе Игналинской АЭС / Л. Г. Варначева, Ю. А. Егоров, С. В. Казаков, С. В. Леонов, Ю. В. Папкратьев, Н. Н. Соловьева // Тез. докл. республик. конференции по безопасному экологическому состоянию региона Игналинской АЭС. — Зарасая, 1984. — С. 41—59.

Казаків С. В. Нормування скидань радіоактивних речовин у водойми - охолоджувачі АЕС комплексного господарського використання (рукопис) - Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук із спеціальності 05.20.05 - Гідротехнічні меліорації, Інститут гідротехніки і меліорації, Київ, 1996.

Досліджено шляхи міграції та накопичення радіонуклідів у компонентах екосистем водойм-охолоджувачів АЕС. Розроблена математична модель переносу та накопичення радіонуклідів для трьохкомпонентної динамічної моделі екосистеми водойми-охолоджувача «вода - гідробіонти - донні відкладення» та методи розрахунку допустимих надходжень та скидань радіоактивних речовин. Для параметричної ідентифікації математичної моделі запроваджено системний параметр - параметр самоочищення води водойми-охолоджувача від радіоактивних речовин. Впроваджена «Методика визначання допустимих скидань радіоактивних речовин у водойми-охолоджувачі АЕС» як керівний документ для АЕС та підприємств, зайнятих питаннями проектування та експлуатації АЕС.

Kazakov S.V. Duties of radio-active substances escaped into the cooling tanks at atomic stations (AS) of integrated economic use. Theses for the Degree of Candidate of technical sciences on speciality 05.20.05 - Hydrotechnical Reclamations.- Kyiv, IH&M.

Ways of migration and accumulation of radionuclides in components of cooling tanks ecosystems at AS were studied. It was worked out the mathematical model of migration and accumulation for radionuclides three-component dynamic model of cooling tank ecosystem «water - hydrobionites - bed loads» as well as methods of calculating permissible volumes and escapes of radio-active substances. To identify the parameters of the mathematical model it was used a system parameter-the water self sanitation from radio-active substances in cooling tanks. It was implemented «Methods of evaluating the permissible escapes of radio-active substances into AS cooling tanks» as an instruction document for AS and enterprises dealing with designing and maintenance of AS.

Ключові слова: водойми - охолоджувачі АЕС, радіонукліди, перерозподіл, модель «вода - гідробіонти - донні відкладення».

183

44430

AB 34.129