

скорость на расстоянии 240 мм может быть оценена 8,3% средней скорости основного течения. При этом уменьшается амплитуда температурной неоднородности примерно на 33%, что подтверждает хорошие перемешивающие характеристики решетки: за двумя или тремя последовательно установленными решетками температурная неоднородность уменьшится в 2 и 3 раза соответственно. При увеличении расстояния от решетки поперечная скорость затухает.

Поперечная конвекция приводит к увеличению разности между температурой в соседних плоских слоях в направлении, поперечном направлению конвективного переноса, что интенсифицирует диффузионный турбулентный обмен.

Причиной возникновения направленной поперечной конвекции между слоями имитаторов твэлов является вторичное течение, возникающее в объеме дистанционирующей перемешивающей решетки. Анализ показывает, что при движении потока внутри ячеек наклонные пуклевки придают ему тангенциальную скорость, при этом на выходе из решетки поперечные компоненты скорости между соседними слоями твэлов оказываются сонаправлены, что приводит к возникновению разнонаправленных вторичных течений в соседних рядах стержней на удалении за решеткой.

Таким образом, сотовые перемешивающие дистанционирующие решетки с чередованием направления угла наклона пуклевок ячеек в соседних рядах приводят к направленному конвективному поперечному переносу, рассеянию температурных неоднородностей, интенсификации массообменных процессов в пучках стержней. Они уменьшают температур-

ную неоднородность потока теплоносителя на ~30% исходной на расстоянии шага расположения штатных дистанционирующих решеток в ТВС ВВЭР 250 мм, что выравнивает энтальпию в сечении ТВС и снижает вероятность возникновения кризиса теплоотдачи при пленочном кипении.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Перепелица Н.И.** Дистанционирующие решетки с локальными завихрителями для тепловыделяющих сборок РWR. — Атомная техника за рубежом, 2006, № 1, с. 3—7.
2. **Перепелица Н.И.** Дистанционирующие решетки со смесительными лопатками для тепловыделяющих сборок РWR. — Там же, № 2, с. 3—8.
3. **Бородин С.С., Дмитриев С.М., Легчанов М.А. и др.** Исследование эффективности перемешивающих решеток в обоснование выбора оптимальной конструкции ТВСА-АЛЬФА реактора типа ВВЭР. — Труды Нижегородского гос. технич. ун-та, 2010, № 1(80), с. 101—108.
4. **Корсун А.С., Круглов В.Б., Маслов Ю.А. и др.** Расчетное исследование циркуляции теплоносителя в ТВС с решетками перемешивающего типа. — Вопросы атомной науки и техники. Сер. Обеспечение безопасности АЭС, 2008, № 23, с. 97—102.
5. **Марков П.В., Солонин В.И.** Моделирование течения в пучке цилиндрических твэлов реактора ВВЭР, дистанционированных сотовой решеткой. — Вестник МГТУ. Сер. Машиностроение, 2011, № 3, с. 17—29.
6. **STAR-CCM+, version 7.02. UserGuide** (руководство пользователя). CD-adapco Group, 2012.

Поступило в Редакцию 28.06.12

УДК 504.45.054:621.039.58

⁹⁰Sr В ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОДАХ СУШИ НА ТЕРРИТОРИИ РОССИИ В 1961—2011 гг.

Вакуловский С.М., Абдурагимов Е.С., Колесникова Л.В., Уваров А.Д. (НПО «Тайфун», г. Обнинск)

Выпадения на водные поверхности ⁹⁰Sr вследствие атмосферных ядерных взрывов, проводившихся в СССР и США до конца 1962 г. и до 1980 г. в КНР, до настоящего времени остаются глобальным источником их загрязнения. Основными локальными источниками загрязнения отдельных водных объектов являются сбросы радиоактивно загрязненных технологических вод промышленных предприятий, авария в ПО «Маяк» в 1957 г. и на Чернобыльской АЭС в 1986 г.

Факторами, определяющими загрязнение поверхностных вод ⁹⁰Sr, являются смыв с площади водосбора, выпадения из атмосферы на водную поверхность, непосредственный сброс в водный объект, по-

ступление по водотокам из загрязненной зоны, обменные процессы с донными отложениями. Поверхностные воды самоочищаются за счет динамического переноса ⁹⁰Sr водотоками, осаждения взвесей, сорбции и радиоактивного распада.

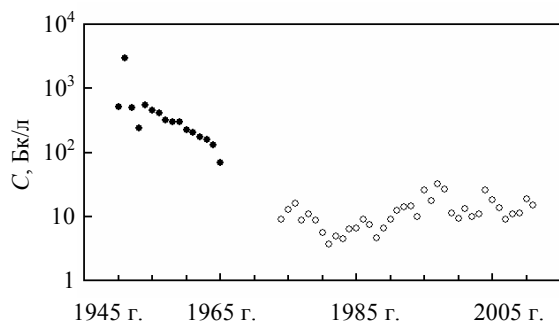
В таблице приведены данные о допустимой концентрации ⁹⁰Sr, ¹³⁷Cs, ¹³¹I, установленной нормативными документами в разные годы [1—6]. Как видно, нормативы на содержание радионуклидов в воде, употребляемой с пищей, существенно изменялись. Наиболее жесткие были и остались в действующем в настоящее время нормативном документе НРБ-99/2009 для ⁹⁰Sr.

Допустимое содержание ^{90}Sr , ^{137}Cs , ^{131}I в питьевой воде, установленное нормативными документами, Бк/л

Нормы и правила	^{90}Sr	^{137}Cs	^{131}I
	Предельно допустимая концентрация		
МКРЗ 1954	0,3	7400	220
Общесоюзные санитарные правила № 233-57	18,5	370	18,5
Санитарные правила № 333-60	1,1	37	22,2
	Допустимая концентрация		
НРБ-76/87	14,8	555	37
	Допустимая удельная активность		
НРБ-96	45	96	57
	Уровень вмешательства		
НРБ-99	5,0	11	6,3
НРБ-99/2009	4,9	11	6,2

Регулярные наблюдения за содержанием ^{90}Sr в поверхностных водах на территории России были начаты во второй половине 1961 г. на сети отбора проб в крупных реках, водохранилищах, озерах в соответствии с программой, утвержденной Главным управлением Гидрометеослужбы при Совете Министров СССР. Пробы воды на территории СССР отбирали на 78 реках и 10 озерах на постоянно действующих гидрологических постах 6—9 раз в год. На территории нашей страны с 1992 г. пробы с последующим анализом на содержание ^{90}Sr отбирали на 34 реках и двух озерах по методике [7, 8]. Анализ экспериментальных данных за 1961—1968 гг. позволил выявить основные закономерности загрязнения рек Советского Союза ^{90}Sr от глобального источника загрязнения.

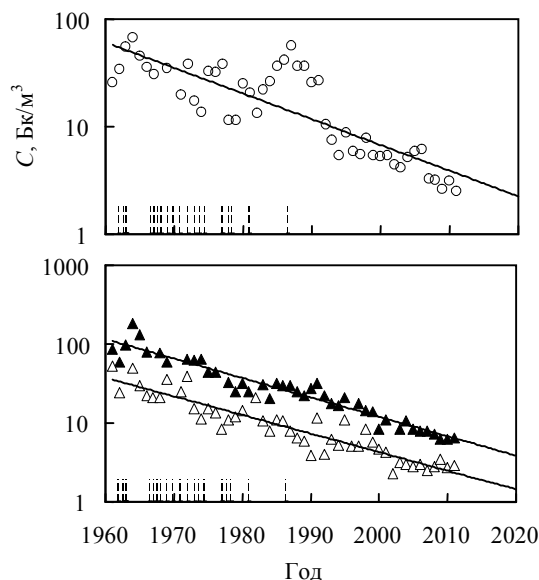
В настоящее время среди рек наиболее загрязненной остается Теча, в которую с 1949 по 1956 г. сбрасывали жидкие радиоактивные отходы радиохимического производства ПО «Маяк». На рис. 1 видно,



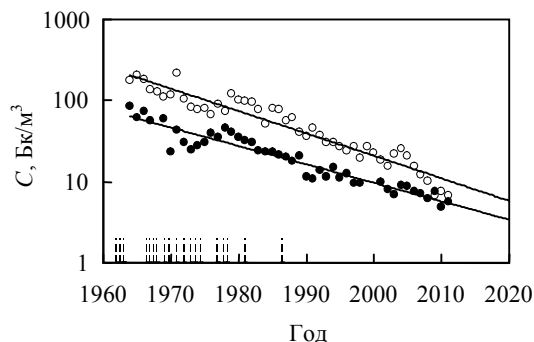
Р и с. 1. Ретроспективно восстановленная для периода 1950—1956 гг. (●) и измеренная в 1974—2011 гг. (○) среднегодовая концентрация ^{90}Sr в воде р. Течи вблизи пос. Муслюмово

что самое высокое содержание ^{90}Sr в воде реки было в 1950—1956 гг. — 400—3000 Бк/л [9]. После прекращения сбросов радиоактивных отходов и сооружения водоемов-отстойников, затопивших загрязненные берега, его содержание в реке резко снизилось и в 2000—2011 гг. среднегодовая концентрация составляла 9—26 Бк/л, что в 1,8—5 раз выше уровня вмешательства для ^{90}Sr в питьевой воде по НРБ-99/2009 [6].

На рис. 2 показано изменение концентрации ^{90}Sr в трех крупных реках: Волге, Оби, Лене в 1961—2011 гг., на рис. 3 — в проточных озерах Онежское и Ханка в 1964—2011 гг. Как видно на рис. 2, максимальная концентрация ^{90}Sr в реках наблюдалась в 1964 г. через 2 года после завершения самой мощной серии испытаний ядерного оружия в атмосфере. В последующие годы уменьшение концентрации ^{90}Sr



Р и с. 2. Среднегодовая концентрация ^{90}Sr в воде Волги (○), Оби (▲), Лены (△) в 1961—2011 гг.: — — экспонента, аппроксимирующая временной ход среднегодовой концентрации, | — дата ядерного взрыва и аварии на Чернобыльской АЭС



Р и с. 3. Среднегодовая концентрация ^{90}Sr в воде озера Онежское (●), Ханка (○) в период с 1964 по 2011 г.: — — экспонента, аппроксимирующая временной ход среднегодовой концентрации; | — дата ядерного взрыва и аварии на Чернобыльской АЭС

чередовалось с возрастанием, которое было обусловлено поступлением в атмосферу и на водосборы рек радиоактивных продуктов атмосферных ядерных взрывов, проводившихся в КНР. Последствия аварии на Чернобыльской АЭС в 1986 г. значительно повлияли на содержание ^{90}Sr в воде р. Волги через год после аварии — в 1987 г. его объемная активность приблизилась к 1964 г. Наибольшая концентрация ^{90}Sr в крупных реках в 1961—2011 гг. наблюдалась в Оби, в воды которой по системе рек Теча—Исеть—Тобол—Иртыш, начиная с 1949 г., поступал и продолжает поступать в настоящее время ^{90}Sr из технологических водоемов-отстойников ПО «Маяк».

На основании аппроксимации временного изменения концентрации ^{90}Sr в виде экспоненты были проанализированы измеренные данные и получены прогностические оценки его концентрации в крупных реках и озерах до 2020 г. в предположении отсутствия новых источников загрязнения.

Анализ временного изменения концентрации ^{90}Sr в воде рек показал:

для Лены и Оби период полууменьшения концентрации составляет около 12,5 года для всего периода наблюдения, по прогностическим оценкам к 2020 г. концентрация будет составлять 1,3 и 4 Бк/м³ соответственно;

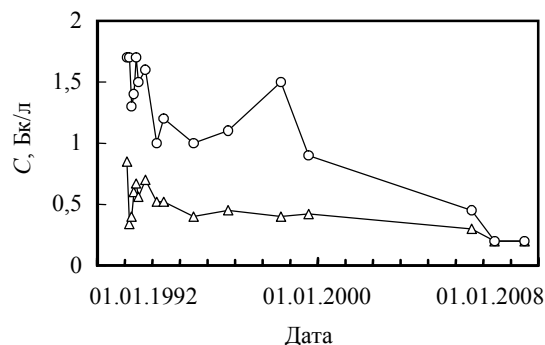
для Волги в 1990—2011 гг. период полууменьшения концентрации составляет около 13 лет, по прогностическим оценкам к 2020 г. концентрация будет составлять 2,3 Бк/м³.

Анализ показал, что период полууменьшения концентрации ^{90}Sr для озер Онежское и Ханка составляет 13,3 и 11 лет соответственно, согласно прогностическим оценкам к 2020 г. концентрация уменьшится в Онежском озере до 3,5 Бк/м³, в озере Ханка до 6 Бк/м³.

Следует отметить, что основным фактором, определяющим загрязнение ^{90}Sr поверхностных вод, является смыв с водосбора. Уменьшение со временем содержания ^{90}Sr в поверхностном слое (0—2 см) водосбора (за счет вымывания, вертикальной миграции и радиоактивного распада) непосредственно влияет на временное изменение концентрации в воде этих рек и озер.

Среди озер значительному загрязнению ^{90}Sr подверглись расположенные в ближней зоне восточно-уральского радиоактивного следа, образовавшегося вследствие аварии в ПО «Маяк» в 1957 г. Наибольшему загрязнению подверглось озеро Урускуль, находящееся в 20 км от места аварии. В год аварии в воде озера концентрация ^{90}Sr составляла 7570 Бк/л, к 2003 г. она уменьшилась до 92 Бк/л [10, 11].

Вследствие аварии на Чернобыльской АЭС наибольшему загрязнению ^{90}Sr подверглись озера Кожановское (малопроточное), Святое на Беседи (непроточное) и реки Ипуть и Беседь, расположенные в



Р и с. 4. Концентрация ^{90}Sr в воде озера Кожановское (○) и Святое на Беседи (△) с 1993 по 2007 г.

западных районах Брянской области. Радиоэкологические обследования озер проводились НПО «Тайфун» с 1992 г. (рис. 4). Максимальная концентрация ^{90}Sr наблюдалась в воде озера Кожановское в 1993 г. и составляла 1,7 Бк/л. К 2006 г. его содержание снизилось до 0,2 Бк/л.

Согласно эпизодическим измерениям НПО «Тайфун» в октябре — декабре 1986 г. концентрация ^{90}Sr в воде Ипути и Беседи на территории Брянской области не превышала 0,5 Бк/л. В дальнейшем загрязнение поверхностных вод значительно снизилось и стабилизировалось. Среднегодовая концентрация в воде указанных рек в 2003 г. составляла 0,04 Бк/л [12].

Таким образом, на территории России в период с 1961 по 2011 г. наиболее загрязненными ^{90}Sr были и остаются реки и озера, пострадавшие вследствие сброса жидких радиоактивных отходов ПО «Маяк» в 1949—1956 гг. и аварии в ПО «Маяк» в 1957 г.

Представленные в настоящей статье результаты наблюдений за состоянием пресноводных водоемов позволяют оценить степень воздействия различных источников загрязнения, ранжировать значимость и выявить тенденции изменения степени загрязнения поверхностных вод ^{90}Sr во времени.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сивинцев Ю.В. Конспект по проблеме радиационной безопасности. М., 1961. 172 с.
2. Санитарные правила работы с радиоактивными веществами и источниками ионизирующих излучений, № 333-60. М.: Госатомиздат, 1960.
3. Нормы радиационной безопасности НРБ/87. М.: Энергоатомиздат, 1988. 160 с.
4. Нормы радиационной безопасности НРБ-96. М.: Госсанэпиднадзор, 1996. 127 с.
5. Нормы радиационной безопасности НРБ-99. М.: Минздрав России, 1999. 115 с.
6. Нормы радиационной безопасности НРБ-99/2009. М.: Фед. центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2009. 100 с.
7. Бобовникова Ц.И. Изучение загрязнения пресных вод Советского Союза стронцием-90. Дис. на соискание ученой степени канд. техн. наук. Обнинск, 1969.

8. **Серда Г.А., Бобовникова Ц.И.** Стронций-90 в воде пресных водоемов Советского Союза в 1961—1962 гг. — В сб.: Радиоактивные изотопы в атмосфере и их использование в метеорологии. М.: Атомиздат, 1965, с. 361—372.
9. **Мокров Ю.Г.** Ретроспективное восстановление стока радионуклидов с водами реки Теча, обусловленного сбросами жидких отходов радиохимического производства ПО «Маяк» в 1949—1956 гг. — В сб.: Межд. конф. «Радиоактивность при ядерных взрывах и авариях». Москва, 24—26 апреля 2000 г. Санкт-Петербург: Гидрометеониздат, 2000, т. 1, с. 432—437.
10. **Крышев И.И., Романов Г.Н., Исаева Л.Н. и др.** Радиоэкологическое состояние озер восточно-уральского следа. — В сб.: Проблемы радиоэкологии и пограничных дисциплин. Екатеринбург, 2001, вып. 4, с. 107—122.
11. **Левина С.Г., Попов И.Я., Захаров С.Г. и др.** Радиоэкологические и гидрохимические аспекты поведения искусственных радионуклидов в водных экосистемах на примере озер восточно-уральского следа (озера Урускуль, Б. Игиш, Б. Сунгуль). — Там же, 2005, вып. 6, с. 375—392.
12. **Вакуловский С.М., Газиев Я.И., Колесникова Л.В. и др.** ^{137}Cs и ^{90}Sr в поверхностных водных объектах Брянской области в 1987—2002 гг. — Атомная энергия, 2006, т. 100, вып. 1, с. 68—74.

Поступило в Редакцию 10.09.12

Р е ф е р а т ы с т а т е й

Окончание. Начало см. на с. 54

УДК 621.039.181:620.191

Алексеев П.В., Лоскутов О.Д., Тутнов А.А. Расчет вероятности возникновения течи теплоносителя в коллекторе парогенератора ВВЭР по программе МАВР-4.1. — Атомная энергия, 2013, т. 114, вып. 1, с. 17—21.

Нормативный документ устанавливает предельно допустимую вероятность разрушения корпусов коллекторов парогенераторов 10^{-7} 1/год на блок, которая не может быть компенсирована штатными системами локализации аварий. В связи с этим актуальным является расчет вероятности возникновения некомпенсируемой (Ду43, Ду100 для АЭС-2006) течи теплоносителя первого контура коллектора парогенератора.

В статье описывается программный комплекс МАВР 4.1, созданный для выполнения данных расчетов. Приводятся методика расчета вероятности возникновения течи в коллекторе парогенератора, требуемые исходные данные. Подробно рассмотрены методики вычисления эквивалентного диаметра и интенсивности течи, расчет вероятности возникновения течи. В заключение приводится доказательство истинности расчетов по программе МАВР-4.1 на основании данных о выходе из строя парогенераторов ПГВ-1000 в 1978—1991 гг. Рис. 4, список лит. 6 назв.

УДК 621.039.34

Абрамов Ю.В., Токманцев В.И. Разделение бинарной смеси с большой разностью массы компонентов в газовой центрифуге. — Атомная энергия, 2013, т. 114, вып. 1, с. 22—25.

В статье рассматривается разделение бинарной газовой смеси гексафторида урана $^{238}\text{UF}_6$ с различными легкими компонентами в высокоскоростной центрифуге, предназначенной для разделения тяжелых изотопов. Масса легких примесей изменялась в диапазоне $M_1 = 0,02—0,349$ кг/моль. Показано, что с уменьшением массы примеси происходит существенное перестроение полей течения в роторе центрифуги. Если в случае смеси тяжелых изотопов определяющее влияние на концентрацию оказывает кон-

вективный перенос, то для смеси с большой разницей массы компонентов основной становится радиальная бародиффузия в центробежном поле, что приводит к появлению максимума коэффициента разделения при $M_1 = 0,127$ кг/моль. Рис. 4, список лит. 8 назв.

УДК 621.039.73.662.9

Кашеев В.А., Полукотов П.П., Устинов О.А., Рублевский В.П., Шинкарев С.М., Яценко В.Н. Сжигание — вариант обращения с облученным реакторным графитом. — Атомная энергия, 2013, т. 114, вып. 1, с. 25—29.

Обсуждены проблемы обращения с облученным реакторным графитом, сопоставлены варианты его утилизации. Метод сжигания выбран как возможный.

Проведено сравнение количества ^{14}C , поступающего в окружающую среду естественным путем, при эксплуатации АЭС и в результате сжигания облученного реакторного графита. Показана возможность сжигания графита с поступлением ^{14}C в атмосферу в рамках предельно допустимых выбросов. Табл. 4, список лит. 17 назв.

УДК 539.1.74

Хлебников И.Б., Худых Г.В., Смирнов А.А., Приладышев А.А., Неганов А.В., Липин М.В., Залетин В.М. Эволюция безазотных спектрометров γ -излучения на основе полупроводниковых детекторов из особо чистого германия. — Атомная энергия, 2013, т. 114, вып. 1, с. 29—33.

В статье рассмотрена эволюция отечественных разработок безазотных спектрометров с микрокриогенными системами охлаждения с полупроводниковыми детекторами на основе особо чистого германия. Энергетическое разрешение изготовленного моноблочного германиевого безазотного спектрометра с микрокриогенной системой и цифровым спектрометрическим устройством производства ОАО «Ин-т физико-технических проблем» составляет 2,25 кэВ по линии 1,33 МэВ.

Безазотные спектрометры хорошо зарекомендовали себя при работе в составе мобильных и стационарных лабораторий экспресс-анализа, в технологических точках контроля АЭС. Рис. 4, список лит. 3 назв.