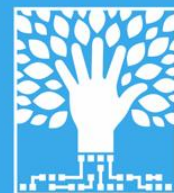


# ТРАЕКТОРИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ — ЧЕЛОВЕК, ПРИРОДА, ТЕХНОЛОГИИ



НАУЧНЫЙ ПЕРИОДИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

№ 3 (7) 2023





# ТРАЕКТОРИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ – ЧЕЛОВЕК, ПРИРОДА, ТЕХНОЛОГИИ

№ 3 (7) 2023

## Главный редактор

Ярмошенко Илья Владимирович, к. ф.-м. н., директор Института промышленной экологии УрО РАН (г. Екатеринбург)

## Заместитель главного редактора

Васильев Алексей Владимирович, к. т. н., заведующий лабораторией Института промышленной экологии УрО РАН (г. Екатеринбург)

## Редакционная коллегия

Вараксин Анатолий Николаевич, д. ф.-м. н., профессор, главный научный сотрудник Института промышленной экологии УрО РАН (г. Екатеринбург)

Веселкин Денис Васильевич, д. б. н., заведующий лабораторией Института экологии растений и животных УрО РАН (г. Екатеринбург)

Екидин Алексей Акимович, к. ф.-м. н., доцент, ведущий научный сотрудник Института промышленной экологии УрО РАН (г. Екатеринбург)

Захаров Вячеслав Иосифович, д. ф.-м. н., профессор, заведующий лабораторией Уральского федерального университета им. первого Президента России Б. Н. Ельцина (г. Екатеринбург)

Иванов Владимир Юрьевич, к. ф.-м. н., директор института Уральского федерального университета им. первого Президента России Б. Н. Ельцина (г. Екатеринбург)

Крышев Александр Иванович, д. б. н., заведующий лабораторией Научно-производственного объединения «Тайфун» Росгидромета (г. Обнинск)

Марков Дмитрий Владимирович, д. т. н., директор АО «НИИТФА» (г. Москва)

Микляев Петр Сергеевич, д. г.-м. н., профессор РАН, главный научный сотрудник Института геоэкологии им. Е. М. Сергеева РАН (г. Москва)

Сюрдо Александр Иванович, д. ф.-м. н., профессор, главный научный сотрудник Института физики металлов им. М. Н. Михеева УрО РАН (г. Екатеринбург)

Талалай Александр Григорьевич, д. г.-м. н., профессор, заведующий кафедрой Уральского государственного горного университета (г. Екатеринбург)

Тузанкина Ирина Александровна, заслуженный деятель науки РФ, д. м. н., профессор, Институт иммунологии и физиологии УрО РАН (г. Екатеринбург)

Юрков Анатолий Константинович, к. г.-м. н., заведующий лабораторией Института геофизики им. Ю. П. Булашевича УрО РАН (г. Екатеринбург)



## СОДЕРЖАНИЕ

Оценка безопасности процесса утилизации литийсодержащих отходов <b>Н. П. Старовойтов, В. А. Дудкин, В. А. Казаков, С. В. Корнев, П. В. Козлов</b> .....	2
Инструментальные измерения с целью апробации метода восстановления спектров нейтронных потоков на рабочих местах и местах временного пребывания в пунктах хранения радиоактивных отходов (ПХРО) <b>А. В. Васильев, А. А. Екидин, М. Д. Пышкина, Д. Д. Десятков, С. А. Чугунов</b> .....	12
Сравнительный анализ классической кинетики ядерного реактора и кинетики марковской цепной реакции деления <b>Н. Н. Ошканов, Я. О. Комарова, П. А. Михайлова</b> .....	24
Международное подтверждение метода селективного определения аэрозольной формы и газообразных соединений радиоактивного йода в выбросах реакторной установки ВВР-СМ <b>А. А. Екидин, А. В. Васильев, И. И. Садиков, С. А. Байтелесов, Ф. Р. Кунгуров, Д. Д. Тоджибоев, Ш. А. Аликулов</b> .....	33
Взвешенный индекс качества воды в экологическом мониторинге зоны влияния горного предприятия <b>А. Н. Медведев, М. А. Медведев</b> .....	44

**ТРАЕКТОРИЯ  
ИССЛЕДОВАНИЙ –  
ЧЕЛОВЕК, ПРИРОДА,  
ТЕХНОЛОГИИ**  
**№ 3 (7) 2023**

**Главный редактор:**  
И. В. Ярмошенко

**Редактор:**  
М. Э. Чупрякова

**Компьютерная верстка:**  
Д. Д. Десятков

**Дизайн обложки:**  
А. В. Вожаков

**Автор фото:**  
А. Г. Буевич

**Адрес редакции:**  
620990, г. Екатеринбург,  
ИПЭ УрО РАН,  
ул. С. Ковалевской, 20

Тел.: (343) 374-37-71  
E-mail: iie@ecko.uran.ru  
[www.restrajjectory.ru](http://www.restrajjectory.ru)

Журнал зарегистрирован  
Федеральной службой  
по надзору в сфере связи,  
информационных  
технологий и массовых  
коммуникаций  
27 апреля 2022 г.,  
Эл№ ФС77-83207

**Учредитель**  
**ИПЭ УрО РАН**

Перепечатка материалов,  
опубликованных в журнале,  
возможна только с  
разрешения редакции.

## ОЦЕНКА БЕЗОПАСНОСТИ ПРОЦЕССА УТИЛИЗАЦИИ ЛИТИЙСОДЕРЖАЩИХ ОТХОДОВ

Н. П. Старовойтов, В. А. Дудкин, В. А. Казаков, С. В. Коренев, П. В. Козлов

*Федеральное государственное унитарное предприятие  
«Производственное объединение «Маяк», г. Озёрск, Россия*

*В данной работе рассмотрены вопросы обеспечения взрывобезопасности процесса утилизации, связанные с факторами, приводящими к избыточному газовыделению. В ходе проведения экспериментов определено газовыделение при растворении лития. Показано влияние концентраций ионов  $Li^+$ ,  $OH^-$ , температуры лития на скорость взаимодействия металлического лития с водой при нормальных условиях. Получены экспериментальные динамические данные изменения удельного объема и скорости газовыделения при растворении лития в растворе щелочи с концентрациями  $30 \text{ г/дм}^3$ ,  $15 \text{ г/дм}^3$  и в дистиллированной воде в зависимости от времени процесса.*

**Ключевые слова:** гидрид лития; водород; воспламенение; газовыделение; горючий газ; взрывопожаробезопасность; избыточное давление; удельное тепловыделение; растворение; щелочь.

### 1. Введение

На ФГУП «ПО «Маяк» проводится большая работа по решению вопросов обеспечения безаварийной работы пожаро- и взрывоопасных производств, а также радиационной безопасности. Проблемы промышленной безопасности в настоящее время являются ключевыми.

Известно, что при отклонениях от нормального хода технологического процесса, связанных как с отказом технологического оборудования, так и с невыполнением регламентированных действий оператора, возможно возникновение потенциально взрывопожароопасной ситуации.

К наиболее характерным взрывоопасным ситуациям при проведении технологического процесса утилизации отходов, содержащих литий, можно отнести:

- создание избыточного давления в аппаратуре и трубопроводах;
- воспламенение гидрида лития;
- воспламенение расплава металлического лития;
- образование взрывоопасных парогазовых смесей, содержащих изотопы водорода, в аппаратуре и трубопроводах.

Обеспечение безаварийной работы пожаро- и взрывоопасных производств, вопросы обеспечения взрывопожаробезопасности (далее – ВПБ) и радиационной безопасности (далее – РБ) на ФГУП «ПО «Маяк» остаются весьма актуальными в связи с устареванием технологического оборудования и контрольно-измерительных приборов и внедрением новых технологий, в которых не всегда однозначно проработаны рассматриваемые вопросы.

Проблема обеспечения взрывопожаробезопасности технологических процессов является комплексной и зависит от многих физико-химических параметров используемых материалов.

**Цель работы** – обеспечить ВПБ и РБ процесса утилизации литийсодержащих отходов по одному из опасных факторов – создание избыточного давления в аппаратуре и трубопроводах в процессе выделения изотопов водорода при нагреве. Определить влияние концентраций ионов  $Li^+$ ,  $OH^-$ , температуры лития на скорость взаимодействия металлического лития с водой при нормальных условиях.

Определить количество тепла, выделяемого с единицы массы окисленного на воздухе лития при его растворении.

**Объектом исследования** в данной работе послужили отходы лития, содержащие изотопы водорода, для которых необходимо было получить данные по возможному их газовыделению в аппаратуре и трубопроводах в процессе проведения технологического процесса зачистки и растворения растворами щелочи разной концентрации, а также провести оценку вероятности возникновения взрывоопасных ситуаций.

## 2. Материалы и методы

Основой технологического процесса утилизации отходов литийсодержащих изотопы водорода является термическое разложение исходного продукта



Данный технологический процесс характеризуется рядом опасных факторов. В соответствии с [1] ВПБ технологических процессов на химическом производстве должна соответствовать требованиям государственных стандартов. Согласно [2] вероятность аварийной ситуации на каждом взрывоопасном участке не должна превышать значения  $1 \cdot 10^{-6}$  в год.

При отклонениях от нормального хода технологического процесса, связанных как с отказом технологического оборудования, так и с невыполнением регламентированных действий оператора, возможно возникновение потенциально взрывопожароопасной ситуации. В данной работе рассмотрена ситуация, связанная с созданием избыточного давления в аппаратуре и трубопроводах при проведении работ по отмывке оборудования.

Следующие вещества, используемые и получаемые при утилизации отходов, содержащих литий, являются пожаровзрывоопасными [3–5]:

- металлический литий;
- гидрид лития;
- водород и его изотопы.

Литий – горючий серебристо-белый мягкий металл, температура плавления – 179 °С. При нагревании на воздухе воспламеняется. Температура горения – около 1 300 °С, температура самовоспламенения на воздухе – от 180 до 200 °С. Горит в диоксиде углерода [4].

Взаимодействие металлического лития с водой или влагой воздуха идет энергично с образованием гидроксида лития и газообразного водорода по реакции:



Работа с литием в твердом и расплавленном состояниях представляет опасность для персонала из-за токсического воздействия лития и его соединений на организм: горящий литий оказывает воздействие на кожные покровы и глаза человека, аэрозоли продуктов сгорания лития – на органы дыхания.

Расплавленный литий вызывает разрушение сварных швов, интенсивно, с разбрызгиванием реагирует со строительными материалами (асбестом, бетоном и др.).

Следует иметь в виду, что некоторые состояния лития пирофорны (например, конденсатные пленки). Самовозгораться могут поверхности лития, загрязненные его соединениями с компонентами воздуха, даже при небольшом разогреве [3].

Литий загорается сначала в отдельной точке, а затем воспламеняется вся его поверхность. Удаление очага воспламенения предотвращает возгорание металла.

Гидрид лития – горючее кристаллическое вещество, температура плавления –

861 °С при нормальных условиях, плавится с частичным разложением на жидкий литий и водород. Температура самовоспламенения на воздухе – около 200 °С. С водой реагирует бурно – с воспламенением выделяющегося водорода. Вследствие поглощения влаги из воздуха гидрид лития при хранении постепенно превращается в гидроксид лития. Нижний концентрационный предел распространения пламени аэрозвеси 28 г/м<sup>3</sup> при дисперсности от 50 до 100 мкм. Минимальное взрывоопасное содержание кислорода (далее – МВСК) при разбавлении инертным газом (аргоном) – 2,5 %, когда происходит тушение гидроксида лития. Максимальное давление взрыва – 620 кПа [4].

Водород – горючий газ. Температура самовоспламенения – 510 °С. Нижний концентрационный предел распространения пламени (далее – НКПР) в смеси с воздухом – от 4,12 %, в смеси с кислородом – от 4,1 %. МВСК при разбавлении инертным газом – 5 %. Максимальное давление взрыва – 730 кПа. Зависимость концентрационных пределов распространения пламени водорода от содержания разбавителя при горении в кислороде описана в [4].

Анализ требований безопасности на производстве, где проводят утилизацию отходов литейного производства, показал, что пожаровзрывобезопасность достигается:

- организацией работы с опасными веществами в герметичном технологическом оборудовании и в вытяжных шкафах;
- герметичностью системы технологической линии установки утилизации с постоянным контролем давления;
- хранением и транспортированием опасных веществ в специальных герметичных контейнерах, заполненных инертным газом (аргон);
- наличием исправной приточно-вытяжной вентиляции во взрывозащищенном исполнении;
- наличием автономной резервной системы водяного охлаждения фланцев с резиновыми уплотнениями;
- использованием оснастки и спецодежды;
- строгим соблюдением инструкций и правил по пожарной и взрывобезопасности.

### 3. Результаты

С целью анализа безопасности существующего технологического процесса по выполнению требований взрывопожаробезопасности и обеспечения радиационной безопасности была проведена экспериментальная и расчетная работа.

#### Определение газовыделения водорода при растворении

Для определения объема, скорости и динамики выделения газа при растворении металлического лития была собрана установка, схема которой представлена на рис. 1.

Условия проведения эксперимента:

- масса образца № 1 составила 0,141 г;
- масса образца № 2 составила 0,064 г;
- масса образца № 3 составила 0,142 г;
- предварительно емкость продували в течение 5 мин аргоном;
- объем подаваемого раствора для растворения 50 см<sup>3</sup>;
- концентрация раствора щелочи по металлу 30 г/дм<sup>3</sup>, 15 г/дм<sup>3</sup> и дистиллированная вода;
- температура растворения 23 °С.

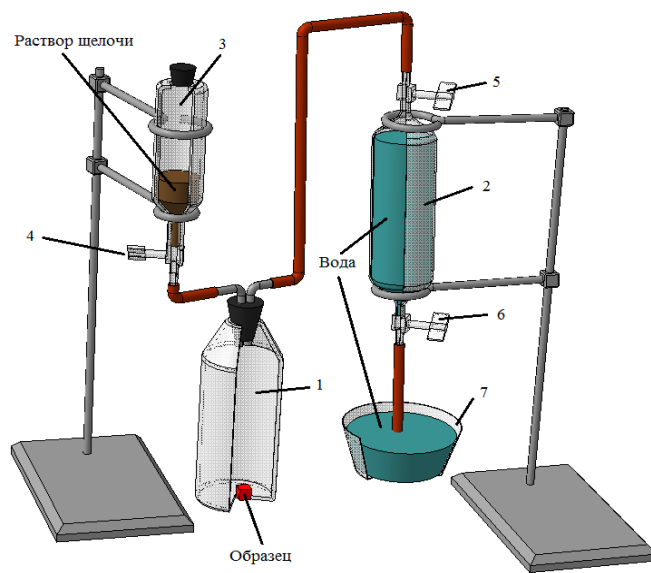


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

Образец помещали в специальную герметичную емкость (1), подключенную к газовой пипетке (2), предварительно заполненную водой. Проверяли герметичность системы. Для этого при закрытом кране (4) открывали верхний кран (5) и нижний (6), носик которого помещен под воду в стакане (7), создавая гидрозатвор.

Затем подготовленный раствор щелочи, залитый заранее в герметичную от атмосферы емкость (3), приводили в соприкосновение с материалом образца, расположенного в емкости (1), открывая кран (4) путем слива. После слива закрывали кран (4). Наблюдали химическую реакцию растворения и выделения взрывоопасного газа.

Количество выделившегося газа фиксировали по вытесненной воде на проградуированной пипетке (2) (измеряли объем выделившегося газа в пипетке в зависимости от времени). Полученные результаты приводили к единице массы и обрабатывали в Microsoft Excel.

Результаты проведенного эксперимента отражены в табл. 1 и на рис. 2–4.

Таблица 1. Экспериментальные результаты определения объема, скорости газовыделения с 1 г литийсодержащих отходов при его растворении

Параметр (максимальное значение)	Концентрация щелочи по металлу		Дистиллированная вода
	30 г/дм <sup>3</sup>	15 г/дм <sup>3</sup>	
Удельный объем газовой фазы, см <sup>3</sup> /г	1 867	1 563	2 058
Удельная скорость газовыделения, см <sup>3</sup> /(мин·г)	381	657	3 423
Скорость растворения лития при однократном контакте (2 сек) с раствором щелочи, г/(мин·м <sup>2</sup> )	27,15	–	–

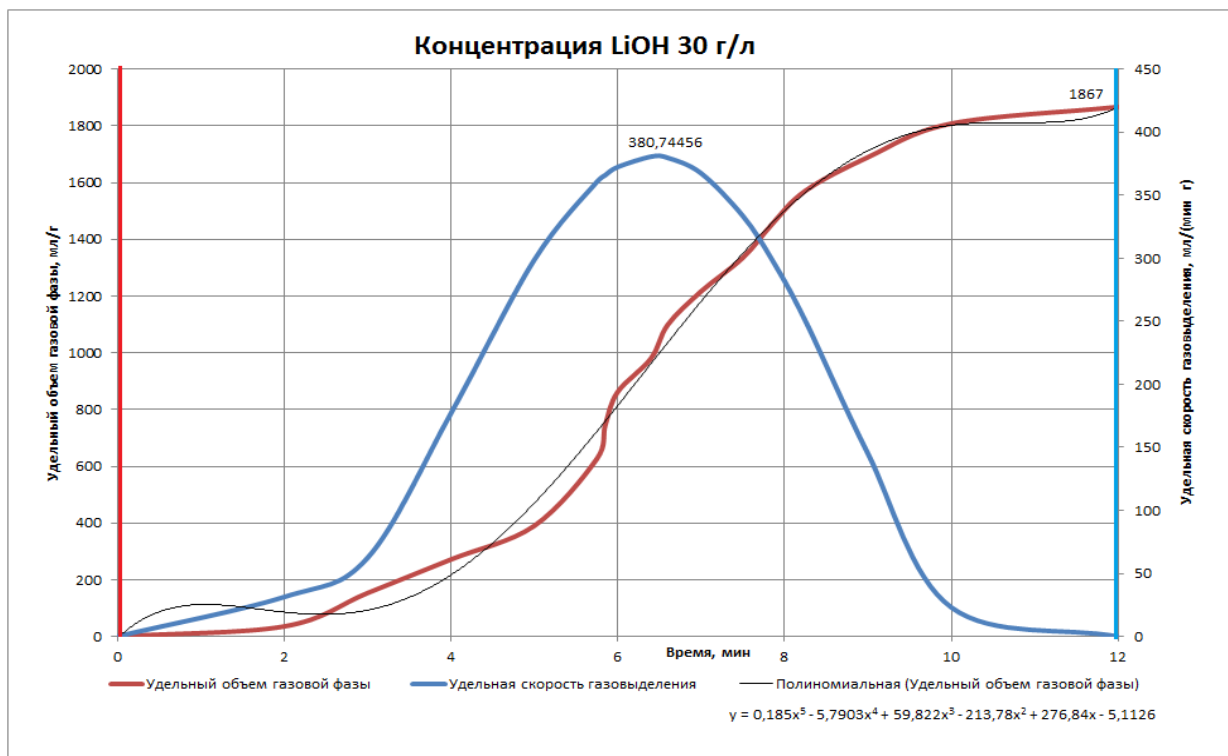


Рис. 2. Экспериментальные данные по изменению удельного объема газовой фазы (водорода) и удельной скорости с течением времени при растворении в растворе гидроксида лития с концентрацией по металлу 30 г/дм<sup>3</sup>

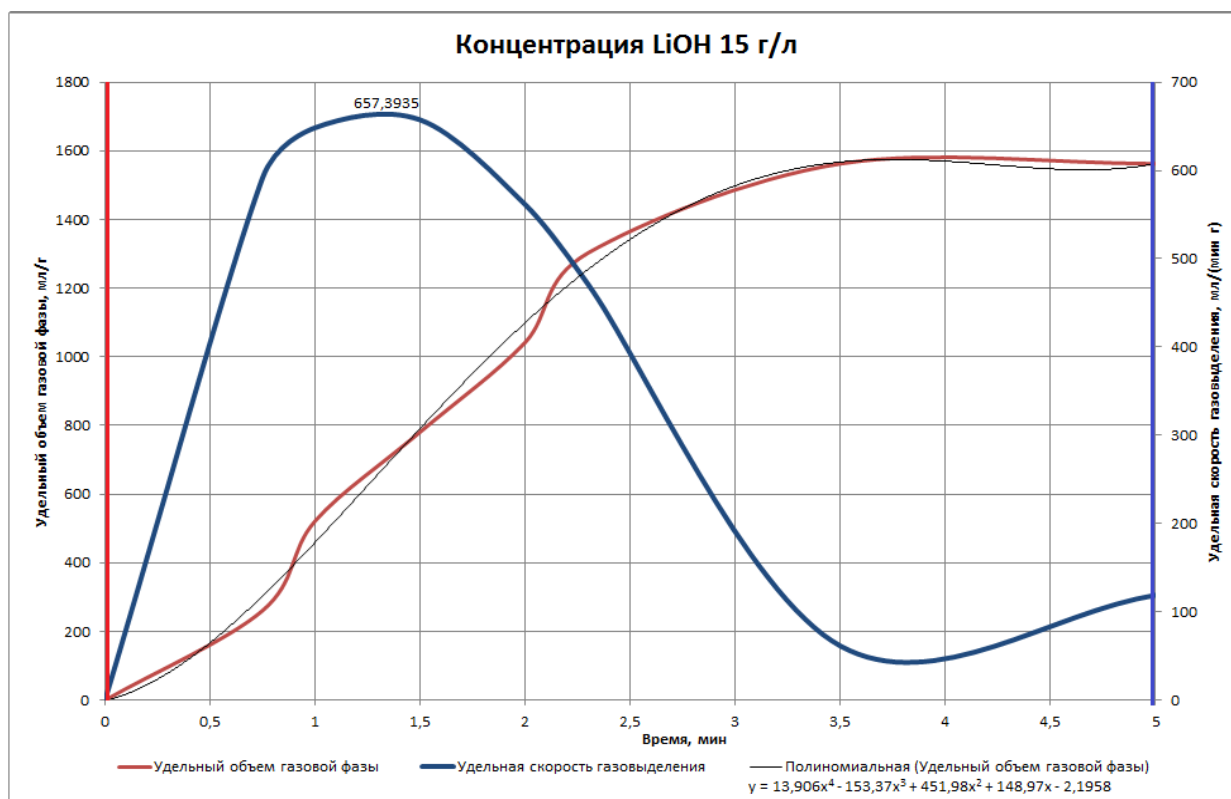


Рис. 3. Экспериментальные данные по изменению удельного объема газовой фазы (водорода) и удельной скорости с течением времени при растворении в растворе гидроксида лития с концентрацией по металлу 15 г/дм<sup>3</sup>



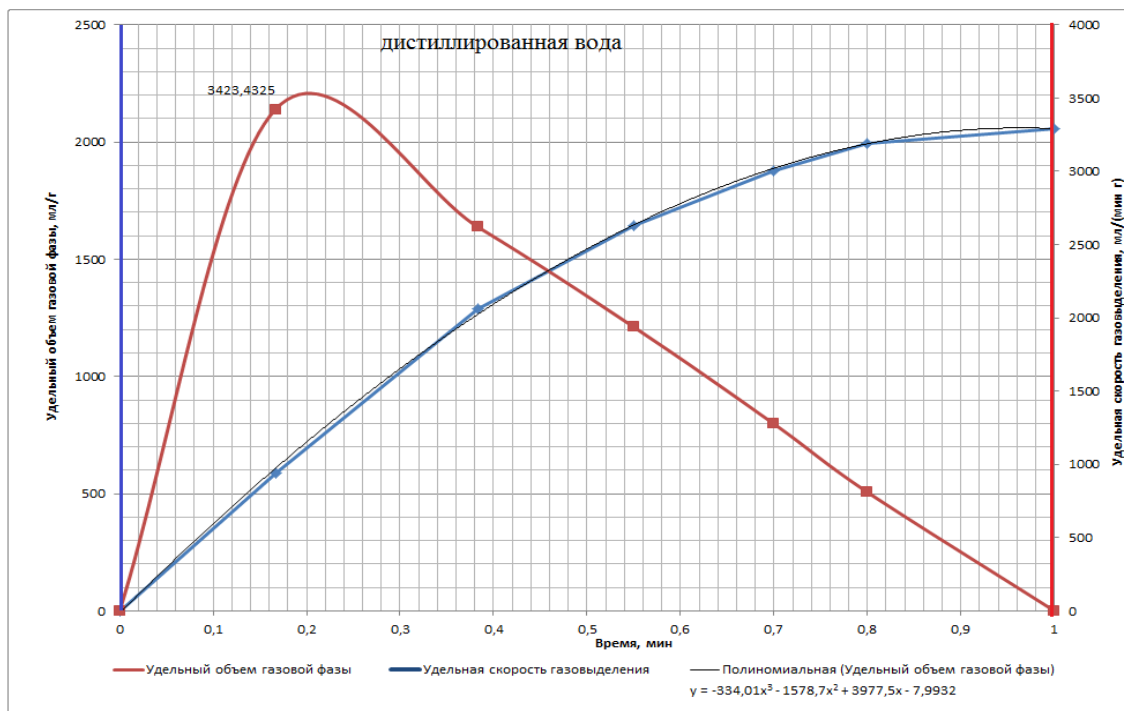


Рис. 4. Экспериментальные данные по изменению удельного объема газовой фазы (водорода) и удельной скорости с течением времени при растворении в дистиллированной воде

Проведенная экспериментальная работа позволила оценить максимальные удельные значения объема и скорости газовой выработки при растворении лития в растворе щелочи и в дистиллированной воде в динамике, которые приведены в табл. 1.

Определили скорость растворения таблетки лития (массой 0,1867 г и площадью  $2,041 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$ ) при однократном контакте (2 сек) с раствором щелочи 30 г/л. Потеря массы составила 0,0388 г. Химическая реакция (и потеря массы) прекращалась через 420 сек. Скорость растворения составила  $27 \text{ г}/(\text{мин} \cdot \text{м}^2)$  [6].

#### Определение количества тепла, выделяемого с единицы массы окисленного на воздухе лития при его растворении

Для определения количества тепла, выделяемого единицей массы лития при растворении, была собрана установка, схема которой представлена на рис. 5.

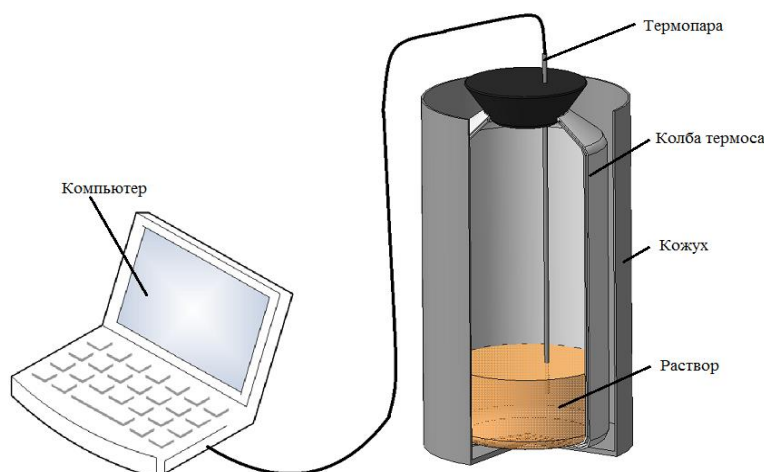


Рис. 5. Схема установки для измерения теплового эффекта реакции

Условия проведения эксперимента:

- масса образца (4) (таблетка) составила – 0,193 г;
- геометрия таблетки лития: высота – 5 мм, диаметр – 10 мм;
- объем раствора для растворения – 50 см<sup>3</sup>;
- объем термоса – 1 дм<sup>3</sup>;
- концентрация раствора щелочи по металлу – 30 г/дм<sup>3</sup>, дистиллированная вода;
- температура растворения – 23 °С.

Объем измеренной таблетки лития, окисленной на воздухе, по расчетам составил  $3,925 \cdot 10^{-7}$  м<sup>3</sup>. Общая площадь таблетки –  $1,57 \cdot 10^{-4}$  м<sup>2</sup>. Плотность таблетки при измеренной массе образца (4) ( $0,193 \cdot 10^{-3}$  кг) и расчетном значении объема составила 492 кг/м<sup>3</sup>.

Концентрированный раствор щелочи (30 г/дм<sup>3</sup> по металлу) заливали в термос. Предварительно в него помещали закрепленную у дна термопару и подключали ее к прибору, который фиксировал изменение температуры при растворении. В момент, когда в термос бросали образец (4) (в виде таблетки), ее горловину закрывали сразу пробкой и начинали записывать показания. В результате проведенного эксперимента при растворении в растворе щелочи зафиксировали изменение температуры от 23 до 44 °С (изменение температуры – 21 °С). Растворение образца (таблетки) в дистиллированной воде показало, что изменение температуры составило от 23 до 48 °С (изменение температуры – 25 °С). Растворение в воде проходило значительно быстрее.

Обработка экспериментальных данных позволила рассчитать удельное тепловыделение при растворении в растворе щелочи с концентрацией по металлу 30 г/л, равное  $2,297 \cdot 10^7$  Дж/кг:

$$q_m = \frac{(44-23) \cdot (0,193 \cdot 10^{-3} \cdot 3390 + (5 \cdot 10^{-5} \cdot 10^3) \cdot 4200)}{0,193 \cdot 10^{-3}} = 2,292 \cdot 10^7 \text{ Дж/кг.} \quad (3)$$

Используя эти данные, рассчитали максимальный температурный перепад, который составил  $\Delta t = 104$  °С:

$$\Delta t = \frac{q_m \cdot 0,463}{(0,463 \cdot 3390) + (24,3 \cdot 10^{-3} \cdot 10^3) \cdot 4136,1} = 104 \text{ °С.} \quad (4)$$

Сделали вывод: раствор щелочи в месте контакта с литием при его растворении в аппарате технологического оборудования закипит при длительном контакте. При кратковременном контакте разогрев не превысит  $\Delta t = 10$  °С [6].

#### 4. Обсуждение

В ходе проведенного анализа технологического процесса утилизации литиевых отходов исследовали один из опасных факторов – создание избыточного давления в аппаратуре и трубопроводах за счет неконтролируемого выхода изотопов водорода за пределы технологического оборудования, и как результат – нарушение по радиационной безопасности. Рассмотрели вопросы обеспечения взрывобезопасности процесса утилизации, связанные с факторами, приводящими к повышенному газовыделению.

Проведена экспериментальная работа по определению газовыделения при растворении лития. Показано влияние концентраций ионов Li<sup>+</sup>, OH<sup>-</sup>, температуры лития на скорость взаимодействия металлического лития с водой при нормальных условиях. Получены экспериментальные данные максимального удельного значения объема и скорости газовыделения при растворении лития в растворе щелочи 30 г/дм<sup>3</sup>, 15 г/дм<sup>3</sup> и в дистиллированной воде в динамике при нормальных условиях. Определено количество тепла, выделяемого единицей массы лития при растворении [6].

Проведена оценка надежности обеспечения взрывопожаробезопасности технологического процесса утилизации литийсодержащих отходов с использованием ПК автоматизированного структурно-логического моделирования и расчета надежности и безопасности систем «АРБИТР» [7], [8].

Рассмотрели три взрывопожароопасных аварийных сценария:

- 1) разгерметизация технологического оборудования,
- 2) воспламенение литийсодержащих отходов на воздухе,
- 3) взрыв горючей парогазовой среды, содержащей водород, за счет его образования в аппаратуре и инициирование взрыва внутренними источниками воспламенения в аппаратуре и трубопроводах.

Установили при анализе, что надежность системы контрольно-измерительной аппаратуры приемлемая. Основной вклад в развитие аварийного сценария вносит вероятность нарушения герметичности системы или грубая ошибка оператора при управлении технологическим процессом. Вероятность создания взрывопожароопасной ситуации с учетом всех возможных сценариев составила  $1,67 \cdot 10^{-5}$  год<sup>-1</sup>, что не удовлетворяет требованиям ГОСТ [2]. Показали, что технологический процесс является взрывопожароопасным.

По результатам работы оптимизированы и обоснованы меры взрывопожаробезопасности, применяемые на ФГУП «ПО «Маяк», процессы по утилизации литиевых отходов, а также установлены дополнительные меры, повышающие надежность [6].

## 6. Список литературы

1. СТО Ц 054-2017. Система стандартов безопасности труда. Взрывобезопасность производственных процессов радиохимического, реакторного, химико-металлургического, химического и изотопного производств. Общие требования. Введ. 2017-06-01. – Озерск : ФГУП «ПО «Маяк», 2017.
2. ГОСТ 12.1.004-91. Система стандартов безопасности труда. Пожарная безопасность. Общие требования. Введ. 1992-07-01. – М. : Стандартинформ, 1991.
3. Субботин, В. И. Литий / В. И. Субботин, М. Н. Арнольд, М. Н. Ивановский. – М. : ИздАТ, 1999. – 263 с.
4. Корольченко, А. Я. Пожаровзрывоопасность веществ и материалов и средства их тушения : справочник : В 2 ч. / А. Я. Корольченко, Д. А. Корольченко. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Асс. «Пожнаука», 2004.
5. Зачиняев, Г. М. Пожаровзрывобезопасность технологических процессов радиохимических производств : монография / Г. М. Зачиняев, Е. Р. Назин. – М. : НТЦ ЯРБ, 2009.
6. Оценка безопасности процесса утилизации литий содержащих отходов // Н. П. Старовойтов, С. В. Коренев, В. А. Дудкин, В. А. Казаков. Тез. докл. Молодежная научно-практическая конф. «Материалы и технологии в атомной энергетике». 22–23 июня 2022. – М. : АО «ВНИИНМ».
7. Программный комплекс автоматизированного структурно-логического моделирования расчета надежности и безопасности систем (ПК «АРБИТР», версия 1.1) : Инструкция пользователя. – Спб., 2012.
8. Анализ безопасности установок и технологий: Методическое пособие по проблемам регулирования риска. Ч. 3 / под общ. ред. С. В. Петрина. – Саров : ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2006.

## Сведения об авторах:

**Старовойтов Николай Петрович**, Федеральное государственное унитарное предприятие «Производственное объединение «Маяк», г. Озёрск, Россия, ученой степени не имею, начальник группы взрывопожаробезопасности ЦЗЛ, старший преподаватель ОТИ НИЯУ МИФИ. Эл. почта: [starov-nik@yandex.ru](mailto:starov-nik@yandex.ru), [e-mail: cpl@po-mayak.ru](mailto:cpl@po-mayak.ru).

**Дудкин Владимир Алексеевич**, Федеральное государственное унитарное предприятие «Производственное объединение «Маяк», г. Озёрск, Россия, ученой степени не имею, инженер-технолог 2 категории группы взрывопожаробезопасности ЦЗЛ.

**Казаков Виталий Анатольевич**, Федеральное государственное унитарное предприятие «Производственное объединение «Маяк», г. Озёрск, Россия, ученой степени не имею, инженер-технолог 2 категории группы взрывопожаробезопасности ЦЗЛ.

**Корнев Станислав Вениаминович**, Федеральное государственное унитарное предприятие «Производственное объединение «Маяк», г. Озёрск, Россия, ученой степени не имею, инженер-физик 2 категории группы взрывопожаробезопасности ЦЗЛ.

**Козлов Павел Васильевич**, Федеральное государственное унитарное предприятие «Производственное объединение «Маяк», г. Озёрск, Россия, к. т. н., начальник исследовательской лаборатории ЦЗЛ по обращению и кондиционированию радиоактивных отходов, доцент ОТИ НИЯУ МИФИ.

## SAFETY EVALUATION OF THE PROCESS OF DISPOSAL OF LITHIUM-CONTAINING WASTE

N.P. Starovoitov, V.A. Dudkin, V.A. Kazakov, S.V. Korenev, P. V. Kozlov

*Russia, Federal State Unitary Enterprise  
«Production Association «Mayak»*

*This paper discusses the issues of ensuring the explosion safety of the recycling process associated with factors leading to excessive gas release. In the course of the experiments, gas evolution was determined during the dissolution of lithium. The influence of concentrations of Li<sup>+</sup>, OH<sup>-</sup> ions, lithium temperature on the rate of interaction of metallic lithium with water under normal conditions is shown. Experimental dynamic data on changes in the specific volume and rate of gas release during the dissolution of lithium in an alkali solution with concentrations of 30 g/dm<sup>3</sup>, 15 g/dm<sup>3</sup> and distilled water as a function of the process time have been obtained.*

**Key words:** lithium hydride, hydrogen, ignition, gas generation, combustible gas, explosion and fire protection, overpressure, specific heat, solution, alkali

### References

1. STO C 054-2017. Sistema standartov bezopasnosti truda. Vzryvobezopasnost' proizvodstvennyh processov radiohimicheskogo, reaktornogo, himiko-metallurgicheskogo, himicheskogo i izotopnogo proizvodstv. Obshchie trebovaniya [Tekst]. Vved. 2017-06-01. – Ozersk: FGUP «PO «Mayak», 2017 (in Russian).
2. GOST 12.1.004-91. Sistema standartov bezopasnosti truda. Pozharnaya bezopasnost'. Obshchie trebovaniya [Tekst]. Vved. 1992-07-01. – M.: Standartinform, 1991. (in Russian).
3. Subbotin V. I. Litij [Tekst] / V.I. Subbotin, M.N. Arnol'dov, M.N. Ivanovskij. – M.: IzdAT, 1999. – 263 p. (in Russian)
4. Korol'chenko A. YA., Korol'chenko D.A. Pozharovzryvoopasnost' veshchestv i materialov i sredstva ih tusheniya. Spravochnik: v 2-h ch. – 2-e izd., pererab. i dop. – M.: Ass. «Pozhnauka», 2004. (in Russian)
5. Pozharovzryvobezopasnost' tekhnologicheskikh processov radiohimicheskikh proizvodstv [Tekst]: monografiya; ispoln.: Zachinyayev G. M., Nazin E. R., M.: NTC YARB, 2009. (in Russian)
6. Starovoitov N. P., Korenev S. V., Dudkin V. A., Kazakov V. A. Ocenka bezopasnosti processa utilizacii litij sodержashchih othodov / Tez. dokl. Molodezhnaya nauchno-prakticheskaya konf. «Materialy i tekhnologii v atomnoj energetike». – M. – 22-23 iyunya 2022. – AO «VNIINM». (in Russian)
7. Programmnyj kompleks avtomatizirovannogo strukturno-logicheskogo modelirovaniya rascheta nadezhnosti i bezopasnosti sistem (PK ARBITR, versiya 1.1) [Tekst]: instrukciya pol'zovatelya. – Sankt-Peterburg, 2012. (in Russian)
8. Analiz bezopasnosti ustanovok i tekhnologij: Metodicheskoe posobie po problemam regulirovaniya riska. CHast' 3 / Pod obshch. red. S.V. Petrina. – Sarov: FGUP RFYAC-VNIIEF, 2006. (in Russian)

## ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ С ЦЕЛЬЮ АПРОБАЦИИ МЕТОДА ВОССТАНОВЛЕНИЯ СПЕКТРОВ НЕЙТРОННЫХ ПОТОКОВ НА РАБОЧИХ МЕСТАХ И МЕСТАХ ВРЕМЕННОГО ПРЕБЫВАНИЯ В ПУНКТАХ ХРАНЕНИЯ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ (ПХРО)

А. В. Васильев<sup>1</sup>, А. А. Екидин<sup>1</sup>, М. Д. Пышкина<sup>1</sup>, Д. Д. Десятов<sup>1</sup>, С. А. Чугунов<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Институт промышленной экологии УрО РАН, Екатеринбург, Россия

<sup>2</sup> ФГУП «РАДОН», Екатеринбург, Россия

*Проведены исследования энергетического распределения нейтронного излучения на рабочих местах и местах временного пребывания в пункте хранения радиоактивных отходов (ПХРО). На основе измерений мощности дозы нейтронного и гамма-излучения была построена картограмма поля мощностей доз нейтронного и гамма-излучения в емкости хранения нейтронных источников в ПХРО. Выполнена оценка условно истинного значения мощности амбиентного эквивалента дозы и интегральной плотности потока. На основе полученных данных об энергетическом распределении плотности потока нейтронного излучения были определены условно истинные значения мощности амбиентного эквивалента дозы  $H^*(10)$ , индивидуального эквивалента дозы  $H_p(10)$  и интегральной плотности потока нейтронного излучения как от емкости хранения нейтронных источников в ПХРО, так и от источника Am-Be.*

**Ключевые слова:** нейтронное излучение; энергетическое распределение; спектры; индивидуальный дозиметрический контроль.

### 1. Введение

Одним из основных принципов радиационной безопасности является принцип ALARA [1], который предусматривает поддержание на возможно низком и достижимом уровне как индивидуальных (ниже пределов, установленных действующими нормами), так и коллективных доз облучения, с учетом социальных и экономических факторов. В Российской Федерации принцип ALARA также известен как принцип оптимизации, соблюдение которого, наряду с принципами обоснования и нормирования, является одним из основных факторов обеспечения радиационной безопасности. ALARA применяется на радиационно опасных объектах всего мира в качестве одного из важнейших принципов обеспечения радиационной безопасности при проведении, планировании, подготовке и выполнении радиационно опасных работ [2].

Примером таких радиационно опасных объектов является ФГУП «РАДОН», оказывающий полный комплекс услуг в области обращения с радиоактивными отходами (РАО), включая сбор, транспортирование, переработку, кондиционирование и хранение РАО [3]. На данном предприятии присутствуют ПХРО, следовательно, при выполнении работ на таких пунктах в первую очередь требуется обеспечение радиационной безопасности.

Одной из сложнейших задач в области радиационной безопасности является определение спектра нейтронного излучения. Ввиду большого размаха по величине энергии нейтронов, который составляет не менее 9 порядков – около 0,025 эВ – для надтепловых нейтронов и до десятков МэВ для быстрых нейтронов [4–6], оценить индивидуальную дозу для персонала в большинстве случаев не представляется возможным. Нейтронное излучение, наряду с фотонным, при внешнем облучении представляет наибольшую опасность для персонала на рабочих местах, где такое воздействие обусловлено технологическими процессами или использованием источников ионизирующих излучений (ИИИ). Данное обстоятельство требует наиболее точных оценок эффективной дозы нейтронного излучения для персонала, которые

могут быть получены с использованием информации о распределении энергии нейтронов на рабочем месте персонала.

Цель выполненных исследований – апробация метода восстановления спектров нейтронных потоков на рабочих местах и местах временного пребывания в ПХРО ФГУП «РАДОН».

Задачи исследования:

- построение картограммы поля мощностей доз нейтронного излучения в емкости хранения нейтронных источников в ПХРО;
- измерение энергетического распределения нейтронного излучения;
- оценка условно истинного значения мощности амбиентного эквивалента дозы и интегральной плотности потока.

## 2. Материалы и методы

Для измерения энергетического распределения нейтронного излучения использован дозиметр-радиометр МКС-АТ1117М с БДКН-06 с набором сферзамедлителей, а также дозиметр-спектрометр нейтронов ДСН-4 на базе дозиметра ДКС-96Н. Восстановление спектра энергетического распределения нейтронного излучения выполнено на основе аттестованной методики [5,6], разработанной специалистами ИПЭ УрО РАН, номер в реестре № ФР.1.38.2020.37361. Полученные данные об энергетическом спектре нейтронов использованы для определения удельного амбиентного эквивалента дозы,  $h^*(10)$ , пЗв·см<sup>2</sup> при помощи уравнения (1):

$$h^*(10) = \frac{\sum_i h^*(10)_i \Phi_i}{\sum_i \Phi_i}, \quad (1)$$

где  $h^*(10)_i$  – удельный амбиентный эквивалент дозы в  $i$ -м энергетическом диапазоне, пЗв·см<sup>2</sup>;

$\Phi_i$  – плотность потока нейтронного излучения в  $i$ -м энергетическом диапазоне, с<sup>-1</sup>·см<sup>-2</sup>.

Удельный амбиентный эквивалент дозы несет информацию о средней энергии спектра, т. е. чем меньше УАЭД, тем «мягче» спектр, таким образом, вклад в плотность потока вносят нейтроны тепловых и промежуточных энергий.

Для измерения мощности амбиентного эквивалента дозы (далее МАЭД) использованы приборы дозиметрического контроля рабочих мест: МКС-АТ1117М (с БДКН-06 для нейтронного излучения и с БОИ-4 для гамма-излучения) и ДСН-4 на базе дозиметра ДКС-96Н. Условно истинное значение МАЭД было определено с учетом восстановленного энергетического спектра нейтронов. Среднее значение МАЭД и удельный АЭД использованы для расчета значения интегральной плотности потока, с<sup>-1</sup>·см<sup>-2</sup>, принятого в качестве условно истинного значения величины плотности потока, в соответствии с уравнением (2):

$$\varphi = \frac{\dot{H}^*(10)}{h^*(10)}, \quad (2)$$

где  $\dot{H}^*(10)$  – среднее значение мощности амбиентного эквивалента дозы, пЗв·с<sup>-1</sup>;

$h^*(10)$  – удельный амбиентный эквивалент дозы, пЗв·см<sup>2</sup>.

## 3. Результаты

Цель первого этапа измерений – определить теоретическое местоположение источника нейтронного излучения в помещении ПХРО. На данном этапе были проведены оценки мощности амбиентного эквивалента дозы нейтронного и гамма-излучения в десяти различных точках в местах временного пребывания в ПХРО (над хранилищем отработанных источников нейтронного излучения) (рис. 1). Детектор

располагался на высоте 1 м от пола. МАЭД гамма-излучения был измерен с помощью БОИ-4 МКС-АТ1117М, МАЭД нейтронного излучения – БДКН-06 МКС-АТ1117М. Результаты измерений МАЭД приведены в табл. 1.

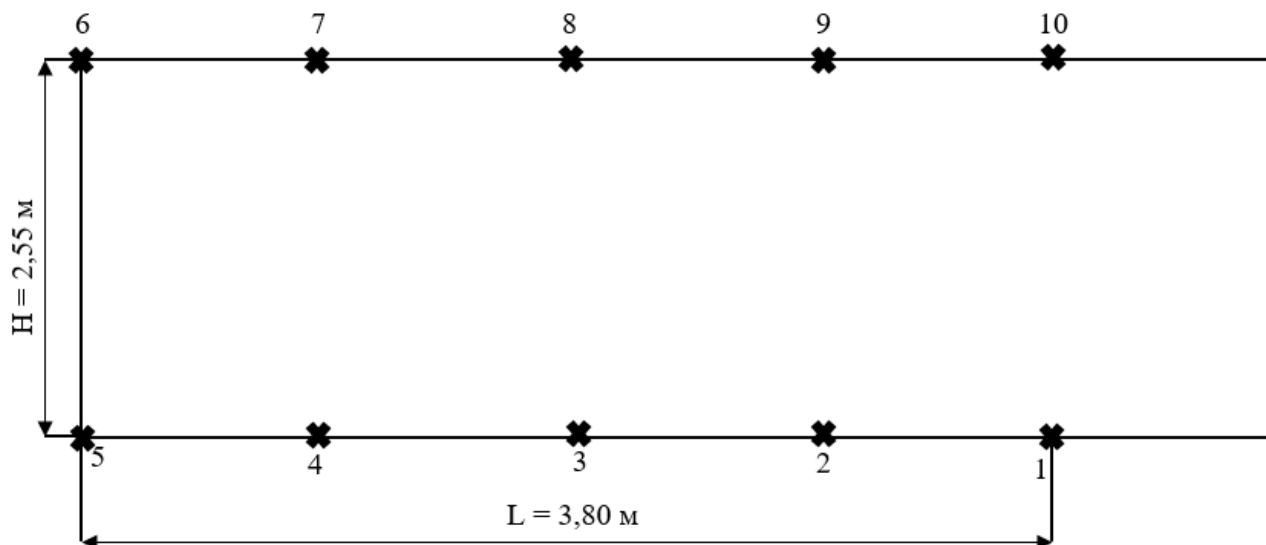


Рис. 1. Расположение точек измерения МАЭД нейтронного и гамма-излучения

Таблица 1. Измеренные значения МАЭД нейтронного и гамма-излучения в помещении над хранилищем отработанных источников нейтронного излучения

№ точки	Значение МАЭД нейтронного излучения, мкЗв/ч	Неопределенность, %	Значение МАЭД гамма-излучения, мкЗв/ч	Неопределенность, %
1	94,1	8	42,0	10
2	112,0	8	38,0	10
3	101,0	8	35,0	10
4	89,2	8	35,3	10
5	67,3	8	25,3	10
6	48,5	8	34,6	10
7	50,5	8	35,5	10
8	61,1	8	52,8	10
9	55,6	8	48,8	10
10	47,6	8	31,1	10

Для построения картограммы поля излучения мощностей доз нейтронного и гамма-излучения была вычислена сумма МАЭД нейтронного и гамма-излучения ( $n+\gamma$ ), а также вычислен парциальный вклад соответствующего излучения в суммарную мощность AMBIENTНОГО эквивалента дозы. Результаты представлены в табл. 2, картограмма поля излучений изображена на рис. 2.



Таблица 2. Сумма МАЭД нейтронного и гамма-излучения ( $n+\gamma$ ) и процентный вклад МАЭД соответствующего излучения в суммарную мощность амбиентного эквивалента дозы

№ точки	МАЭД нейтронного излучения, мкЗв/ч	МАЭД гамма-излучения, мкЗв/ч	Сумма МАЭД $n+\gamma$ , мкЗв/ч	Процентный вклад МАЭД нейтронного излучения в суммарную МАЭД $n+\gamma$ , %	Процентный вклад МАЭД гамма-излучения в суммарную МАЭД $n+\gamma$ , %
1	94,1	42,0	136,1	69,1	30,9
2	112	38,0	150,0	74,7	25,3
3	101	35,0	136,0	74,3	25,7
4	89,2	35,3	124,5	71,6	28,4
5	67,3	25,3	92,6	72,7	27,3
6	48,5	34,6	83,1	58,4	41,6
7	50,5	35,5	86,0	58,7	41,3
8	61,1	52,8	113,9	53,6	46,4
9	55,6	48,8	104,4	53,3	46,7
10	47,6	31,1	78,7	60,5	39,5

Минимальное значение МАЭД нейтронного излучения наблюдается в точке 10 – 47,6 мкЗв/ч, максимальное значение МАЭД нейтронного излучения – в точке 2 – 112 мкЗв/ч.

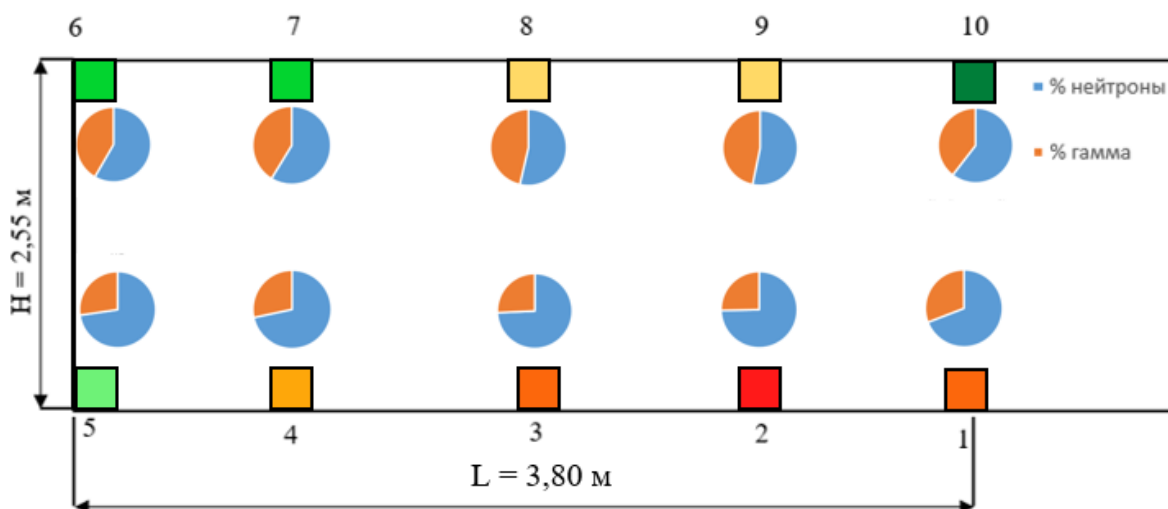


Рис. 2. Построенная картограмма поля мощностей доз нейтронного и гамма-излучения в емкости хранения нейтронных источников в ПХРО

В точке 2 наблюдается максимальное значение МАЭД не только нейтронного излучения, но и суммы МАЭД  $n+\gamma$ . Парциальный вклад МАЭД нейтронного излучения в суммарный МАЭД  $n+\gamma$  для точек 2 и 3 говорит о том, что источник нейтронов располагается ближе к данным точкам, также стоит отметить, что для верхних точек (6–10) вклад МАЭД нейтронного излучения ниже, чем для нижних (1–5). Теоретически можно предположить, что источник располагается в квадрате между точками 2, 3, 8, 9.

Целью второго этапа исследований было измерение энергетического распределения нейтронного излучения с последующей оценкой условно истинного значения мощности амбиентного эквивалента дозы и интегральной плотности потока.

На данном этапе были проведены измерения скоростей счета нейтронного излучения в точке с максимальным значением МАЭД нейтронного и гамма-излучений (точка 2) и в точке 9, расположенной напротив точки 2. Скорости счета, полученные по трем измерениям с помощью дозиметра-радиометра МКС-АТ1117М, в комплект которого входят сферы замедлителей диаметром от 3 до 12 дюймов, использовались для расчета нейтронных спектров. ДСН-4, в комплект которого входят сферы диаметром от 70 до 300 мм, имеет программное обеспечение (далее ПО) для восстановления энергетического спектра нейтронов, однако диапазон энергетического спектра нейтронов ограничивается промежуточными и быстрыми энергиями. В табл. 3 представлены значения скорости счета нейтронного излучения в точках 2 и 9, измеренного с помощью МКС-АТ1117М, в целях дальнейшего восстановления энергетического спектра.

Таблица 3. Усредненные по трем измерениям с помощью дозиметра-радиометра МКС-АТ1117М значения скорости счета нейтронного излучения в точках 2 и 9 в помещении над хранилищем отработанных источников нейтронного излучения

Диаметр сферы, дюйм	Неопределенность, %	Скорость счета в точке 2, с <sup>-1</sup>	Скорость счета в точке 9, с <sup>-1</sup>
0	5	70,0	48,9
3	5	71,1	47,1
4	5	89,1	60,9
6	5	103	64,9
8	5	93,9	53,2
10	5	68,5	35,0
12	5	49,0	25,7

В табл. 4 представлены значения МАЭД нейтронного излучения, измеренного с помощью ДСН-4, в точке 2.

Таблица 4. Усредненные по трем измерениям с помощью ДСН-4 значения МАЭД нейтронного излучения в точке 2 в помещении над хранилищем отработанных источников нейтронного излучения

Диаметр сферы, мм	Неопределенность, %	МАЭД в точке 2, мкЗв/ч
0	5	53,92
70	5	109,9
120	5	151,6
200	5	157,3
300	5	104,3

На рис. 3 изображен восстановленный энергетический спектр нейтронного излучения в точке 2 при использовании детекторов МКС-АТ1117М и ДСН-4.

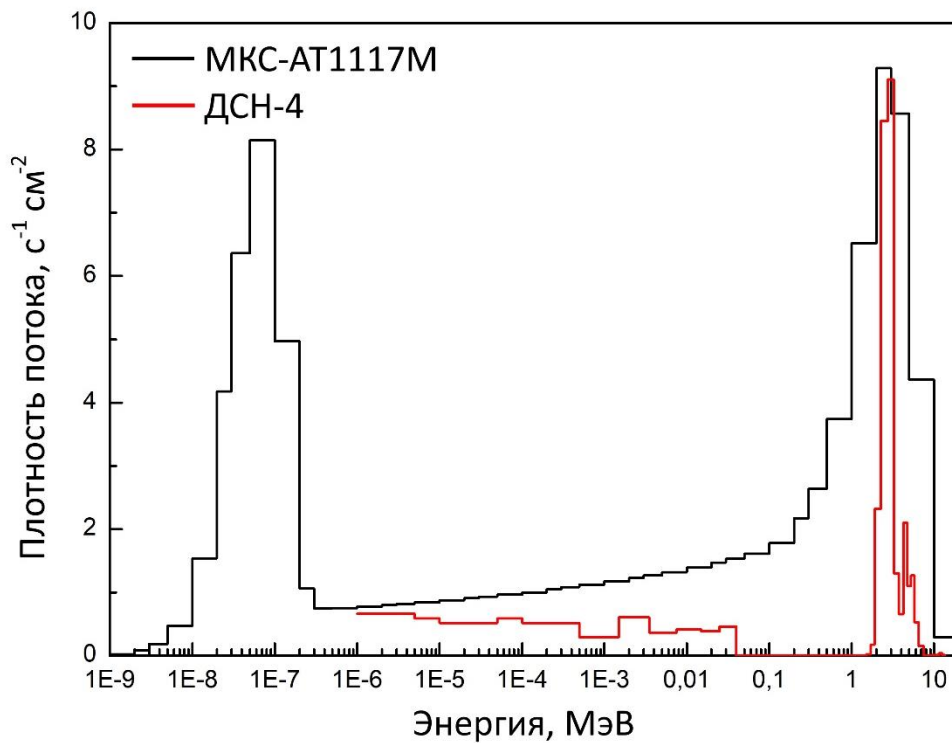


Рис. 3. Энергетическое распределение плотности потока нейтронного излучения в точке 2

В табл. 5, 6 представлены расчетные величины характеристик полей, а также вклад нейтронов различных энергий в плотность потока и МАЭД в точке 2.

Таблица 5. Расчетные величины характеристик полей нейтронного излучения в точке 2

Параметр	Значение	Неопределенность	Единица измерения
Интегральная плотность потока, $\varphi$	90	5	$\text{с}^{-1} \cdot \text{см}^{-2}$
Мощность амбиентного эквивалента дозы, $\dot{H}^*(10)$	27	9	мкЗв/ч
Мощность эффективной дозы, E	25	8	мкЗв/ч
Мощность индивидуального эквивалента дозы, $H_p(10)$	30	10	мкЗв/ч
Удельный амбиентный эквивалент дозы, $h^*(10)$	85	—	пЗв·см <sup>2</sup>

Таблица 6. Вклад нейтронов различных энергий в плотность потока и МАЭД в точке 2

Нейтроны	Вклад в плотность потока, %	Вклад МАЭД, %
Быстрые	32	70
Промежуточные	36	28
Медленные	32	2

Из рис. 3, а также табл. 5, 6 можно сделать вывод, что вклад нейтронов различных энергий (тепловые, промежуточные, быстрые) в плотность потока в точке 2

примерно одинаков, однако вклад в МАЭД больше у быстрых нейтронов и достигает 70 %.

На рис. 4 изображен восстановленный энергетический спектр нейтронного излучения в точке 9 при использовании детекторов МКС-АТ1117М и ДСН-4.

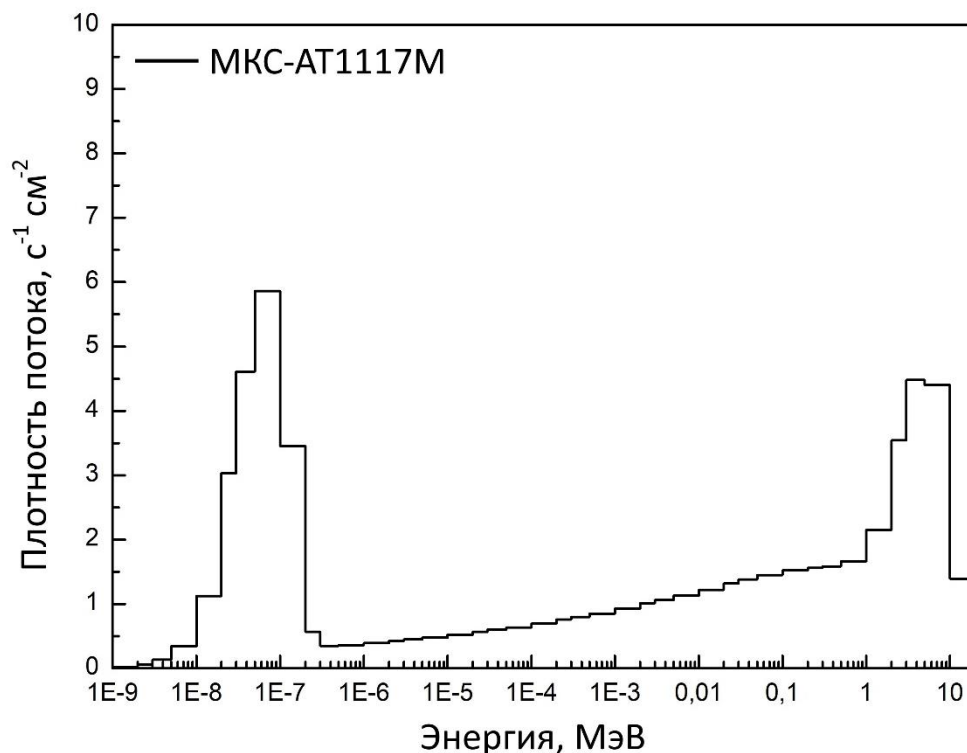


Рис. 4. Энергетическое распределение плотности потока нейтронного излучения в точке 9

Энергетический спектр нейтронов в точке 9 имеет сходство со спектром в точке 2, а именно имеются пики тепловых и быстрых нейтронов с энергией 3–5 МэВ. В точке 9 нейтронное излучение имеет меньшую плотность потока, что подтверждается результатами измерений скорости счета. Также можно сделать вывод о том, что источник нейтронного излучения располагается ближе к точке 2. Расчетные величины характеристик полей нейтронного излучения в точке 9 представлены в табл. 7, 8.

Таблица 7. Расчетные величины характеристик полей нейтронного излучения в точке 9

Параметр	Значение	Неопределенность	Единица измерения
Интегральная плотность потока, $\varphi$	59	1	$\text{с}^{-1} \cdot \text{см}^{-2}$
Мощность амбиентного эквивалента дозы, $\dot{H}^*(10)$	15	5	мкЗв/ч
Мощность эффективной дозы, E	15	5	мкЗв/ч
Мощность индивидуального эквивалента дозы, $H_p(10)$	17	6	мкЗв/ч
Удельный амбиентный эквивалент дозы, $h^*(10)$	73	-	пЗв·см <sup>2</sup>

Таблица 8. Вклад нейтронов различных энергий в плотность потока и МАЭД в точке 9

Нейтроны	Вклад в плотность потока, %	Вклад МАЭД, %
Быстрые	27	78
Промежуточные	39	19
Медленные	34	3

Наблюдаются различия во вкладах нейтронов различных энергий в плотность потока в точках 2 и 9. Так, в точке 9 вклад быстрых нейтронов немного ниже. Однако вклады нейтронов различных энергий в МАЭД в точках 9 и 2 сопоставимые.

Заключительным этапом исследования являлось измерение МАЭД нейтронного излучения образцового источника Am-Be. Результаты измерений приведены в табл. 9, 10.

Таблица 9. Усредненные по трем измерениям с помощью ДСН-4 значения МАЭД нейтронного излучения от источника нейтронов Am-Be

Диаметр сферы, мм	Неопределенность, %	МАЭД, мкЗв/ч
0	5	28,3
70	5	50,6
120	5	74,9
200	5	79,9
300	5	56,5

Таблица 10. Усредненные по трем измерениям с помощью МКС-АТ1117М значения МАЭД нейтронного излучения от источника нейтронов Am-Be

Диаметр сферы, дюйм (мм)	Неопределенность, %	МАЭД, мкЗв/ч
0 (0)	5	27,4
3 (76,2)	5	27,1
4 (101,6)	5	39,0
6 (152,4)	5	50,5
8 (203,2)	5	44,9
10 (254)	5	62,1
12 (304,8)	5	27,8

При измерении МАЭД нейтронного излучения МКС-АТ1117М восстановление энергетического спектра нейтронов осуществлялось при помощи аттестованной методики ФР.1.38.2020.37361. Программное обеспечение ДСН-4 позволяет восстанавливать энергетический спектр нейтронов автоматически. На рис. 5 изображены энергетические спектры нейтронного излучения, полученные при помощи МКС-АТ1117М и ДСН-4.

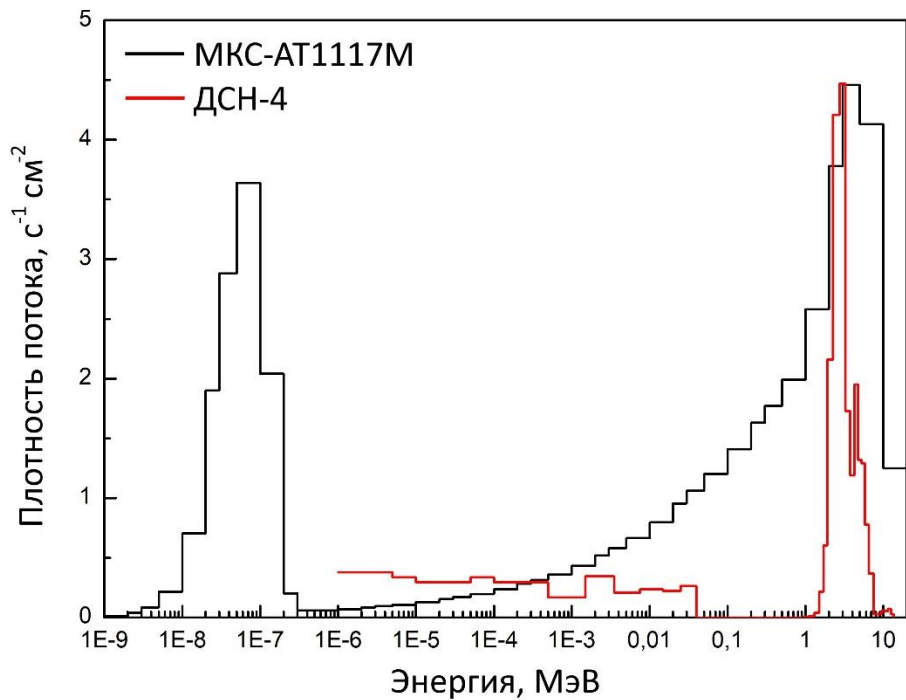


Рис. 5. Энергетическое распределение плотности потока нейтронного излучения источника нейтронного излучения Am-Be

Восстановив энергетический спектр источника Am-Be, можно сделать вывод: вклад нейтронов различных энергий (тепловые, промежуточные, быстрые) в плотность потока примерно одинаков.

На рис. 6 представлено сравнение энергетического распределения плотности потока нейтронов Am-Be источника, полученного в данной работе, и энергетического распределения плотности потока нейтронов Am-Be, опубликованного в справочнике МАГАТЭ [4].

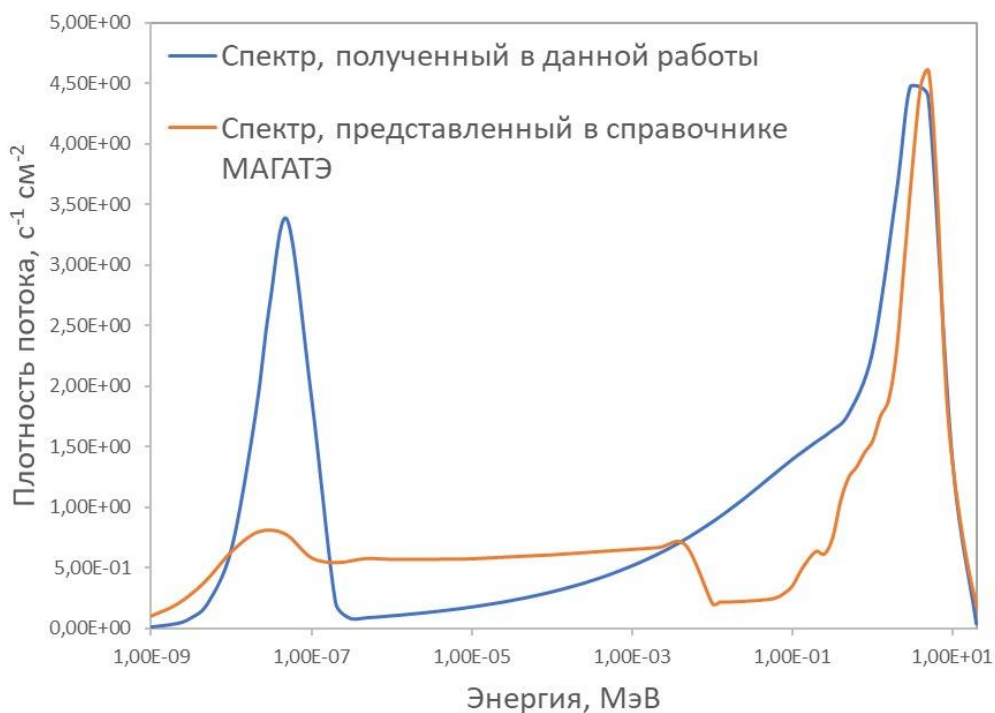


Рис. 6. Энергетическое распределение плотности потока нейтронного излучения источника нейтронного излучения Am-Be [4]

Расчетные величины характеристик полей нейтронного излучения от источника Am-Be представлены в табл. 11, 12.

Таблица 11. Расчетные величины характеристик полей нейтронного излучения от источника Am-Be

Параметр	Значение	Неопределенность	Единица измерения
Интегральная плотность потока, $\varphi$	43	1	$\text{с}^{-1} \cdot \text{см}^{-2}$
Мощность амбиентного эквивалента дозы, $\dot{H}^*(10)$	16	5	мкЗв/ч
Мощность эффективной дозы, E	15	5	мкЗв/ч
Мощность индивидуального эквивалента дозы, $H_p(10)$	17	6	мкЗв/ч
Удельный амбиентный эквивалент дозы, $h^*(10)$	100	–	пЗв·см <sup>2</sup>

Таблица 12. Вклад нейтронов различных энергий в плотность потока и МАЭД от источника Am-Be

Нейтроны	Вклад в плотность потока, %	Вклад МАЭД, %
Быстрые	38	74
Промежуточные	35	25
Медленные	27	2

Результаты табл. 12 сопоставимы с результатами, полученными для точек 2 и 9.

#### 4. Обсуждение

Проведены измерения МАЭД нейтронного и гамма-излучения в различных точках в местах временного пребывания в ПХРО. По полученным результатам было определено теоретическое местоположение источника нейтронного излучения. В точках с наибольшими значениями МАЭД нейтронного и гамма-излучения были проведены измерения энергетического спектра нейтронного излучения с помощью двух различных детекторов. Были рассчитаны величины характеристик полей нейтронного излучения в точках 2 и 9, а также от источника Am-Be.

Измерения МАЭД нейтронного излучения от образцового источника дают различные результаты. Это связано с различным конструкционным решением дозиметров, различным размером чувствительного объема детектора, а также с различием их функций энергетической зависимости чувствительности (ЭЗЧ). Принятое значение величины (верное) МАЭД может быть получено только с помощью энергетического распределения плотности потока нейтронного излучения.

В данной работе представлены результаты, которые демонстрируют сложность и тщательность, необходимые для проведения измерений в нейтронных полях на рабочих местах. Знание характеристик энергии нейтронов и их направленного распределения имеет важное значение для обеспечения безопасности радиационно опасных объектов.

## 5. Выводы

1. Минимальное значение МАЭД нейтронного излучения наблюдается в точке 10 – 47,6 мкЗв/ч, максимальное значение МАЭД нейтронного излучения – в точке 2 – 112 мкЗв/ч.

2. Парциальный вклад МАЭД нейтронного излучения в суммарный МАЭД n+γ для точек 2 и 3 говорит о том, что источник нейтронов располагается ближе к данным точкам. Также стоит отметить, что для верхних точек (6–10) вклад МАЭД нейтронного излучения ниже, чем для нижних (1–5).

3. Теоретически можно предположить, что источник располагается в квадрате между точками 2, 3, 8, 9.

4. Энергетические спектры нейтронов в точках 2 и 9 и от источника Am-Be имеют пики тепловых и быстрых нейтронов с энергией 3–5 МэВ.

5. Основной вклад нейтронов различных энергий (тепловые, промежуточные, быстрые) в плотность потока примерно одинаков, однако вклад в МАЭД больше у быстрых нейтронов (не менее 70 %).

## 6. Благодарности

Авторы благодарят сотрудников ФГУП «РАДОН», которые помогали во время измерений.

## 7. Список литературы

1. ICRP, 1955. Recommendations of the International Commission on Radiological Protection // Br. J. Radiol. Suppl. 6.
2. Правила радиационной безопасности при эксплуатации атомных станций (ПРБ АС-99).
3. ФГУП «Федеральный экологический оператор» (ФГУП «ФЭО») [Электронный ресурс]. – URL: <https://rosfeo.ru>. (Дата обращения: 01.07.2022).
4. Compendium of neutron spectra and detector responses for radiation protection purposes: supplement to technical reports series no. 403. Vienna: International Atomic Energy Agency, 2001.
5. Профессиональное облучение нейтронами на Белоярской АЭС / М. Д. Пышкина, А. В. Васильев, А. А. Екидин [и др.] // АНРИ. – 2021. – № 3(106). – С. 16–26. – DOI 10.37414/2075-1338-2021-106-3-16-26. – EDN AAAEQX.
6. Дозиметрия нейтронного излучения на рабочих местах персонала АО «Институт реакторных материалов» / М. Д. Пышкина, А. В. Васильев, А. А. Екидин [и др.] // Радиационная гигиена. – 2021. – Т. 14. – № 2. – С. 89–99. – DOI 10.21514/1998-426X-2021-14-2-89-99. – EDN FNFKUB.

### Сведения об авторах:

**Васильев Алексей Владимирович**, к. т. н., заведующий лабораторией Института промышленной экологии УрО РАН, ул. Софьи Ковалевской, 20 а, Екатеринбург. Эл. почта: [alexey.vasiljev@gmail.com](mailto:alexey.vasiljev@gmail.com).

**Екидин Алексей Акимович**, к.ф.-м.н., доцент, ведущий научный сотрудник Института промышленной экологии УрО РАН, Екатеринбург, Россия.

**Пышкина Мария Дмитриевна**, к. т. н., научный сотрудник Института промышленной экологии УрО РАН, Екатеринбург, Россия.

**Десятов Денис Дмитриевич**, инженер-исследователь Института промышленной экологии УрО РАН, Екатеринбург, Россия.

**Чугунов Семен Андреевич**, начальник службы РБ Свердловского отделения филиала «Уральский территориальный округ» ФГУП «РАДОН», ул. Корепина, 52, Екатеринбург, Россия.



## INSTRUMENTAL MEASUREMENTS FOR THE PURPOSE OF TESTING THE METHOD OF RESTORING THE SPECTRA OF NEUTRON FLUXES AT WORKPLACES AND PLACES OF TEMPORARY STAY IN THE RADIOACTIVE WASTES LANDFILL

A. V. Vasiliev<sup>1</sup>, A. A. Ekidin<sup>1</sup>, M. D. Pyshkina<sup>1</sup>, D. D. Desyatov<sup>1</sup>, S. A. Chugunov<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Institute of Industrial Ecology, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg

<sup>2</sup> FSUE RADON, Ekaterinburg, Russia

*Energy distribution studies of neutron radiation at workplaces and places of temporary stay in the radioactive waste storage facility (RWSF) have been carried out. Based on dose rate measurements of the neutron and gamma radiation, a cartogram of the dose rate field of neutron and gamma radiation in the storage capacity of neutron sources in the RWSF has been constructed. The estimation of the conditionally true value of the ambient dose equivalent rate and the fluence was performed. Based on the obtained data on the energy distribution of the neutron radiation flux density, the conditionally true values of the ambient dose equivalent  $H^*(10)$ , the individual dose equivalent  $H_p(10)$  and the integral neutron radiation flux density were determined both from the storage capacity of neutron sources in RWSF and from the Am-Be source.*

**Key words:** neutron radiation; energy distribution; spectra; individual dosimetric control.

### References

1. ICRP, 1955. Recommendations of the International Commission on Radiological Protection // Br. J. Radiol. Suppl. 6.
2. Rules of radiation safety in the operation of nuclear power plants (PRB AS-99).
3. FSUE «Federal ecological operator» (FSUE «FEO») Available at: <https://rosfeo.ru>. (Accessed: 01.07.2022).
4. Compendium of neutron spectra and detector responses for radiation protection purposes: supplement to technical reports series no. 403. Vienna: International Atomic Energy Agency, 2001.
5. Occupational exposure to neutrons at the Beloyarsk NPP / M. D. Pyshkina, A. V. Vasilyev, A. A. Ekidin [et al.] // ANRI. – 2021. – № 3(106). – P. 16–26. – DOI 10.37414/2075-1338-2021-106-3-16-26. – EDN AAAEQX.
6. Neutron dosimetry at workplaces of JC «Institute of Nuclear Materials» / M. D. Pyshkina, A. V. Vasilyev, A. A. Ekidin [et al.] // Radiation Hygiene. – 2021. – V. 14. – № 2. – P. 89–99. – DOI 10.21514/1998-426X-2021-14-2-89-99. – EDN FNFKUB.

## СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ КЛАССИЧЕСКОЙ КИНЕТИКИ ЯДЕРНОГО РЕАКТОРА И КИНЕТИКИ МАРКОВСКОЙ ЦЕПНОЙ РЕАКЦИИ ДЕЛЕНИЯ

Н. Н. Ошканов, Я. О. Комарова, П. А. Михайлова

Уральский федеральный университет имени первого Президента России  
Б. Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

*Цель исследования – установление границ применимости классической кинетики ядерного реактора, которая является приближенной. Представление цепной ядерной реакции в виде марковской цепи позволило использовать ее для разработки кинетики ядерного реактора. Составленные и решенные уравнения этой кинетики не имеют приближений, что позволило принять ее в качестве базовой для определения границ применимости классической кинетики для любой длительности цепной реакции. Определены границы применимости классической кинетики. Они отсутствуют для реактивности  $0,05\beta$ . Для реактивности  $0,05\beta$ – $0,15\beta$  границы равны  $2,4$ – $0,66$  с длительностью цепной реакции для отклонения  $1\%$  от базовой кинетики. Для отклонения  $5\%$  они равны  $11$ – $3,7$  с, для отклонения  $10\%$  они равны  $30$ – $7,7$  с. Для реактивности  $0,15\beta$ – $0,3\beta$  границы равны  $0,66$ – $0,28$  с для отклонения  $1\%$ . Для отклонения  $5\%$  они равны  $3,7$ – $1,5$  с, для отклонения  $10\%$  они равны  $7,7$ – $3,1$  с. Установлена граница вводимой реактивности  $0,05\beta$ , ниже которой в классической кинетике возможно применить метод разделения переменных для вывода основных уравнений кинетики точечного реактора. Дополнительно установлены основные причины приближенных уравнений и их решений в классической кинетике.*

**Ключевые слова:** граница применимости; кинетика; марковская цепь; точечный реактор; цепная ядерная реакция; ядерный реактор.

### 1. Введение

Обоснование безопасного поведения ядерного реактора в нестационарных процессах (кинетика) [1] используется на основе решения нестационарных уравнений переноса нейтронов в диффузионном приближении классической кинетики [2]. Однако решения ее уравнений носят приближенный характер даже при использовании вычислительных машин как во времена формирования классической кинетики [2], так и в настоящее время [1].

Изучение такого состояния показало, что в классической кинетике для решения нестационарного уравнения переноса нейтронов разработано несколько приближенных методов [2–4]. Их модернизация и ввод новых методов решения уравнения кинетики [5, 6] сохранили приближенный характер вывода и решения уравнений кинетики. Современная систематизация [1, 7] сохранила исходное нестационарное уравнение переноса нейтронов в диффузионном приближении классической кинетики. Регулярный обзор баз данных с момента издания последней монографии по кинетике [1] не обнаружил публикаций по рассматриваемой теме исследования.

Проведенный анализ показал [8], что причинами приближенности классической кинетики являются:

- во-первых, сложность решения интегро-дифференциальных уравнений, выведенных на основе теории переноса нейтронов;
- во-вторых, представление цепной ядерной реакции (ЦЯР) в виде непрерывных процессов диффузии нейтронов и их переноса, что не полностью соответствует дискретным процессам ЦЯР.

Первое обстоятельство вызвано разной природой входящих в уравнения функций, что требует применения разных математических исчислений – дифференцирование параметров, зависящих от времени и координат вследствие их непрерывных распределений, и интегрирование параметров, зависящих от энергии вследствие ее скачкообразного изменения [2]. Относительно точное решение удается получить лишь для точечной модели реактора [2], в которой нейтроны имеют одинаковую энергию, а функции плотности нейтронов и предшественников запаздывающих нейтронов (предшественники) допускают разделение переменных координат и времени, что возможно лишь при нахождении реактора в близком к критическому состоянию [3].

Вторым обстоятельством является приближение кинетики к непрерывному распределению диффузии и переноса нейтронов, в то время как даже классическая кинетика признает их дискретность и стохастичность [4].

Использование приближенных результатов решений уравнений классической кинетики (особенно при неопределенности границ вводимой реактивности и времени ее действия) может привести к неправильной оценке последствий аварийных ситуаций относительно сохранения ядерной безопасности и влияния на жизнедеятельность человека и экологическую обстановку.

В [8] показана некорректность принятия в классической кинетике цепной реакции как единого нейтронного цикла, в то время как она по определению является цепью последовательных циклов деления. Это позволяет рассматривать диффузию и перенос нейтронов только внутри каждого цикла, которые образуют выходную плотность нейтронов, являющуюся входной плотностью нейтронов следующего цикла. Таким образом, можно предположить, что ЦЯР представляет собой марковскую цепь последовательности событий, в которой вероятность каждого события зависит от предыдущего события.

Цель исследования – установление границ применимости приближенной классической кинетики ядерного реактора на основе точной теории Марковской цепи.

Актуальность исследования определяется необходимостью установления границ использования приближенной классической кинетики при обосновании безопасности поведения ядерного реактора в нестационарных процессах [1] для предотвращения неправильной оценки последствий аварийных ситуаций.

В исследовании рассматривается тепловой ядерный реактор в точечной модели с однорупповым представлением запаздывающих нейтронов, который не имеет внешних обратных связей (далее – точечный реактор). Такой выбор позволяет учитывать лишь непосредственные нейтронно-физические процессы активной зоны реактора и как можно глубже понять их природу [1] и влияние на аварийные ситуации.

## **2. Материалы и методы**

Сравнительный анализ производится численным методом поциклового сличения решений уравнений классической кинетики и Марковской кинетики с определением относительных уровней расхождений в диапазоне 1–10 % для разных величин вводимых реактивностей.

## **3. Результаты и обсуждение**

### **3.1. Вывод уравнений кинетики марковской цепной реакции**

Как отмечено выше, марковская цепь является последовательностью событий, в которой вероятность каждого события зависит от предыдущего события. Для физики понятие «цепная ядерная реакция» применимо, если доказано, что (а) она является последовательностью циклов деления и (b) вероятность образования нового цикла деления определяется только выходной плотностью нейтронов предыдущего цикла. Так как физика ЦЯР по определению является цепью циклов деления, выходная

плотность нейтронов каждого из которых является входной плотностью нейтронов последующего цикла, то выполняются оба условия отнесения ЦЯР к марковской цепи.

Физика ЦЯР рассматривает два разных процесса образования нейтронов: (с) дискретное скачкообразное образование мгновенных нейтронов в начале каждого цикла и (d) непрерывное поступление запаздывающих нейтронов распада предшественников рассматриваемого цикла и нераспавшихся предшественников предшествующих циклов [8]. В [8] для стационарного режима установлена величина плотности нераспавшихся предшественников предыдущих циклов, которая определяется формулой:

$$C/n_0 = \beta \exp(-\lambda\tau) / [1 - \exp(-\lambda\tau)], \quad (1)$$

где:

$C$  – плотность нераспавшихся предшественников предыдущих циклов ( $\text{см}^{-3}$ );

$n_0$  – плотность нейтронов в конце цикла ( $\text{см}^{-3}$ );

$\beta$  – эффективная доля запаздывающих нейтронов в общем количестве нейтронов, образующихся в цикле (0,0065 для урана-235);

$\lambda$  – постоянная распада предшественников ( $0,0767 \text{ с}^{-1}$  для урана-235);

$\tau$  – средняя длительность цикла (0,001 с для теплового реактора).

Из (1) следует, что плотность предшественников предыдущих циклов примерно в 13 тыс. раз больше плотности предшественников, образующихся в рассматриваемом цикле ( $C/n_0\beta$ ). Таким образом, подавляющее образование запаздывающих нейтронов в каждом цикле происходит от нераспавшихся предшественников предыдущих циклов.

**Стационарный режим.** В данном режиме плотность нейтронов (мощность реактора) в конце каждого цикла имеет одинаковую величину, т. е. эффективный коэффициент размножения реактора (количество нейтронов деления в реакторе при поглощении одного нейтрона [3]) остается постоянным от цикла к циклу ЦЯР.

После деления ядер в начале «нового» цикла образуются мгновенные нейтроны с плотностью  $\nu n_0(1 - \beta) \text{ см}^{-3}$  и «новые» предшественники с плотностью  $\nu n_0\beta \text{ см}^{-3}$ , где  $\nu$  – полное число нейтронов, испускаемых в цикле на одно деление [2].

В течение цикла ядерные реакции взаимодействия нейтронов снижают плотности мгновенных и запаздывающих нейтронов из-за их утечки и поглощения без деления в ядрах активной зоны. В конце цикла исходное количество  $\nu$  нейтронов снижается до одного нейтрона на одно деление, которые поглощаются делящимися ядрами, производя их деление. Поэтому баланс плотностей нейтронов в начале и в конце цикла деления ядер составляет:

$$n_0(1 - \beta) + [n_0\beta e / (1 - e) + n_0\beta](1 - e) = n_0, \quad (2)$$

где:

первый член – плотность мгновенных нейтронов в конце цикла ( $\text{см}^{-3}$ );

первый член в квадратных скобках – плотность  $C$  «старых» предшественников в конце цикла ( $\text{см}^{-3}$ );

$e \equiv \exp(1 - \lambda\tau)$  – оператор распада предшественников в течение одного цикла;

второй член в квадратных скобках – плотность «новых» предшественников в начале цикла ( $\text{см}^{-3}$ );

множитель квадратной скобки – оператор распада предшественников.

Этот баланс показывает, что нейтроны образуются в начале цикла и в течение цикла, а в конце цикла поглощаются в делящихся ядрах. В результате плотность нейтронов в конце цикла  $n_0$  ( $\text{см}^{-3}$ ) сохраняется от цикла к циклу, образуя тем самым стационарный режим реактора.

Таким образом,

– основным источником поступления запаздывающих нейтронов в цикл являются нераспавшиеся предшественники предыдущих циклов;

– вследствие малой длительности цикла целесообразно запаздывающие нейтроны учитывать единой группой со средневзвешенной постоянной распада, т. к. они формируются и полностью поглощаются в течение единого цикла;

– среднее время жизни как мгновенных, так и запаздывающих нейтронов равно длительности цикла, поэтому целесообразно считать поколением нейтронов в ЦЯР мгновенные и запаздывающие нейтроны, которые образуются в течение цикла и поглощаются в конце этого цикла.

**Нестационарный режим.** При изменении размножения нейтронов в активной зоне плотность нейтронов (мощность реактора) изменяется, т. е. в реакторе образуется нестационарный режим. Действительное ее поведение в реакторе определяется на основе решения уравнения кинетики точечного реактора при вводе в него постоянно действующего скачка коэффициента размножения (ступенчатый ввод реактивности [3]), например, путем моделирования скачкообразного извлечения стержня-поглотителя нейтронов из активной зоны. Это означает, что изменение эффективного коэффициента размножения производится в конце «старого» цикла с  $k_0 = 1$  до  $k = (1 + \Delta k)$ . Деление в начале «нового» цикла образует мгновенные нейтроны с плотностью  $vk n_0(1 - \beta)$  ( $\text{см}^{-3}$ ) (с учетом произошедшего в конце предыдущего цикла изменения коэффициента размножения), плотность «новых» предшественников –  $vk n_0 \beta$  ( $\text{см}^{-3}$ ). Плотность «старых» предшественников не изменяется и сохраняет исходную плотность  $n_0 \beta e / (1 - e)$  ( $\text{см}^{-3}$ ), т. к. она образовалась до ввода изменения размножения в конце «старого» цикла [8].

Баланс плотности нейтронов в конце первого цикла после изменения коэффициента размножения активной зоны изменится в сравнении с исходным балансом плотности до:

$$n_1 = kn_0(1 - \beta) + [n_0 \beta e / (1 - e) + kn_0 \beta](1 - e) = kn_0(1 - \beta e) + n_0 \beta e, \quad (3)$$

где:

$n_1$  – плотность нейтронов в конце 1-го цикла после ввода реактивности ( $\text{см}^{-3}$ );

1-й член – плотность мгновенных нейтронов с учетом изменения размножения;

2-й член в квадратных скобках – плотность «новых» предшественников с учетом изменения размножения;

1-й член в квадратных скобках – исходная плотность предшественников с учетом невливания на нее изменения коэффициента размножения.

Аналогично плотность нейтронов в конце второго цикла после изменения размножения активной зоны в конце первого цикла изменится в сравнении с исходной плотностью до:

$$n_2 = kn_1(1 - \beta) + [n_0 \beta e / (1 - e) + kn_1 \beta + \langle kn_0 \beta e \rangle](1 - e) = \\ = kn_1(1 - \beta e) + n_0 \beta e + \langle kn_0 \beta e \lambda \tau \rangle, \quad (4)$$

где:

$n_2$  – плотность нейтронов в конце второго цикла после ввода реактивности ( $\text{см}^{-3}$ );

$kn_0 \beta e \lambda \tau$  – плотность «новых» предшественников первого цикла с учетом их распада во втором цикле с учетом  $(1 - e) \approx \lambda \tau$  из малости последнего ( $\text{см}^{-3}$ ).

Аналогично баланс третьего цикла составляет:

$$n_3 = kn_2(1 - \beta) + \left[ \frac{n_0 \beta e}{(1 - e)} + kn_2 \beta + \langle kn_0 \beta e^2 + kn_1 \beta e \rangle \right] (1 - e) = \\ = kn_2(1 - \beta e) + n_0 \beta e + \langle kn_0 \beta (e \lambda \tau)^2 + kn_1 \beta (e \lambda \tau) \rangle, \quad (5)$$

где:

$n_3$  – плотность нейтронов в конце третьего цикла после ввода реактивности ( $\text{см}^{-3}$ );

$\langle kn_0 \beta (e \lambda \tau)^2 + kn_1 \beta (e \lambda \tau) \rangle$  – плотность «новых» предшественников первого и второго

циклов с учетом их распада в этих циклах ( $\text{см}^{-3}$ );

Подстановка (2), (3) в (4) позволяет составить точный рекуррентный баланс  $m$ -цикла:

$$n_m = kn_{m-1}(1 - \beta e) + n_0 \beta e + k\beta \lambda \tau [n_0 e^{m-1} + n_1 e^{m-2} + n_2 e^{m-3} + \dots + n_{m-2} e^0] \\ \equiv kn_{m-1}(1 - \beta e) + n_0 \beta e + k\beta \lambda \tau n_{m-2} [e^{m-1} + e^{m-2} + e^{m-3} + \dots + e^1 + e^0], \quad (6)$$

где:

в квадратной скобке произведена замена плотностей нейтронов каждого члена на максимальное значение  $n_{m-2}$ ;

3-й член является плотностью нераспавшихся «новых» (с момента первого ввода реактивности) предшественников в дополнение к плотности предшественников.

Замена плотностей нейтронов на  $n_{m-2}$ , во-первых, идет в запас увеличения исходной плотности предшественников и, во-вторых, позволяет учесть растущую от цикла к циклу добавку плотности нейтронов от распада «новых» предшественников предыдущих циклов. Выражение в квадратной скобке образует геометрическую прогрессию со знаменателем «е», сумма которой с учетом множителя квадратной скобки равна:

$$k\beta \lambda \tau n_{m-2} [e^{m-1} + e^{m-2} + e^{m-3} + \dots + e^1 + e^0] = k\beta n_{m-2} (1 - e^m). \quad (7)$$

Даже для максимально допустимой величины  $k \equiv (1 + \beta)$ , которая вызывает сверхкритический рост плотности нейтронов, величина последнего выражения с учетом  $n_{m \rightarrow \infty} = \beta$  [8] не превышает ничтожно малой добавки  $o(n_m) \approx 4 \cdot 10^{-5}$ .

Таким образом, текущий рекуррентный член приобретает вид:

$$n_m = kn_{m-1}(1 - \beta e) + n_0 \beta e + o(n_m). \quad (8)$$

Подстановка (2) и (3) в (4) с учетом  $o(n_m)$  приводит (4) к рекуррентному виду с геометрической прогрессией со знаменателем  $k(1 - \beta e)$ :

$$n_3/n_0 = [k(1 - \beta e)]^3 + \beta e \{ [k(1 - \beta e)]^2 + [k(1 - \beta e)] + 1 \} = \\ = [k(1 - \beta e)]^3 + \beta e \frac{[1 - k(1 - \beta e)]^3}{1 - k(1 - \beta e)} + o(n_3/n_0). \quad (9)$$

Соответственно, выходная плотность нейтронов  $m$ -цикла относится к выходной плотности исходного (нулевого) цикла стационарного режима как:

$$n_m/n_0 = [k(1 - \beta e)]^m + \beta e \frac{[1 - k(1 - \beta e)]^m}{1 - k(1 - \beta e)} + o(n_m/n_0). \quad (10)$$

Исключение из (6) добавки  $o(n_m/n_0)$  в силу ее малости не является значимым приближением, т. к. ее величина не превышает  $4 \cdot 10^{-5}$ . Таким образом, Марковская кинетика может служить базовой кинетикой ядерного реактора.

### 3.2. Численный эксперимент

Сравнение поведения плотности нейтронов по классической кинетике и по марковской кинетике произведено с помощью составленной вычислительной программы с шагом, равным длительности цикла, т. е. времени жизни мгновенных нейтронов, которое считается в классической кинетике минимальным временем, влияющим на поведение нейтронов [1]. Вычисления произведены в соответствии с (6) для марковской кинетики и (7) для классической кинетики [3]:

$$\frac{n_m}{n_0} = \frac{\beta}{\beta - \rho} \exp \frac{\lambda \rho}{\beta - \rho} t - \frac{\rho}{\beta - \rho} \exp \left( - \frac{\beta - \rho}{\tau} t \right), \quad (11)$$

где:

$\rho = (k - 1)/k$  – реактивность;

$t = m\tau$  – время с начала ввода изменения размножения (с).

На рис. 1 показано поведение относительной плотности нейтронов во времени при вводе положительной реактивности для урана-235, в т. ч. на нем показаны расхождения (отклонения) выше примерно 1 и 5 %. Эти величины будут уточнены позднее.

Наблюдаемая стабилизация уровней плотности нейтронов для марковской кинетики обусловлена задержкой на 1 цикл действия коэффициента размножения на предшественники предыдущих циклов. Такая задержка отсутствует в классической кинетике из-за распространения действия скачка на предыдущие предшественники [3], что не соответствует физике ЦЯР. Это приводит к отклонению классической кривой от базовой кривой по Марковской кинетике на 1 % при длительности ЦЯР 2 400 циклов при вводе реактивности  $0,05\beta$ . При вводе реактивности  $0,15\beta$  такое отклонение происходит с 1 000 циклов.

На рис. 2 показаны результаты расчета верхних границ (допустимой длительности ЦЯР) применимости классической кинетики в зависимости от реактивности и отклонений от базовой кинетики (цифровые данные соответствуют точному расчету, данные трендов являются примерными).

Для реактивности ниже  $0,05\beta$  применение классической кинетики практически не ограничивается.

Для реактивности в диапазоне  $0,05\beta$ – $0,15\beta$  границы для теплового реактора находятся в диапазоне 2 400–660 циклов (2,4–0,66 с) для отклонения 1 % от базовой кинетики. Для отклонения 5 % они составляют соответственно 11 000–3 700 циклов (11–3,7 с), для отклонения 10 % они составляют 30 000–7 700 циклов (30–7,7 с).

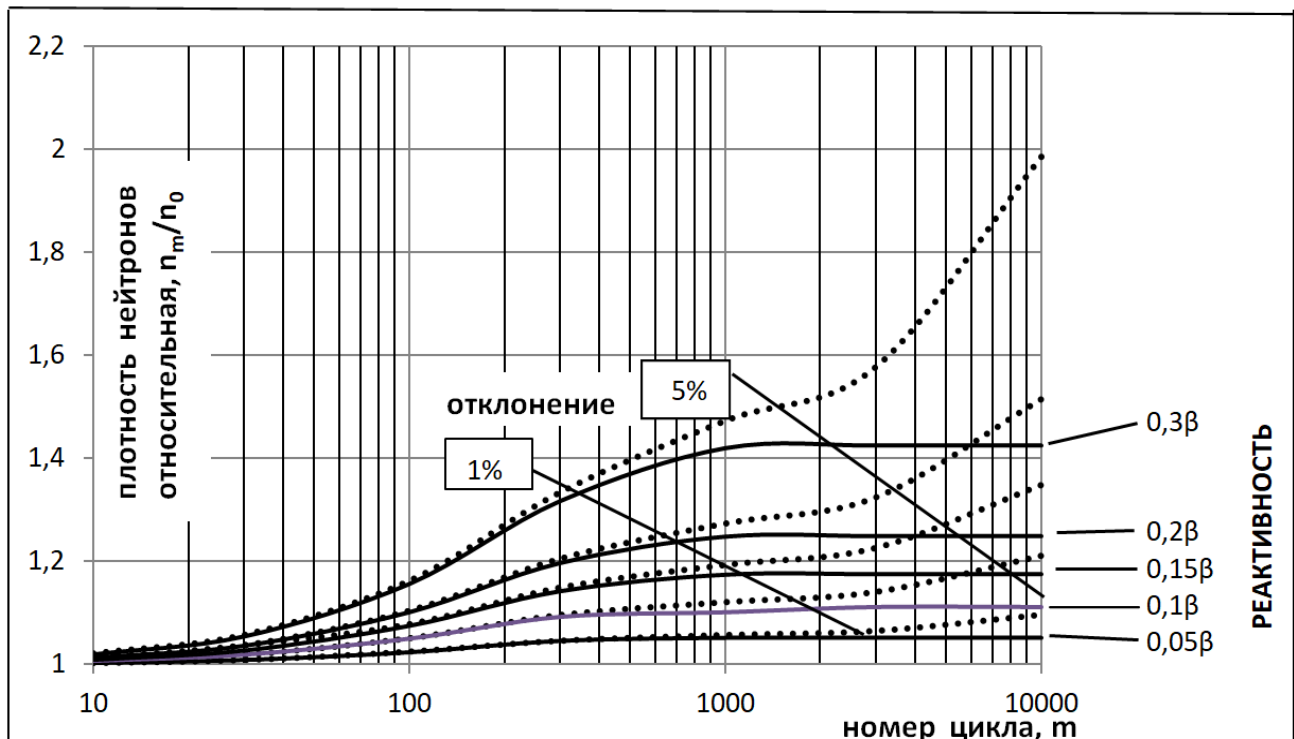


Рис. 1. Отклики плотности нейтронов точечного реактора на ступенчатый ввод положительной реактивности

— марковская кинетика (6)  
 ..... классическая кинетика (7)

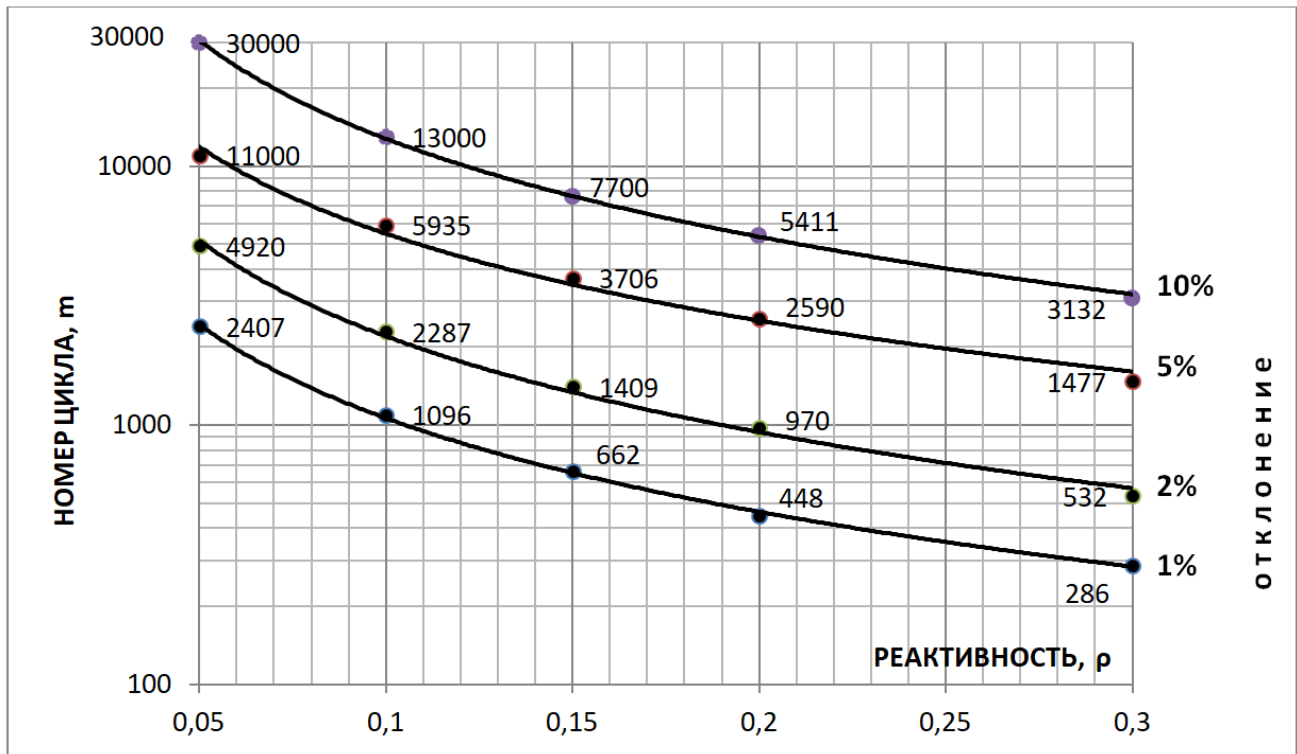


Рис. 2. Верхние границы применимости классической кинетики  $m$  в зависимости от величины вводимой реактивности  $\rho$  и отклонения (%) границ от кинетики марковской ЦЯР

Для реактивности в диапазоне  $0,15\beta$ – $0,3\beta$  границы находятся в диапазоне 660–280 циклов ( $0,66$ – $0,28$  с) соответственно для отклонения 1 %. Для отклонения 5 % они составляют соответственно 3 700–1 500 циклов ( $3,7$ – $1,5$  с), для отклонения 10 % они составляют 7 700–3 100 циклов ( $7,7$ – $3,1$  с).

#### 4. Выводы

1. Цепная ядерная реакция деления соответствует модели марковской цепи событий, что позволило создать точную кинетику ядерного реактора.

2. Высокая точность уравнений марковской кинетики позволила установить следующие границы применимости классической кинетики в зависимости от вводимой реактивности и отклонения от базовой кинетики:

- для реактивности ниже  $0,05\beta$  границы практически отсутствуют;
- для реактивности в диапазоне  $0,05\beta$ – $0,15\beta$  границы находятся в диапазоне 2,4–0,66 с для теплового реактора соответственно для отклонения 1% от базовой кинетики. Для отклонения 5 % они составляют соответственно ( $11$ – $3,7$  с), для отклонения 10 % они составляют 30–7,7 с.
- для реактивности в диапазоне  $0,15\beta$ – $0,3\beta$  границы находятся в диапазоне 0,66–0,28 с соответственно для отклонения 1 %. Для отклонения 5 % они составляют соответственно 3,7–1,5 с, для отклонения 10 % они составляют 7,7–3,1 с.

3. Определена величина  $0,05\beta$  для вводимой реактивности, ниже которой в классической кинетике возможно применить метод разделения переменных координат и времени в функциях плотности нейтронов и запаздывающих нейтронов при выводе основной системы решения уравнений точечного реактора.

4. Установлено, что основным источником поступления запаздывающих нейтронов в цикл являются нераспавшиеся предшественники предыдущих циклов, т. к. их накопление от цикла к циклу (с учетом их расхода в цикле) является несущественным.



## 5. Список литературы

1. *Селезнев, Е. Ф.* Кинетика реакторов на быстрых нейтронах. Под. ред. акад. РАН А. А. Саркисова : Ин-т проблем безопасного развития атомной энергетики РАН. М. : Наука, 2013. – С. 7, 9, 117. – ISBN 978-5-00-0000000-0.
2. *Белл, Д.* Теория ядерных реакторов. / Д. Белл, С. Глесстон; пер. с англ; под ред. В. Н. Артамкина. – М. : Атомиздат, 1974. – С. 6, 7, 38–40, 369, 372.
3. *Хетрик, Д.* Динамика ядерных реакторов. / Д. Хетрик; пер. с англ. – М. : Атомиздат, 1972. – С. 3, 7–9, 11, 19, 35.
4. *Кипин, Дж. Р.* Физические основы кинетики ядерных реакторов / Дж. Р. Кипин; пер. с англ; под ред. В. А. Кузнецова. – М. : Атомиздат, 1967. – С. 299.
5. *Казанский, Ю. А.* Экспериментальные методики физики реакторов. Ю. А. Казанский. – М. Энергоиздат. 1984. – 272 с.
6. *Уолтер, А.* Реакторы-размножители на быстрых реакторах /. – А. Уолтер, А. Рейнольдс. – М. Энергоатомиздат, – 624 с.
7. Динамика ядерных реакторов / Ф. Ф. Колесов, П. А. Леппик, С. П. Павлов [и др.] / под ред. В. В. Шевелева. Ю – М. : Энергоатомиздат, 1990. – 518 с.
8. *Oshkanov, N. N.* On Non-conformity of the Classical Reactor Kinetics to Physics of Chain Reaction / N. N. Oshkanov // SGEM 2018. – V.18. – Iss. 4.1. – P. 39–45. – DOI: 10.593/sgem2018/4.1 – ISBN 978-619-7408-44-7.

### Сведения об авторах:

**Ошканов Николай Николаевич**, к. т. н., профессор, 620049, Екатеринбург, ул. С. Ковалевской, 5, кафедра атомных станций. Эл. почта: [nickolai.oshkanov@yandex.ru](mailto:nickolai.oshkanov@yandex.ru)

**Комарова Ярослава Олеговна**, студентка Уральского федерального университета имени первого Президента России Б. Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

**Михайлова Полина Андреевна**, студентка Уральского федерального университета имени первого Президента России Б. Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

## COMPARATIVE ANALYSIS CLASSICAL KINETICS OF A NUCLEAR REACTOR AND KINETICS OF A MARKOV CHAIN FISSION REACTION

N. N. Oshkanov, Ya. O. Komarova, P. A. Mikhaylova

Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin

*The purpose of the study was to establish the limits of applicability of classical nuclear reactor kinetics, which is an approximation. The representation of the nuclear chain reaction in the form of a Markov chain made it possible to use it for the development of nuclear reactor kinetics. The equations of this kinetics composed and solved have no approximations, which made it possible to accept it as the basic one for determining the applicability limits of classical kinetics for any duration of the chain reaction. The limits of applicability of classical kinetics have been determined. They are absent for a reactivity of  $0.05\beta$ . For a reactivity of  $0.05\beta$ - $0.15\beta$ , the limits are 2.4-0.66 s of chain reaction duration for a deviation of 1% from the basic kinetics. For a deviation of 5% they are 11-3.7 s, for a deviation of 10% they are 30-7.7 s. For a reactivity of  $0.15\beta$ - $0.3\beta$  the limits are 0.66-0.28 s for a deviation of 1%. For deviation 5% they are equal to 3.7-1.5 s, for deviation 10% they are equal to 7.7-3.1 s. The boundary of the input reactivity of  $0.05\beta$ , below which it is possible to apply the method of separation of variables in classical kinetics to derive the basic equations of point reactor kinetics, has been established. In addition, the main reasons for approximate equations and their solutions in classical kinetics have been established.*

**Key words:** applicability limit; kinetics; Markov chain; nuclear chain reaction; nuclear reactor; point reactor.

### References

1. *Seleznev, E. F.*: Kinetics of Fast Neutron Reactors / E. F. Seleznev; Edited by Acad. RAS A. A. Sarkisov : Institute of Problems of Safe Development of Nuclear Power Engineering RAS. M. Nauka, 2013. – P. 7, 9, 117. – ISBN 978-5-00-000000-0.
2. *Bell, D.* Theory of nuclear reactors / D. Bell, S. Glesston; transl. from Engl; ed. by V. N. Artamkin. – Moscow: Atomizdat, 1974. – P. 6, 7, 38–40, 369, 372.
3. *Hetrick, D.* Dynamics of Nuclear Reactors / D. Hetrick; transl. from Engl. – M. : Atomizdat, 1972. – P. 3, 7–9, 11, 19, 35.
4. *Kipin, J. R.* Physical bases of kinetics of nuclear reactors / J. R. Kipin; transl. from English; ed. by V. A. Kuznetsov. – Moscow : Atomizdat, 1967. – P. 299.
5. *Kazanskiy, Yu. A.* Experimental Methods of Reactor Physics / Yu. A. Kazanskiy. – M.: Energoizdat, 1984. – 272 p.
6. *Walter, A.* Fast Breeder Reactors / A. Walter, A. Reynolds. – M.: Energoatomizdat, 1986. – 624 p.
7. Dynamics of Nuclear Reactors / F. F. Kolesov, P. A. Leppik, S. P. Pavlov [et al]; ed. by V. V. Shevelev. – M. : Energoatomizdat, 1990. – 516 p.
8. *Oshkanov, N. N.* On Non-conformity of the Classical Reactor Kinetics to Physics of Chain Reaction / N. N. Oshkanov // SGEM 2018. – V.18. – Iss. 4.1. – P. 39-45. – DOI: 10.593/sgem2018/4.1. – ISBN 978-619-7408-44-7.

## МЕЖДУНАРОДНОЕ ПОДТВЕРЖДЕНИЕ МЕТОДА СЕЛЕКТИВНОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ АЭРОЗОЛЬНОЙ ФОРМЫ И ГАЗООБРАЗНЫХ СОЕДИНЕНИЙ РАДИОАКТИВНОГО ЙОДА В ВЫБРОСАХ РЕАКТОРНОЙ УСТАНОВКИ ВВР-СМ

А. А. Екидин <sup>1</sup>, А. В. Васильев <sup>1</sup>, И. И. Садиков <sup>2</sup>, С. А. Байтелесов <sup>2</sup>, Ф. Р. Кунгуров <sup>2</sup>,  
Д. Д. Тоджибоев <sup>2</sup>, Ш. А. Аликулов <sup>2</sup>

<sup>1</sup> *Институт промышленной экологии Уральского отделения Российской академии наук, Екатеринбург, Россия*

<sup>2</sup> *Институт ядерной физики Академии наук Республики Узбекистан, г. Ташкент, Республика Узбекистан*

*В статье представлены результаты селективной оценки активности аэрозольной формы и газообразных соединений изотопов йода в вентиляционной системе исследовательского ядерного реактора ВВР-СМ. Используемый метод измерения широко применяется на атомных электростанциях, исследовательских и промышленных реакторных установках в России. Международное подтверждение обоснованности выбора алгоритма, средств и способов отбора газовой среды, методов измерения счетных образцов и обработки данных направлено на повышение международного доверия к безопасности как применяемых ядерных технологий, так и к результатам контроля радиационного воздействия. Выполненные экспериментальные исследования подтвердили высокую эффективность очистки (не менее 99,9 %) радиоактивных выбросов исследовательского ядерного реактора ВВР-СМ от аэрозолей <sup>131</sup>I. Удаляемые в атмосферу соединения радиоактивного йода на  $\frac{3}{4}$  представлены трудносорбируемыми органическими соединениями, а на  $\frac{1}{4}$  легкосорбируемым молекулярным йодом.*

**Ключевые слова:** радиоактивный йод; объемная активность; аэрозоль; газообразные соединения; сорбция; пакет фильтров; активированный уголь.

### 1. Введение

Во многих странах мира радиационные и ядерные технологии нашли применение в здравоохранении, энергетике, тяжелой и легкой промышленности, транспорте, образовании, обороне государств. Широкое использование источников радиоактивных и ядерных материалов способствует реализации глобальных целей устойчивого развития путем стимулирования международного взаимодействия, научных исследований, расширения высокотехнологичных рабочих мест [1]. В Концепции развития атомной энергетики в Республике Узбекистан на период 2019–2029 гг. в числе приоритетных направлений предусматривается организация безопасного и экономически эффективного ядерного топливного цикла, обеспечение охраны окружающей среды и радиационной защиты людей при использовании атомной энергии [2]. Дорожная карта по реализации Концепции развития атомной энергетики в Республике Узбекистан предусматривает необходимость дальнейшего развития атомной науки и технологий, с учетом требований по обеспечению безопасности персонала, населения и окружающей среды, на основе накопленных в мире знаний и опыта строительства и эксплуатации АЭС [2].

Многие десятилетия Институтом ядерной физики Академии наук Республики Узбекистан эксплуатируется исследовательский ядерный реактор (ИЯР) ВВР-СМ. Реактор предназначен для проведения исследований по:

- а) ядерной физике;
- б) физике твердого тела и радиационному материаловедению;
- в) нейтронной физике;
- г) радиационной биологии;

- д) радиационной химии;
- е) активационному анализу элементного состава веществ;
- ж) производству радиоактивных изотопов.

Безопасность эксплуатации ядерного реактора ВВР-СМ подтверждается постоянным контролем радиационной обстановки. Существующие системы радиационного контроля ИЯР, инженерные и организационные меры позволяют минимизировать радиационное воздействие до пренебрежимо малых значений. В рамках радиационного контроля осуществляется мониторинг выбросов радиоактивных веществ в атмосферный воздух, который является обязательным для обеспечения гарантий радиационной безопасности для населения и окружающей среды [3].

Исследовательский реактор ВВР-СМ – реактор бассейнового типа с использованием в качестве замедлителя, теплоносителя и верхней защиты обычной воды (дистиллята). На реакторе ВВР-СМ используются тепловыделяющие сборки (ТВС) типа ИРТ-4М с низким обогащением по  $^{235}\text{U}$  (до 19,7 %). В процессе деления ядерного материала в топливе образуются сотни радиоактивных изотопов, в число которых входят изотопы йода с массовыми числами от 115 до 141. При нормальной эксплуатации ИЯР часть радиоизотопов, включая изотопы йода, из топливных элементов могут поступать в теплоноситель, а далее в вентиляционную систему и систему очистки выбросов. В теплоносителе и газовой среде вентиляционной системы изотопы йода претерпевают различные физико-химические превращения, в результате которых в источниках выбросов радиоактивный йод может присутствовать в аэрозольной форме или в виде органических и неорганических газообразных соединений [4]. После очистки не представляющие угрозу для окружающей среды и человека радиоактивные вещества выбрасываются в атмосферный воздух.

МАГАТЭ рассматривает  $^{131}\text{I}$  и  $^{133}\text{I}$  как важные факторы воздействия на окружающую среду при эксплуатации АЭС [5]. В ряде исследований показано, что выбросы  $^{131}\text{I}$  формируют не менее 1 % вклада в суммарную годовую дозу облучаемых лиц [6, 7]. Существуют значимые различия в интенсивности выброса радиоактивного йода реакторными установками различного типа [8, 9]. Общая закономерность – чем меньше барьеров безопасности, тем выше уровни выброса радиоактивных веществ в атмосферу.

Применяемая Институтом ядерной физики автоматическая система радиационного контроля «Пеликан» позволяет вести непрерывный контроль за объемной активностью альфа- и бета-радиоактивных аэрозолей в воздухе рабочих помещений и в системе вентиляции, а также за содержанием бета-излучающих газов в воздухе контролируемых рабочих мест. Использование аэрозольных фильтров ФВЭА-3500-2/Ф и йодных фильтров ФАИ-2000-1Е дает возможность определять интегральное значение объемной активности радиоактивных изотопов йода в аэрозольной и газообразной форме. С помощью таких подходов можно оценить радиационное воздействие выбросов йода. В отсутствие информации о форме и соединениях происходит завышение расчетных доз облучения населения: от аэрозолей  $^{131}\text{I}$  в среднем в 2,5 раза; от органических соединений  $^{131}\text{I}$  в среднем в 1,3 раза. Кроме того, отсутствие данных о составе форм и соединений радиоактивного йода приводит к существенному завышению объемной активности  $^{131}\text{I}$  в местах максимального радиационного воздействия, т. к. для элементарного йода ( $\text{I}_2$ ) скорость сухого осаждения на два порядка выше, чем для йода в форме органических соединений, и в 2,5 раза выше, чем для содержащих йод аэрозолей. Аналогичная ситуация характерна для вымывания  $\text{I}_2$  с осадками, которое на два порядка выше, чем для йода в форме органических соединений, и в 4 раза выше, чем для содержащих йод аэрозолей. Обоснованно отойти от консервативного завышения облучения от выбросов  $^{131}\text{I}$  позволяет селективное определение аэрозольной формы и газообразных соединений радиоактивного йода в выбросах реакторной установки ВВР-СМ. Такую возможность дает уникальный метод измерения объемной активности йода, разработанный специально для контроля выбросов атомными станциями и

успешно применяемый на ряде исследовательских и промышленных реакторов в России [10–13].

Выполненные совместные исследования Института промышленной экологии УрО РАН и Института ядерной физики АН РУз показали техническую возможность реализации метода одновременного селективного определения аэрозольной формы и основных газообразных соединений изотопов йода в выбросах исследовательского ядерного реактора ВВР-СМ.

## 2. Материалы и методы

В представляемой работе для одновременного селективного определения аэрозолей и газообразных соединений йода в источнике выброса применялся пакет, состоящий из аэрозольного и угольных фильтров. Выбор метода определения  $^{131}\text{I}$  в выбросах ядерной установки определяется содержанием данного радиоактивного изотопа в газовой среде выброса. Ожидаемая средняя массовая концентрация йода в выбросах ядерных реакторов не превышает  $10^{-11}$  нг/л, что делает невозможным применение аналитических способов определения физико-химических форм. В представленной работе определение  $^{131}\text{I}$  в счетном образце выполнялось с помощью гамма-спектрометрической установки с детектором из особо чистого германия. В качестве счетных образцов использовались аэрозольный и угольные фильтры.

При отборе проб воздуха сформированным пакетом фильтров применялась следующая схема размещения фильтров:

- первым по направлению потока устанавливается аэрозольный фильтр типа АФА-РМП;

- после аэрозольного фильтра устанавливается набор из 5 или 7 угольных фильтров с одинаковым содержанием сорбирующего материала.

Выбранный метод и средства селективного определения аэрозолей и газообразных соединений йода основывается на трех различных свойствах фильтрации форм и соединений йода через различные фильтрующие и сорбирующие материалы:

1. Аэрозольный фильтр АФА-РМП не улавливает молекулярный и органический газообразный  $^{131}\text{I}$ , но полностью улавливает аэрозольную фракцию  $^{131}\text{I}$  [14].

2. Первый фильтр набора угольных фильтров не содержит аэрозоли йода, но полностью улавливает молекулярную фракцию йода (неорганическое газообразное соединение йода) и частично улавливает газообразные органические соединения йода [10].

3. Фильтры со второго по седьмой из набора угольных фильтров не содержат  $^{131}\text{I}$  в форме аэрозолей и неорганического газообразного соединения йода, но улавливают органические соединения йода [10].

Первое из перечисленных свойств позволяет легко установить активность аэрозольной формы  $^{131}\text{I}$ . Третье свойство позволяет определить:

- распределение органического йода в наборе угольных фильтров;

- на основе полученного распределения органического йода в наборе угольных фильтров рассчитать активность соединений неорганического и органического  $^{131}\text{I}$  на первом угольном фильтре;

- рассчитать активность органического  $^{131}\text{I}$  на всех фильтрах набора;

- учесть неуловленную набором угольных фильтров долю органического  $^{131}\text{I}$ .

Для выполнения экспериментальных исследований подготовленный описанным образом пакет фильтров устанавливался в пробоотборный стенд вентиляционной системы для улавливания соединений йода в газовой смеси выброса реакторной установки ВВР-СМ. Основные параметры, фиксируемые при отборе пробы:

– расход газоаэрозольной смеси через установленный пакет фильтров в течение времени экспонирования, л/мин;

– начало установки и время снятия пакета фильтров для определения продолжительности экспонирования (отбор пробы), мин.

После отбора проб газовой среды на каждом фильтре из использованного пакета фильтров гамма-спектрометрическим способом определялась активность  $^{131}\text{I}$ . Для обработки результатов эксперимента все измеренные значения активности  $^{131}\text{I}$  на каждом фильтре  $n$  (далее  $A_n$ ) были приведены к моменту окончания отбора пробы (далее  $A_n$ ) с учетом распада радиоактивного йода в процессе отбора пробы (далее  $p_1$ ) и распада радиоактивного йода после отбора пробы до начала измерения активности (далее  $p_2$ ). Измеренные значения активности приводились к активности на момент окончания отбора с учетом постоянной распада  $^{131}\text{I}$  по формуле:

$$A_n = A_n^{\text{измерен}} \cdot p_1 \cdot p_2, \text{ Бк}, \quad (1)$$

где  $p_1$  – поправка на распад радиоактивного  $^{131}\text{I}$  в процессе отбора пробы,

$$p_1 = ((0,693 \cdot t_1) / T_{1/2}) / (1 - \exp(-(0,693 \cdot t_1) / T_{1/2})), \quad (2)$$

где  $t_1$  – продолжительность процесса отбора пробы, мин;

$p_2$  – поправка на распад радиоактивного  $^{131}\text{I}$  после отбора пробы до начала измерений,

$$p_2 = \exp((0,693 \cdot t_2) / T_{1/2}), \quad (3)$$

где  $t_2$  – период времени с окончания отбора пробы до начала измерений, мин;

$T_{1/2}$  – период полураспада  $^{131}\text{I}$ , мин.

Суммарная активность  $^{131}\text{I}$  (далее  $A_{\text{йод}}$ ) на всех фильтрах пакета состоит из активности аэрозольной формы, неорганической и органических соединений  $^{131}\text{I}$ :

$$A_{\text{йод}} = A_{\text{аэрозоль}} + A_{\text{молек}} + A_{\text{орг}}, \text{ Бк}, \quad (4)$$

где  $A_{\text{аэрозоль}}$  – активность  $^{131}\text{I}$  в форме аэрозолей, Бк;

$A_{\text{молек}}$  – активность  $^{131}\text{I}$  в форме легкосорбируемых соединений (неорганический йод), Бк;

$A_{\text{орг}}$  – активность  $^{131}\text{I}$  в форме трудносорбируемых соединений (органические соединения йода), Бк.

На фильтре 0 происходит полное осаждение аэрозолей  $^{131}\text{I}$ , но не происходит удержание молекулярной и органической фракций  $^{131}\text{I}$ . Поэтому справедливо равенство:

$$A_0 = A_{\text{аэрозоль}}. \quad (5)$$

На фильтре 1 происходит полное осаждение молекулярной фракции и частичное осаждение органической фракции  $^{131}\text{I}$ . Измеренное значение активности  $^{131}\text{I}$  на фильтре 1 включает активность молекулярной фракции  $A_{\text{молек}}$  и активность органической  $A_{\text{орг}}$  фракции  $^{131}\text{I}$ :

$$A_1 = A_{\text{молек}} + A_{1\text{орг}}, \quad (6)$$

где  $A_1$  – результат измерения активности  $^{131}\text{I}$  на угольном фильтре 1, Бк;

$A_{\text{молек}}$  – активность молекулярного  $^{131}\text{I}$  на угольном фильтре 1, Бк;

$A_{1\text{орг}}$  – активность органического  $^{131}\text{I}$  на угольном фильтре 1, Бк.

Для расчета активности молекулярной фракции  $^{131}\text{I}$  необходимо определить активность органического  $^{131}\text{I}$  на угольном фильтре 1.

Распределение активности органической фракции радиоактивного йода в последовательности угольных фильтров описывается экспоненциальным уравнением:

$$A_{\text{орг } n} = B_{\text{орг}} \cdot \exp(-\lambda_{\text{орг}} \cdot n), \quad (7)$$

где  $A_{орг\ n}$  – активность трудносорбируемых соединений йода на фильтре  $n$  в пакете, Бк;

$B_{орг}$  – показатель доли трудносорбируемой фракции йода, Бк;

$\lambda_{орг}$  – показатель скорости гетерогенной реакции трудносорбируемой фракции йода, безразмерный;

$n$  – порядковый номер ( $n \geq 1$ ) сорбирующего фильтра в пакете.

Значения параметров  $B_{орг}$  и  $\lambda_{орг}$  экспоненциальной зависимости (7), описывающей распределение активности трудносорбируемой фракции радиоактивного йода в наборе угольных фильтров, могут быть рассчитаны методом наименьших квадратов по результатам измерения активности со 2 по 7 угольный фильтр. Активность на первом угольном фильтре ( $A_1$ ) исключается из расчета, т. к. кроме трудносорбируемой фракции этот фильтр может содержать и легкосорбируемую.

На основании выражения (7) рассчитанные численные значения параметров  $B_{орг}$  и  $\lambda_{орг}$  позволяют определить  $A_{1орг}$  при  $n = 1$ . Тогда  $A_{молек}$  определяется из выражения (6):

$$A_{молек} = A_1 - A_{1орг}. \quad (8)$$

Установленные значения параметров  $B_{орг}$  и  $\lambda_{орг}$  позволяют определить активность трудносорбируемой фракции йода с учетом неизмеренного количества органической формы йода, не уловленной пакетом фильтров:

$$A_{орг} = \frac{B_{орг}}{\exp(\lambda_{орг}) - 1}. \quad (9)$$

В ходе исследований возможны различные варианты распределения активности  $^{131}\text{I}$  на аэрозольном фильтре и наборе угольных фильтров. В случае когда активность  $^{131}\text{I}$  на всех фильтрах пакета ниже порога измерения, расчет фракций радиоактивного йода не производится. Если активность  $^{131}\text{I}$  зафиксирована только на аэрозольном фильтре, а на наборе угольных фильтров ниже порога измерения, то принимается отсутствие газообразных форм йода.

Возможна ситуация, при которой активность  $^{131}\text{I}$  зафиксирована на аэрозольном фильтре 0 и угольном фильтре 1, а на последующих угольных фильтрах ниже порога измерения. В этом случае определение активности аэрозольной и газообразной фракций выполняется следующим образом:

$$A_{аэрозоль} = A_0, \quad (10)$$

$$A_{молек} = A_1 - A_{1орг} = A_1 - k \cdot A_2, \quad (11)$$

$$A_{орг} = A_{1орг} + A_2, \quad (12)$$

$$A_{1орг} = k \cdot A_2, \quad (13)$$

где  $A_0$  – результат измерения активности  $^{131}\text{I}$  на аэрозольном фильтре 0, Бк;

$A_1$  – результат измерения активности  $^{131}\text{I}$  на угольном фильтре 1, Бк;

$A_2$  – результат измерения активности  $^{131}\text{I}$  на угольном фильтре 2, Бк;

$A_{орг}$  – рассчитанная активность органической фракции  $^{131}\text{I}$  в исследуемом воздухе, Бк;

$A_{1орг}$  – активность органического  $^{131}\text{I}$  на угольном фильтре 1, Бк.

$k$  – коэффициент эффективности сорбции органической формы  $^{131}\text{I}$  относительно молекулярной, консервативно принимается равным 2.

Если активность  $^{131}\text{I}$  выше порога измерения на аэрозольном фильтре 0, угольных фильтрах 1, 2 и 3 (возможно, на фильтрах 4–6), а на последнем (их) ниже порога измерения, в этом случае в выбросах присутствуют аэрозоли  $^{131}\text{I}$ , молекулярные и органические формы  $^{131}\text{I}$ . Все фракции газообразного йода полностью уловлены аналитическими фильтрами. Оценка активности аэрозольной, молекулярной и органической фракций йода проводится согласно выражениям (5) – (9).

Ситуация, когда активность  $^{131}\text{I}$  ниже порога измерения на аэрозольном фильтре 0, но выше порога измерения на всех или отдельных угольных фильтрах 1–7, является разновидностью рассмотренных выше.

### 3. Результаты и обсуждение

Для тестирования возможности исследования форм нахождения радиоактивного йода в газовой среде источника выброса при нормальной эксплуатации исследовательского ядерного реактора ВВР-СМ выполнен отбор проб из системы вентиляции. Отбор проб осуществлялся на пакет фильтров. Пакет фильтров помещался в стандартный фильтродержатель, установленный в штатный пробоотборный стенд системы постоянного радиационного контроля Института ядерной физики. Расход воздуха через пакет фильтров составил 27 л/мин. Продолжительность отбора составила 20,25 ч, или 1215 мин. Поправка на распад за счет продолжительности отбора пробы ( $p_1$ ), согласно выражению (2), составила 1,094.

Измерение активности  $^{131}\text{I}$  на каждом фильтре выполнялось с помощью гамма-спектрометрической установки детектором из особо чистого германия. Время набора спектра составляло 15 мин. Поправка на распад за счет времени после отбора пробы до начала измерений ( $p_2$ ), согласно выражению (3), составила от 1,001 для фильтра 0 до 1,017 для фильтра 7. Распределение активности  $^{131}\text{I}$  на аэрозольном и угольных фильтрах пакета представлено на рис. 1.

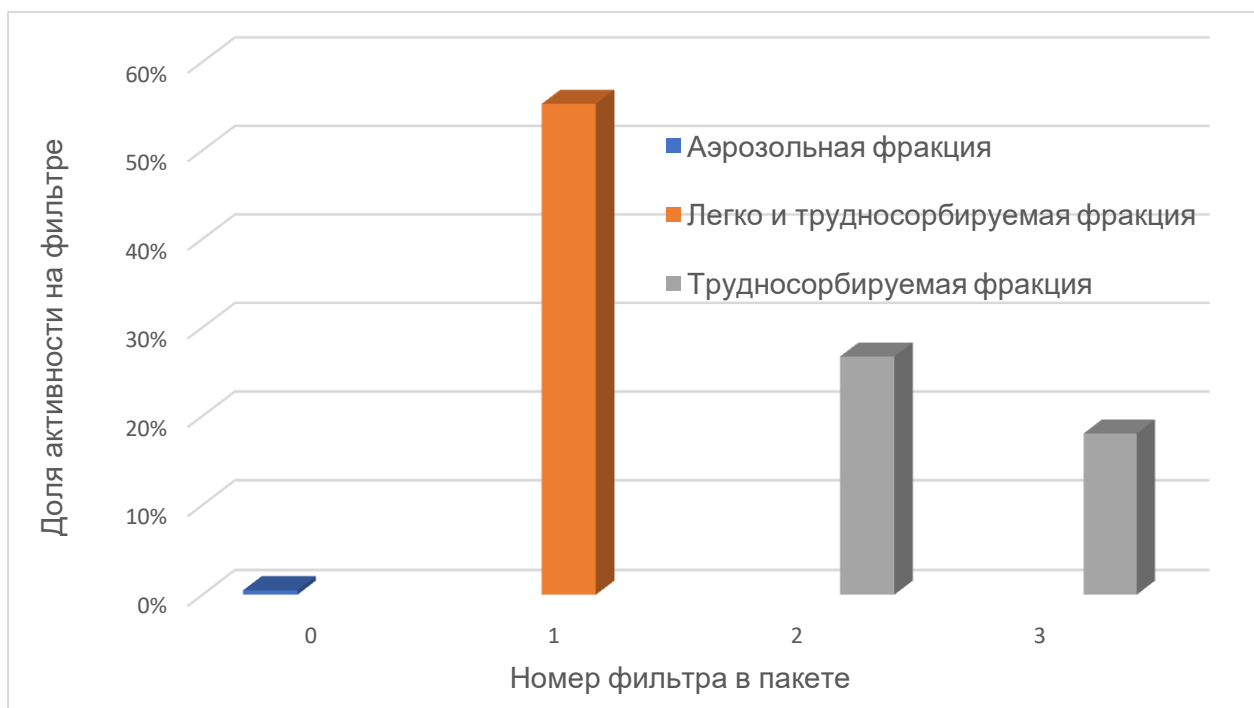


Рис. 1. Распределение активности  $^{131}\text{I}$  на отдельных фильтрах в пакете

В ходе тестовых исследований не обнаружена аэрозольная фракция  $^{131}\text{I}$ , что указывает на высокую эффективность работы системы очистки радиоактивных выбросов исследовательского ядерного реактора ИВВ-СМ. Вся активность, уловленная пакетом фильтров, обусловлена газообразными соединениями радиоактивного йода  $A_{\text{молек}}$  и  $A_{\text{орг}}$ .

По результатам измерения активности на угольных фильтрах 2 и 3 методом наименьших квадратов определены численные значения параметров  $V_{\text{орг}}$  и  $\lambda_{\text{орг}}$  экспоненциальной зависимости (7):  $V_{\text{орг}} = 682,01$ ;  $\lambda_{\text{орг}} = 0,394$ . Таким образом, в тестовом эксперименте распределение органической фракции  $^{131}\text{I}$  по угольным фильтрам описывается экспоненциальным выражением:



$$A_{орг n} = 682,01 \cdot \exp(-0,394 \cdot n). \quad (14)$$

Выражение (14) позволяет рассчитать вклад органической фракции на угольном фильтре 1 (при  $n = 1$ ) и оценить долю молекулярного йода на данном фильтре. В результате проведенных расчетов установлено, что доля молекулярной фракции составила 24 % суммарной активности  $^{131}\text{I}$  на всем пакете фильтров, а доля органического йода 76 % соответственно.

Согласно полученным экспериментальным данным и проведенным расчетам установлено, что в период отбора проб в выбросах радиоактивных веществ ядерного реактора ВВР-СМ весь  $^{131}\text{I}$  был представлен газообразными соединениями, большая часть которых (почти 3/4) представлена в форме органических соединений, до 76%. Почти четверть всей активности  $^{131}\text{I}$  в выбросах представлена легкосорбируемым молекулярным йодом. Аэрозольная форма практически отсутствует.

Полученные данные согласуются с результатами подобных исследований выбросов исследовательского ядерного реактора бассейнового типа ИВВ-2М, в которых показано, что в газовой среде вентиляционной системы до очистки выброса радиоактивные изотопы йода находятся преимущественно в виде газообразных соединений. Соотношение объемной активности органических соединений, молекулярного соединения и аэрозолей  $^{131}\text{I}$  – 29 %, 63 % и 8 % соответственно [15]. Преимущественно газообразная форма эмиссии йода из теплоносителя в систему вентиляции показана в исследованиях газоаэрозольной смеси выброса промышленной реакторной установки водо-водяного типа. Соотношение объемной активности трудносорбируемых, легкосорбируемых соединений и аэрозолей  $^{131}\text{I}$  – 99,45 %; 0,46 % и 0,09 % соответственно [13]. В обоих случаях предполагается, что поступающий из топлива йод в аэрозольной форме в подавляющем количестве осаждается в технологических полостях либо связывается теплоносителем реакторных установок. В результате радиоактивный йод из активной зоны в системе вентиляции представлен преимущественно в виде наиболее летучих газообразных соединений. Подобный механизм поступления из активной зоны в систему вентиляции, вероятно, характерен и для исследуемого реактора ВВР-СМ. С учетом результатов исследований на ИВВ-2М и промышленного реактора обоснованно предположить, что на очистную установку ВВР-СМ радиоактивный йод поступает в форме газообразных соединений. Возможная доля активности йода в форме аэрозолей полностью улавливается системой очистки, а часть газообразных соединений, преимущественно трудносорбируемых в форме органических газообразных соединений, способна преодолеть сорбирующий материал очистной установки.

#### 4. Выводы

Результаты тестирования методики одновременного определения аэрозольной и газообразных фракций радиоактивного йода в источнике выброса показали, что существующая приборная база в Институте ядерной физики Академии наук Узбекистана позволяет полностью реализовать методический подход без привлечения дополнительного оборудования.

В тестовом эксперименте продолжительность отбора пробы (20 ч) выбиралась на основе опубликованных данных по аналогичному исследовательскому реактору, где интервал отбора более 5 ч обеспечивал улавливание активности  $^{131}\text{I}$  всеми фильтрами в пакете значительно выше, чем нижний порог измерения. Выполненный эксперимент подтверждает наблюдение, отмеченное выше, о специфичности уровней выбросов радиоактивного йода даже для однотипных ядерных реакторов. При планировании последующих аналогичных экспериментов потребуется кратно увеличить период отбора проб и протестировать угольные фильтры с большим количеством сорбирующего материала. Применение в последующих аналогичных экспериментах угольных фильтров с большим количеством сорбирующего материала позволит

оценить однородность органических соединений йода в выбросах ядерного реактора ВВР-СМ.

Выполненный пробный эксперимент напрямую демонстрирует высокую эффективность очистки (не менее 99 %) радиоактивных выбросов исследовательского ядерного реактора ВВР-СМ от аэрозолей  $^{131}\text{I}$ . Такой вывод сделан на основании отсутствия активности  $^{131}\text{I}$  на аэрозольном фильтре, применяемого в исследованиях пакета фильтров. Для подтверждения данного вывода целесообразно продолжение экспериментальных исследований, охватывающих различные режимы работы ядерного реактора.

## 5. Благодарности

Авторский коллектив благодарит всех сотрудников Института ядерной физики Академии наук Республики Узбекистан, участвовавших в проведении экспериментального подтверждения метода селективного определения аэрозольной формы и газообразных соединений радиоактивного йода в выбросах реакторной установки ВВР-СМ.

## 6. Список литературы

1. Цели устойчивого развития ООН. Интернет ресурс <https://www.un.org/sustainabledevelopment/ru/sustainable-development-goals> (дата обращения: 10.03.2023).
2. Об утверждении концепции развития атомной энергетики в республике Узбекистан на период 2019 – 2029 годов. Постановление Президента Республики Узбекистан, ПП-4165 от 07.02.2019. Ташкент, 2019.
3. Regulatory Control of Radioactive Discharges to the Environment. GENERAL Safety guide. IAEA Safety Standards Series No. GSG-9. International Atomic Energy Agency, Vienna, 2018.
4. Кулюхин, С. А. Фундаментальные и прикладные аспекты химии радиоактивного йода в газовой и водной средах / С. А. Кулюхин // Успехи химии. – 2012. – Т. 81, № 10. – С. 960 – 982. – EDN: PDCDZL.
5. INPRO Methodology for Sustainability Assessment of Nuclear Energy Systems: Environmental Impact of Stressors. IAEA Nuclear Energy Ser. No. NG-T-3.15. International Atomic Energy Agency, Vienna: IAEA, 2016.
6. Ekidin, A. A. Identification of the main dose-forming radionuclides in NPP emissions / A. A. Ekidin, M. V. Zhukovskii, M. E. Vasyanovich // Atomic Energy. – 2016. – Vol. 120, № 2. – P. 134–137. – DOI: 10.1007/s10512-016-0107-x. EDN: WWGFLD.
7. Special monitoring results for determination of radionuclide composition of Russian NPP atmospheric releases / M. Vasyanovich, A. Vasilyev, A. Ekidin [et al.] // Nuclear Engineering and Technology. – 2019. – Vol. 51, № 4. – P. 1176-1179. – DOI: 10.1016/j.net.2019.02.010. EDN: AGNBFM.
8. Radioiodine release into the atmosphere during normal operation of nuclear power plants / A. A. Ekidin, K. L. Antonov, M. E. Vasyanovich [et al.] // Radiochemistry. – 2019. – Vol. 61, № 3. – P. 352–364. – DOI: 10.1134/S1066362219030111. EDN: GOEIUC.
9. Ekidin, A. A. Estimation of the specific activity of iodine release to comply with the base principle of INPRO methodology for PWR, BWR NPP / A. A. Ekidin, K. L. Antonov, A. V. Nazarovich // Atomic Energy. – 2022. – Vol. 131, № 5. – P. 291–297. – DOI: 10.1007/s10512-022-00881-5. EDN: RSGZEI.
10. Совершенствование методов контроля йода-131 в выбросах атомных станций / А. А. Екидин, М. Е. Васянович, И. А. Капустин, И. Ю. Филатов // Вопросы радиационной безопасности. – 2016. – № 3 (83). – С. 17–24. EDN: WTPQXJ.
11. Определение радионуклидного состава и оценка доз облучения населения за счет атмосферных выбросов российских АЭС / А. А. Екидин, М. Е. Васянович, А. В. Васильев [и др.] // Траектория исследований – человек, природа, технологии. – 2022. – № 2 (2). – С. 53–63. – DOI: 10.56564/27825264\_2022\_2\_53. EDN: YYWYPO.

12. Determination of the physicochemical forms of iodine isotopes in the IVV-2M reactor ventilation system / A. A. Ekidin, M. E. Vasyanovich, D. V. Markov [et al.] // Atomic Energy. – 2017. – Vol. 121, № 4. – P. 308–311. – DOI: 10.1007/s10512-017-0203-6. EDN: XMNORR.
13. *Никитенко, Е. И.* Учет физико-химических форм йода-131 для определения радиационного воздействия выбросов при нормальной эксплуатации промышленной реакторной установки на ФГУП «ПО «МАЯК» / Е. И. Никитенко, Н. Н. Ромадов, М. Д. Пышкина // АНРИ. – 2020. – № 4 (103). – С. 46–54. – DOI: 10.37414/2075-1338-2020-103-4-46-54. EDN: EUWFNF.
14. *Филатов, Ю. Н.* Электроформование волокнистых материалов (ЭФВ-процесс) / Ю. Н. Филатов; // под ред. В. Н. Кириченко. – М. : Нефть и газ, 1997. – 298 с.
15. Контроль аэрозольной формы и газообразных соединений изотопов йода в вентиляционной системе реакторной установки ИВВ-2М / А. А. Екидин, М. Е. Васянович, К. Л. Антонов [и др.] // Ядерная физика и инжиниринг. – 2017. – Т. 8, № 6. – С. 563-569. – DOI: 10.1134/S2079562917050062. EDN: MGHKNV.

### Сведения об авторах:

**Екидин Алексей Акимович**, к. ф.-м. н., ведущий научный сотрудник, лауреат премии Правительства РФ в области науки и техники за 2021 год, Институт промышленной экологии УрО РАН, Россия, Екатеринбург. Эл. почта: [ekidin@mail.ru](mailto:ekidin@mail.ru).

**Васильев Алексей Владимирович**, к. т. н., заведующий лабораторией Института промышленной экологии УрО РАН, ул. Софьи Ковалевской, 20 а, Екатеринбург.

**Садиков Илхам Исмаилович**, д. т. н., директор Института ядерной физики Академии наук Республики Узбекистан.

**Байтелесов Сапар Акимович**, д. т. н., ведущий научный сотрудник, Институт ядерной физики Академии наук Республики Узбекистан.

**Кунгуров Фахрулла Рахматуллаевич**, д. т. н., заведующий лабораторией физики ядерных реакторов, Институт ядерной физики Академии наук Республики Узбекистан.

**Тоджибоев Давронбек Давлаталиевич**, докторант, Институт ядерной физики Академии наук Республики Узбекистан.

**Аликулов Шерали Абдусаломович**, к. ф.-м. н., старший научный сотрудник, Институт ядерной физики Академии наук Республики Узбекистан.

## INTERNATIONAL VALIDATION OF THE SELECTIVE DETERMINATION METHOD OF AEROSOL FORM AND GASEOUS COMPOUNDS OF RADIOACTIVE IODINE IN WWR-CM

A. A. Ekinin<sup>1</sup>, A. V. Vasiliev<sup>1</sup>, I. I. Sadikov<sup>2</sup>, S. A. Baitelesov<sup>2</sup>, F. R. Kungurov<sup>2</sup>,  
D. D. Todzhiboev<sup>2</sup>, Sh. A. Alikulov<sup>2</sup>

<sup>1</sup> *Institute of Industrial Ecology, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg*

<sup>2</sup> *Institute of nuclear physics Academy of sciences of the Republic of Uzbekistan, Tashkent*

*The results of a selective assessment of the activity of aerosol form and gaseous iodine isotopes compounds in the ventilation system of the research nuclear reactor WWR-CM are presented. The measurement method used is widely applied in nuclear power plants, research and industrial reactor installations in Russia. The international validation of the justification of the choice of the algorithm, means and methods of selection of the gas-air environment, methods of measuring counting samples and data processing is aimed at increasing international confidence in the safety of both applied nuclear technologies and the results of radiation exposure control. The performed experimental studies have confirmed the high efficiency of purification (at least 99.9%) of radioactive emissions of the research nuclear reactor WW-CM from aerosols <sup>131</sup>I. Radioactive iodine compounds removed into the atmosphere are represented by ¾ difficult-to-sort organic compounds, and ¼ by easily sortable molecular iodine.*

**Key words:** radioactive iodine; volumetric activity; aerosol; gaseous compounds; sorption; filter pack; activated carbon.

### References

1. Sustainable development goals UN. Available at: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/ru/sustainable-development-goals> (Accessed: 10.03.2023).
2. Ob utverzhdenii koncepcii razvitiya atomnoj energetiki v respublike Uzbekistan na period 2019 – 2029 godov. Postanovlenie Prezidenta Respubliki Uzbekistan, PP-4165 ot 07.02.2019. Tashkent, 2019 (in Russian).
3. Regulatory Control of Radioactive Discharges to the Environment. GENERAL Safety guide. IAEA Safety Standards Series No. GSG-9. International Atomic Energy Agency, Vienna, 2018.
4. Kulyukhin, S. A. Fundamental and applied aspects of the chemistry of radioactive iodine in gas and aqueous media / S. A. Kulyukhin // Russian chemical reviews. – 2012. – V. 81, № 10. – P. 960 – 982. – EDN: PDCDZL.
5. INPRO Methodology for Sustainability Assessment of Nuclear Energy Systems: Environmental Impact of Stressors. IAEA Nuclear Energy Ser. No. NG-T-3.15. International Atomic Energy Agency, Vienna: IAEA, 2016.
6. Ekinin, A. A. Identification of the main dose-forming radionuclides in NPP emissions / A. A. Ekinin, M. V. Zhukovskii, M. E. Vasyanovich // Atomic Energy. – 2016. – Vol. 120, № 2. – P. 134–137. – DOI: 10.1007/s10512-016-0107-x. EDN: WWGFLD.
7. Special monitoring results for determination of radionuclide composition of Russian NPP atmospheric releases / M. Vasyanovich, A. Vasilyev, A. Ekinin [et al.] // Nuclear Engineering and Technology. – 2019. – Vol. 51, № 4. – P. 1176-1179. – DOI: 10.1016/j.net.2019.02.010. EDN: AGNBFM.
8. Radioiodine release into the atmosphere during normal operation of nuclear power plants / A. A. Ekinin, K. L. Antonov, M. E. Vasyanovich [et al.] // Radiochemistry. – 2019. – Vol. 61, № 3. – P. 352–364. – DOI: 10.1134/S1066362219030111. EDN: GOEIUC.
9. Ekinin, A. A. Estimation of the specific activity of iodine release to comply with the base principle of INPRO methodology for PWR, BWR NPP / A. A. Ekinin, K. L. Antonov, A. V. Nazarovich // Atomic Energy. – 2022. – Vol. 131, № 5. – P. 291–297. – DOI: 10.1007/s10512-022-00881-5. EDN: RSGZEI.

10. Improvement of iodine-131 monitoring methods in nuclear power plant releases / A. A. Ekinin, M. E. Vasyanovich, I. A. Kapustin, I. Yu. Filatov // Journal of radiation safety issues. – 2016. – № 3 (83). – P. 17–24. EDN: WTPQXJ.
11. Determination of radionuclide composition of the Russian NPPs atmospheric releases and dose assessment to population / A. A. Ekinin, M. E. Vasyanovich, A. V. Vasilyev [et al.] // Traektoriya issledovaniy – chelovek, priroda, tehnologii. – 2022. – № 2 (2). – P. 53–63. – DOI: 10.56564/27825264\_2022\_2\_53. EDN: YYWYPO.
12. Determination of the physicochemical forms of iodine isotopes in the IVV-2M reactor ventilation system / A. A. Ekinin, M. E. Vasyanovich, D. V. Markov [et al.] // Atomic Energy. – 2017. – Vol. 121, № 4. – P. 308–311. – DOI: 10.1007/s10512-017-0203-6. EDN: XMNORR.
13. *Nikitentko, E. I.* Determination of radiation exposure to iodine-131 emissions during normal operation of the industrial reactor installation at fsue «PO MAYAK» taking into account physical and chemical forms / E. I. Nikitenko, N. N. Romadov, M. D. Pyshkina // ANRI. – 2020. – № 4 (103). – P. 46–54. – DOI: 10.37414/2075-1338-2020-103-4-46-54. EDN: EUWFNF.
14. *Filatov, Yu. N.* Elektroformovanie voloknistykh materialov (EFV-process) / Yu. N. Filatov; V. N. Kirichenko (Eds.) – M. : Neft' i gaz, 1997. – 298 p.
15. Control of aerosol and gaseous compounds of iodine isotopes in the ventilation system of the IVY-2M reactor facility/ A. A. Ekinin, M. E. Vasyanovich, K. L. Antonov [et al.] // Nuclear physics and engineering. – 2017. – V. 8, № 6. – P. 563-569. – DOI: 10.1134/S2079562917050062. EDN: MGHKNV.

## ВЗВЕШЕННЫЙ ИНДЕКС КАЧЕСТВА ВОДЫ В ЭКОЛОГИЧЕСКОМ МОНИТОРИНГЕ ЗОНЫ ВЛИЯНИЯ ГОРНОГО ПРЕДПРИЯТИЯ

А. Н. Медведев, М. А. Медведев

*Институт промышленной экологии УрО РАН, Екатеринбург, Россия*

*Статья посвящена вопросам адаптации и опробования широко применяемого в мире Взвешенного индекса качества воды WQI, который представляет собой перспективный инструмент при экспедиционной оценке качества природной воды и который поможет эффективно решить актуальную задачу обеспечения общественности и заинтересованных организаций информацией о загрязненности водных объектов. Для адаптации индекса WQI предложено определять вес отдельных показателей в соответствии с установленными в РФ классами опасности веществ для человека и окружающей среды, а также использовать в качестве нормативных значений российские предельно допустимые концентрации (ПДК). Опробование адаптированного индекса на данных наблюдений качества воды в реке в зоне влияния горного предприятия за трехлетний период (2017–2019 гг.) показало, что он может быть использован как относительная характеристика загрязненности воды для сопоставления результатов экспедиционных обследований по различным створам в пределах одного года, а также для оценки динамики уровней загрязнения воды по створам в разные годы. Полученные результаты согласуются с данными ежегодников Росгидромета «Качество поверхностных вод Российской Федерации» за 2017–2019 гг. Для использования индекса WQI в качестве абсолютного показателя уровней загрязненности воды необходимо проведение дополнительных исследований для разработки соответствующей классификации.*

**Ключевые слова:** индекс качества воды; Взвешенный индекс; водный объект; экологический мониторинг; класс опасности.

### 1. Введение

Один из основных видов воздействия горных предприятий на окружающую среду – сброс очищенных рудничных вод. При этом в соответствии с требованиями Федерального закона об охране окружающей среды [1] должны соблюдаться установленные для предприятия нормативы допустимого сброса (НДС) загрязняющих веществ для сохранения в пределах допустимых норм качества воды водного объекта, который является приемником сточных вод. Контроль соблюдения НДС и качества природных вод производится на основе определения уровней содержания в пробах воды достаточно большого количества загрязняющих веществ, характерных для водного объекта и для добываемых руд. Этой работой занимаются уполномоченные органы в сфере контроля загрязнения гидросферы, основным из которых является Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды России (Росгидромет).

Необходимо большое количество изучаемых показателей (10–20 и более) для получения достоверных выводов о наличии (или отсутствии) влияния предприятия на качество воды, а также выделения наиболее загрязненных участков водных объектов.

Такой подход эффективен [2] с точки зрения контроля соблюдения норм и требований природоохранительного законодательства, однако он не вполне подходит для реализации установленного в Федеральном законе «Об охране окружающей среды» [1, ст. 4.3] принципа общедоступности экологической информации для общественности. Использование большого набора изучаемых веществ затрудняет понимание неспециалистами (населением, представителями общественных организаций) информации о качестве воды, так как для интерпретации требуются

сопоставление данных измерений по каждому веществу с установленными нормативами [3–5] и квалифицированная оценка полученных результатов.

Для того чтобы сделать информацию более понятной для широкого круга заинтересованных организаций и лиц, в России и за рубежом разработаны и используются индексы качества воды, учитывающие имеющиеся данные по отдельным загрязняющим веществам и дающие обобщенную характеристику каждой пробы воды в виде одного числа.

В частности, в системе Росгидромета для оценки состояния поверхностных водных объектов был разработан индекс загрязнения воды (ИЗВ). Он представляет собой сумму нормированных к предельно допустимой концентрации (ПДК) значений концентрации шести главных поллютантов, где в качестве обязательных используются БПК<sub>5</sub> и содержание в воде растворенного кислорода, а также четыре вещества с максимальными значениями частоты превышения ПДК [6–8] для изучаемого водного объекта. В гидрохимических исследованиях Росгидромета используется удельный комбинаторный индекс загрязненности воды (УКИЗВ), с помощью которого дается оценка качества воды по совокупности находящихся в ней загрязняющих веществ с учетом кратности превышения ПДК и повторяемости случаев превышения [8–10]. Данные индексы используются для общей качественной и количественной оценки и сопоставления уровней загрязнения воды водных объектов на основе разработанных шкал [6–10, 28].

Основным показателем является УКИЗВ, который используется для комплексной оценки уровней загрязненности водных объектов в пределах водных бассейнов и регионов России, результаты которой представляются в ежегодных изданиях Росгидромета [29, 30]. УКИЗВ представляет собой объективный и достоверный показатель, т. к. рассчитывается с использованием большого количества данных измерений (как правило, не менее 12 измерений в год на каждом пункте наблюдения) по единым методикам на постах Росгидромета и предприятий-водопользователей, осуществляющих сброс очищенных сточных вод. Результаты измерений предоставляются в региональные подразделения Росгидромета для обобщения.

Один из первых индексов качества воды был предложен в 1965 г. Р. К. Хортоном [11] и развит Р. М. Брауном и др. [12]. В результате дальнейших исследований в данной сфере было разработано и используется более 30 индексов загрязнения воды, которые рассчитываются различными методами [13–17]. Наиболее известными являются Взвешенный и Канадский индексы качества воды. Они представляют собой безразмерные показатели, и для них разработаны соответствующие шкалы, позволяющие разделить различные створы водных объектов по категориям качества воды с точки зрения возможности ее использования для питьевых нужд.

Канадский индекс качества воды (Canadian Water Quality Index – CWQI) [18–20] практически аналогичен российскому индексу УКИЗВ, т. к. он учитывает кратность превышения ПДК для различных веществ и повторяемость случаев превышения по результатам серии наблюдений за определенный период, обычно за год.

Взвешенный индекс качества воды (Weighted Water Quality Index – WQI) в определенной степени аналогичен ИЗВ, но для его расчета может использоваться достаточно большой набор необходимых для решения разных задач показателей, нормированных к величине ПДК и взятых с определенными весами.

Для расчета Взвешенного индекса не требуется многократных измерений содержания загрязняющих веществ в воде, как, например, для расчета основного российского индекса качества воды (УКИЗВ) и Канадского индекса, поэтому WQI используется в мире чаще, особенно для проведения единовременных оценок качества воды [21–28].

В связи с этим Взвешенный индекс (WQI) можно рассматривать в качестве перспективного показателя при экспедиционной оценке и сопоставлении качества воды в различных створах реки в зоне влияния выпусков очищенных сточных вод

горного предприятия, а также для более эффективного решения актуальной задачи обеспечения граждан и юридических лиц доступной и понятной информацией о загрязненности водных объектов.

Данная работа посвящена адаптации Взвешенного индекса качества воды (WQI) с использованием российских нормативов и оценке эффективности его применения на примере результатов экспедиционного обследования воды р. Реж в зоне влияния выпусков очищенных сточных вод Сафьяновского медного рудника (Свердловская область, район г. Режа).

## 2. Взвешенный индекс качества воды

Взвешенный индекс качества воды (WQI) был разработан для оценки пригодности поверхностных водных объектов для использования в качестве источников питьевой воды и рассчитывался на основе относительно небольшого количества характерных для поверхностных вод показателей (до 10 [11, 12]).

В дальнейшем индекс был модифицирован для оценки качества подземных источников питьевого водоснабжения на основе дополнения перечня используемых для расчета веществ, характерных для состава подземных вод [22, 25, 27], а также изменения веса отдельных показателей, используемых для расчета.

Анализ литературы показывает, что для расчета WQI используются как различные наборы показателей и нормативы (национальные, международные), так и соответствующие им значения весов, которые определяются авторами, как правило, на основе собственных экспертных оценок [21–28], в связи с чем результаты расчетов характеризуются определенным уровнем субъективности и привязаны к национальной нормативной базе в сфере контроля качества природных вод.

В частности, в [25] оценки поверхностных вод произведены с использованием нормативов качества воды, рекомендованных Всемирной организацией здравоохранения (WHO, 1993), по результатам определения следующих показателей с соответствующими весами (показаны в скобках): pH (0,2190), еН (0,3710), минерализация общая (0,0037), жесткость общая (0,0062), кальций (0,0250), хлориды (0,0074), нитраты (0,0412), сульфаты (0,0124), растворенный кислород (0,3723), БПК<sub>5</sub> (0,3723).

В [26] также для поверхностных вод рассчитан WQI с использованием нормативов ПДК, рекомендованных Индийским бюро стандартов (BIS), Индийским советом медицинских исследований (ICMR) и Всемирной организацией здравоохранения на основе набора показателей с относительными весами, аналогичными [25].

В [27] для оценки подземных вод использованы индийские стандарты качества воды и следующие показатели и относительные веса: pH (0,1212), сухой остаток (0,1212), жесткость общая (0,1212), сульфаты (0,0909), магний (0,0606), нитраты (0,1212), хлориды (0,0909), кальций (0,0606), щелочность (0,0606), фториды (0,1515).

В [28] также для оценки подземных вод использованы индийские стандарты качества воды и следующие показатели и относительные веса: pH (0,0952), сухой остаток (0,0952), жесткость общая (0,0476), гидрокарбонаты (0,0714), хлориды (0,0714), сульфаты (0,0952), нитраты (0,1190), фтор (0,0952), кальций (0,0476), магний (0,0476), железо (0,0952), марганец (0,0952), цинк (0,0238).

Таким образом, индекс WQI может рассчитываться по достаточно большому набору показателей как поверхностных, так и подземных вод и может использоваться для оценки качества воды различных водных объектов.

## 3. Материалы и методы

Цель настоящей работы – адаптация метода оценки качества воды на основе индекса WQI для мониторинга водного объекта в зоне влияния горного предприятия. Для расчетов используются выражения, представленные в работе [28], которые



учитывают не только характерные для поверхностных вод загрязняющие вещества, но и основные компоненты, входящие в состав руд цветных металлов.

Для расчета WQI использованы результаты экспедиционных обследований р. Реж, приемника очищенных сточных вод Сафьяновского медноколчеданного месторождения (г. Реж, Свердловская область), проведенных в рамках производственного контроля воздействия предприятия на гидросферу в 2017–2019 гг. сотрудниками Института промышленной экологии УрО РАН. Аналитические исследования проб воды, отобранных в теплый период года (с мая по октябрь), были выполнены в аккредитованной лаборатории АО «Сафьяновская медь».

Отбор проб воды проводился в трех створах реки: створ 1 расположен в 500 м выше устья р. Хвощевки (правый приток р. Реж), по которой поступают очищенные сточные воды выпуска № 1 рудника, предназначен для отслеживания фоновых по отношению к руднику концентраций загрязняющих веществ в воде реки; створ 2 расположен в 300 м ниже устья р. Хвощевки, предназначен для оценки загрязнения р. Реж очищенными сточными водами выпуска № 1; створ 3 расположен в 2,5 км ниже выпуска № 2 очищенных сточных вод рудника, предназначен для оценки загрязнения от выпуска № 2, а также неорганизованных стоков, которые могут поступать по малым правым притокам р. Реж.

Для уменьшения субъективности при определении весов показателей (которые, как было сказано выше, определяются на основе экспертных оценок) были использованы установленные в РФ классы опасности веществ для человека и окружающей среды [29–31]. Значение веса для каждого вещества определено как  $1/K_0$ , где  $K_0$  – класс опасности. Кроме того, были использованы российские нормативы предельно допустимых концентраций химических веществ в воде водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования [4], так как р. Реж используется местным населением в основном для рекреационных и хозяйственно-бытовых целей.

Перечень использованных показателей, соответствующие погрешности аналитических измерений, нормативы ПДК [4] и классы опасности [29–31] приведены в табл. 1. Данные по показателю рН не использовались, потому что для него отсутствует класс опасности в [29–31], наблюдаемые значения (от 7,5 до 8,1) лежат в пределах норматива ПДК 6,5–8,5, и для рН не установлено наиболее приемлемое (идеальное [28]) для человека значение, которое используется в расчетах WQI, при этом идеальные значения остальных показателей приняты равными 0 по аналогии с [27, 28].

Таблица 1. Методы определения массовых концентраций веществ в пробах воды, диапазон и погрешность измерения, ПДК [4], классы опасности [29]

Вещества	Метод измерений	Обозначение МВИ	Диапазон измерений, мг/дм	Отн. погр., %	ПДК	Кл. оп.
Гидрокарбонаты	ГОСТ 31957-2012	ГОСТ 31957-2012	Св. 10 до 100 вкл.	3	1000	4
Железо общ.	Метод АЭСсИСП	ПНДФ 14.1.2:4.135-98	от 0,05 до 0,5 вкл.	24	0.3	4
			св. 0,5 до 5 000 вкл.	15		
Жесткость общ.	Титриметрический метод	ПНДФ 14.1.2:98-97	св 1,0 до 50,0	9	7	4
Ионы аммония	Фотометрический метод с реактивом Несслера	ПНДФ 14.1.1-95	Св. 0,10 до 1,0 вкл.	35	2	4

Окончание табл. 1

Калий	Массовые концентрации металлов методом АЭСсИСП		св. 1,0 до 50 000 вкл.	16	12	4
Кальций	Метод АЭСсИСП	ПНДФ 14.1:2:4.135-98	св. 1,0 до 5 000 вкл.	16	100	4
Кремний	Метод АЭСсИСП	ПНДФ 14.1:2:4.135-98	св. 1,0 до 500 вкл.	15	10	4
Магний	Метод АЭСсИСП	ПНДФ 14.1:2:4.135-98	св. 0,5 до 5 000 вкл.	15	50	4
Марганец	Метод АЭСсИСП	ПНДФ 14.1:2:4.135-98	от 0,001 до 0,05 вкл.	32	0,1	4
			св. 0,05 до 0,5 вкл.	24		
Медь	Метод АЭСсИСП	ПНДФ 14.1:2:4.135-98	от 0,001 до 0,05 вкл.	42	1	3
Нитраты	Фотометрический метод с салициловой кислотой	ПНДФ 14.1:2:4.4-95 (2011)	от 0,1 до 3 вкл.	18	45	4
Нитриты	Фотометрический метод с салициловой кислотой	ПНДФ 14.1:2:4.4-95 (2011)	от 0,02 до 0,1 вкл.	20	3	4
Натрий	Метод АЭСсИСП	ПНДФ 14.1:2:4.135-98	св. 1,0 до 50 000 вкл.	15	120	4
Никель	Метод АЭСсИСП	ПНДФ 14.1:2:4.135-98	от 0,001 до 0,05 вкл.	42	0,01	3
Окисляемость	Титриметрический метод	ПНДФ 14.1:2:4.154-99 (2012)	св. 2 до 100 вкл.	10	5	4
Свинец	Метод АЭСсИСП	ПНДФ 14.1:2:4.135-98	от 0,001 до 0,05 вкл.	42	0,03	2
Сульфаты	Весовой метод	РД 52.24.483-95	от 10 до 50 вкл.	20	500	4
Сухой остаток	Гравиметрический метод	ПНДФ 14.1:2:4.261-2010 (2015)	св. 50 до 5 000 вкл.	9	1 000	4
Цинк	Метод АЭСсИСП	ПНДФ 14.1:2:4.135-98	от 0,005 до 0,05 вкл.	34	1	3
			св. 0,05 до 0,5 вкл.	24		

МВИ – методика выполнения измерений.

Отн. погр. – относительная погрешность.

Кл. оп. – класс опасности.

Расчет Взвешенного индекса качества воды WQI выполнен в соответствии с [28] по приведенным ниже выражениям:

$$WQI = \sum_{i=1}^n SI_i, \quad (1)$$

$$SI_i = W_i \times Q_i, \quad (2)$$

$$Q_i = (C_i \div S_i) \times 100, \quad (3)$$

$$W_i = w_i \div \sum_{i=1}^n w_i, \quad (4)$$

где  $SI_i$  – индекс загрязнения по каждому показателю, безразмерный (далее – б/р);

$Q_i$  – относительное загрязнение по каждому показателю  $i$ , б/р;

$C_i$  – измеренная концентрация для каждого показателя, мг/дм<sup>3</sup>;

$S_i$  – ПДК для каждого показателя в воде водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования, мг/дм<sup>3</sup> [4];

$W_i$  – относительный вес каждого показателя, б/р;

$w_i$  – вес каждого показателя, обратный классу опасности, по [29–31], б/р;

$n$  – количество использованных показателей.

#### 4. Результаты и обсуждение

Для получения обобщенной характеристики качества воды индекс качества WQI был рассчитан по средним значениям концентраций изученных показателей за 3 опробования, выполненные в теплый период 2017–2019 гг.

Для абсолютной оценки уровня загрязненности воды на основе рассчитанных значений требуется соответствующая шкала, которая в настоящее время отсутствует, т. к. для ее обоснования требуются дополнительные исследования. Поэтому полученные значения индекса качества воды могут быть использованы как относительные показатели загрязненности воды для сопоставления результатов по различным створам в пределах одного года, а также для оценки динамики уровней загрязнения воды по створам за трехлетний период 2017–2019 гг.

В табл. 2 представлен расчет WQI для створов 1–3 в 2019 г., в табл. 3 – результаты расчета WQI для створов 1–3 в 2017–2019 гг, на рис. 1 – изменение взвешенного индекса качества воды WQI в створах 1–3 с 2017 по 2019 г.

Таблица 2. Расчет Взвешенного индекса качества воды WQI для створов 1–3 в 2019 г.

Показатель	$w_i$	$W_i$	$Q_i$		
			Створ 1	Створ 2	Створ 3
Гидрокарбонаты	0,25	0,05	0,45	0,44	0,45
<b>Железо общее</b>	0,25	0,05	6,51	6,51	6,24
Жесткость	0,25	0,05	1,30	1,57	1,31
<b>Ионы аммония</b>	0,25	0,05	2,11	1,59	1,83
Калий	0,25	0,05	0,44	0,48	0,49
Кальций	0,25	0,05	0,94	0,95	1,00
<b>Кремний</b>	0,25	0,05	2,57	2,49	2,49
Магний	0,25	0,05	1,03	0,96	1,05
<b>Марганец</b>	0,25	0,05	2,27	2,35	3,91
Медь	0,33	0,063	0,03	0,02	0,15
Нитраты	0,25	0,05	0,04	0,06	0,06
Нитриты	0,25	0,05	0,05	0,03	0,03
Натрий	0,25	0,05	0,21	0,19	0,19
<b>Никель</b>	0,33	0,06	4,12	3,81	4,29
<b>Окисляемость</b>	0,25	0,05	8,86	7,94	8,80
<b>Свинец</b>	0,5	0,10	2,22	1,25	1,28
Сульфаты	0,25	0,05	0,16	0,15	0,21
Сухой остаток	0,25	0,05	0,70	0,61	0,70
<b>WQI</b>			34,02	31,41	34,75

Таблица 3. Средний по трем обследованиям Взвешенный индекс качества воды WQI для створов 1–3 в 2017–2019 гг.

Год	Номер створа		
	1	2	3
2017	34,02	31,41	34,75
2018	36,91	35,97	38,66
2019	30,60	30,04	38,17

По результатам, представленным в табл. 2, можно оценить вклад отдельных показателей в значения индекса качества воды.

Основным показателем, который вносит вклад 26,5 % (в створе 1), является окисляемость, что говорит о наличии общего загрязнения реки во всех створах, в т. ч., вне зоны влияния выпусков очищенных сточных вод Сафьяновского рудника. Это подтверждается также достаточно высоким вкладом показателя ионы аммония (6 % в створе 1). Порядка 12 % во всех створах вносит никель. Вклад свинца также максимален в створе 1. По названным показателям можно сделать вывод, что основным источником загрязнения р. Реж является расположенный выше по течению от изученных створов (порядка 8 км) г. Реж с населением более 35 тыс. человек, где в непосредственной близости от р. Реж расположены отвалы переработки никелевых руд, а также производится сброс очищенных хозяйственно-бытовых сточных вод.

Заметный вклад в величину индекса качества воды вносят также железо, марганец и кремний, повышенные естественные концентрации которых характерны для многих рек Среднего Урала, в т. ч. для р. Реж выше города Режа [30].

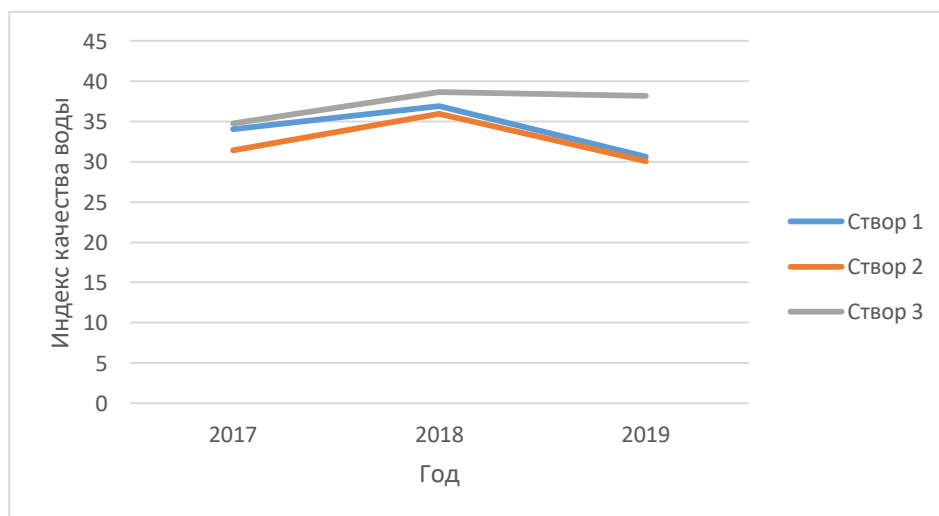


Рис 1. Изменения Взвешенного индекса качества воды WQI в створах 1–3 с 2017 по 2019 г.

Анализ табл. 3 и рис. 1 показывает, что максимальные значения индекса качества воды WQI получены в створе 3 в 2018 и 2019 гг. и составили 38,1–38,6. При этом в створах 1 и 2 индекс качества воды в 2019 г. получен порядка 30, т. е. превышение индекса в створе 3 над створами 1 и 2 составило в 2019 г. порядка 28 %. Учитывая, что относительная погрешность измерений для большинства показателей 15 % и более, а по отдельным металлам достигала 30–40 % (табл. 1), на основании данных обследования нельзя сделать достоверный вывод о наличии влияния сброса очищенных сточных вод медного рудника на качество воды р. Реж.

За период наблюдений (2017–2019 гг.) качество воды, согласно рассчитанному индексу, незначительно изменялось в пределах погрешности измерений (от –12,2 до +11,1 % от среднего значения по всем створам – 34,84), т. е. оно оставалось

практически постоянным с точки зрения соответствия нормативам качества воды для хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования.

Полученные данные согласуются с выводами ежегодников Росгидромета «Качество поверхностных вод Российской Федерации» за 2017–2019 гг. [29–31], где отмечено, что вода в р. Реж в указанные годы неизменно классифицировалась как «грязная», т. е. качество воды в реке не изменялось:

- в 2017 г. «качество воды р. Реж характеризовалось 4-м классом разрядов “а” и “б” (грязная)» [29];
- в 2018 г. «вода р. Реж характеризовалось 4-м классом разряда “а” (грязная)» [30];
- 2019 г. «р. Реж характеризовалась низким качеством воды: 4-й класс разряд “б” (грязная)» [31].

## 5. Заключение

В работе представлены результаты адаптации и опробования широко применяемого в мире Взвешенного индекса качества воды WQI для использования в экологическом мониторинге зоны влияния горного предприятия.. По результатам анализа российских и зарубежных источников индекс WQI представляется перспективным инструментом для использования при экспедиционной оценке и сопоставлении качества воды в различных створах реки в зоне влияния выпусков очищенных сточных вод горного предприятия, а также более эффективного решения актуальной задачи по обеспечению граждан и юридических лиц доступной и понятной информацией о загрязненности водных объектов в соответствии с природоохранительным законодательством России.

Для адаптации индекса WQI предложено определять веса отдельных показателей качества воды в соответствии с установленными в РФ классами опасности веществ для человека и окружающей среды, а также использовать в качестве нормативных значений российские нормативы предельно допустимых концентраций химических веществ в воде водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования, так как р. Реж используется местным населением в основном для рекреационных и хозяйственно-бытовых целей.

Опробование адаптированного индекса качества воды WQI проведено на данных экспедиционных обследований 2017–2019 гг. р. Реж, являющейся приемником очищенных сточных вод Сафьяновского медного рудника (г. Реж, Свердловская область).

За период наблюдений качество воды, согласно рассчитанному индексу, практически не изменялось (в пределах погрешности измерений), что согласуется с данными ежегодников Росгидромета «Качество поверхностных вод Российской Федерации» за 2017–2019 гг. [29–31].

Таким образом, адаптированный Взвешенный индекс качества воды WQI может быть использован как относительный показатель загрязненности воды для сопоставления результатов экспедиционных обследований по различным створам в пределах одного года, а также для оценки динамики уровней загрязнения воды по створам в разные годы с целью дальнейшего использования полученных экологических данных для информирования общественности об экологическом состоянии водного объекта. Чтобы использовать данный индекс в качестве абсолютного показателя загрязненности, необходимо проведение дополнительных исследований для разработки соответствующей классификации уровней качества воды.

## 6. Список литературы

1. Федеральный закон от 10.01.2002 N 7-ФЗ (ред. от 26.03.2022) «Об охране окружающей среды» (в редакции на 25.06.2023 г. URL:

- <http://pravo.gov.ru/proxy/ips/?docbody=&nd=102074303>). (дата обращения: 25.06.2023 г.)
2. *Дерягина, С. Е.* Экологический мониторинг – инструмент эффективного управления природоохранной деятельностью горных предприятий / С. Е. Дерягина, О. В. Астафьева, А. Н. Медведев // Экономика природопользования. – 2011. – № 1. – С. 48–53.
  3. СанПиН 2.1.4.559-96. Питьевая вода и водоснабжение населенных мест. Питьевая вода. Гигиенические требования к качеству воды централизованных систем питьевого водоснабжения. Контроль качества.
  4. ГН 2.1.5.1315-03. Предельно допустимые концентрации (ПДК) химических веществ в воде водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования.
  5. ГН 2.1.5.1316-03. Ориентировочные допустимые уровни (ОДУ) химических веществ в воде водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования.
  6. Временные методические указания по комплексной оценке качества поверхностных и морских вод. Утв. Госкомгидрометом СССР 22.09.1986 г.
  7. *Гагарина, О. В.* Обзор методов комплексной оценки качества поверхностных вод / О. В. Гагарина // Науки о земле. – 2005. – № 11. – 45–58.
  8. *Сибгатуллина, А. М.* Измерение загрязненности речной воды (на примере малой реки Малая Кокшага) / А. М. Сибгатуллина, П. М. Мазуркин. – М. : Академия Естествознания, 2009.
  9. РД 52.24.643-2002. Руководящий документ (методические указания), дата введения 2004-01-01, разработан Гидрохимическим институтом (ГХИ) Федеральной службы России по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды Росгидромет; Гидрохимические показатели состояния окружающей среды: справочные материалы; под ред. Т. В. Гусевой. – М. : ФОРУМ : ИНФРА-М, 2007. – С.192.
  10. *Кичигин, В. И.* Использование интегральных показателей загрязненности для анализа состояния водотоков / В. И. Кичигин, Е. Д. Палагин // ВСТ. – 2005. – № 7. – С. 25.
  11. *Horton, R. K.* An Index – Number System for rating water quality / R. K. Horton // J. of the water pollution Control Federation. – 1965. – 37(3). – 300–305.
  12. *Water Quality Index-Crashing, the Psychological Barrier* / R. M. Brown, N. I. McClelland, R. A. Deininger and M. F. O'Connor // Proc. 6-th Annual Conference, Advances in Water Pollution Research. – 1972. – P. 787–794.
  13. Design and development of integrated indicators for the Sustainable Development Goals // UNEP, Report: Senior Expert Meeting, 3–5 December 2014, Gland, Switzerland.
  14. *Water Quality Assessment in Terms of Water Quality Index* / Shweta Tyagi, Bhavtosh Sharma, Prashant Singh, Rajendra Dobhal // American J. of Water Resources. – 2013. – Vol. 1, No. 3. – P. 34–38.
  15. *Global Drinking Water Quality Index Development and Sensitivity Analysis* / UNEP Global Environment Monitoring System/Water Programme, Report, 2007.
  16. *Water Quality Assessment with Water Quality Indices* / S. Sivaranjani, A. Rakshit and S. Singh // International J. of Bioresource Science. – 2015. – Vol. 2. – Iss. 2. – P. 85–94.
  17. *Mnisi, L. N.* Assessment of the state of the water quality of the Lusushwana River, Swaziland, using selected water quality indices / L. N. Mnisi // M.Sc. Thesis, University of Zimbabwe, Harare. – 2010.
  18. *Boyacioglu, H.* Utilization of the water quality index method as a classification tool / H. Boyacioglu // Environmental Monitoring and Assessment. – 2009. – 167. – P. 115–124.
  19. Canadian Water Quality Guidelines for the Protection of Aquatic Life, CCME Water Quality index 1.0, User's Manual // Canadian Council of Ministers of the Environment, 2001.
  20. *Khan, A. A.* Modification and Application of the Canadian Council of Ministers of the Environment Water Quality Index (CCME WQI) for the Communication of Drinking Water Quality Data in Newfoundland and Labrador / Amir Ali Khan, Renée Paterson and Haseen Khan // Water Qual. Res. J. Canada. – 2004. – Vol. 39, No 3. – P. 285–293.
  21. *Yogendra, K.* Determination of Water Quality Index and Suitability of an Urban Waterbody in Shimoga Town, Kamataka / K. Yogendra and E. T. Puttaiah; M. Sengupta and R. Dalvani (editors) // Proceedings of Taal 2007: The 12-th World Lake Conference, 2008. – P. 342–346.
  22. An assessment of ground water quality using water quality index in Chennai, Tamil Nadu, India / I. N. Balan, M. Shivakumar and P. D. M. Kumar // Chronicles Young Scientist. – 2012. – 3(2). – P. 146–150.
  23. *Srivastava, G.* Water quality index with missing parameters / G. Srivastava, P. Kumar // International J. of Research in Engineering and Technology. – Apr – 2013. Vol. 02. – Iss. 04.
  24. *Water Quality Index for the Assessment of Water Quality from Different Sources in the Niger*

- Delta Region of Nigeria / E. E. Etim, R. Odoh, A. U. Itodo [et al.] // *Frontiers in Science*. – 2013. – 3(3). – P. 89–95.
25. *Kwasi Boah, D.* Mathematical Computation of Water Quality Index of Veve Dam in Upper East Region of Ghana / D. Kwasi Boah, S. Boakye Twum, Kenneth B. Pelig-Ba // *Environmental Sciences*. – 2015. – Vol. 3, No 1. – P. 11–16.
26. *Water Quality Index: A Tool for Evaluation of Surface Water Quality* / G. Sri Bala, G.V.R. Srinivasa Rao, P.A.R.K. Raju and M. Jagapathi Raju // *International J. of Civil Engineering and Technology*. – 2017. – 8(10). – P. 814–821.
27. *Kumari, S.* Assessment Of water Quality Index of Ground Water in Smalkhan, Haryana / S. Kumari, J. Rani // *International J. of Latest Research in Science and Technology*. – 2014. – Vol 3. – Iss. 6. – P. 169–172.
28. *Batabyal, A. K.* Hydrogeochemistry and Water Quality Index in the Assessment of Groundwater Quality for Drinking Uses / A. K. Batabyal, S. Chakraborty // *Water Environment Research*. – 2015. – Vol. 87, No. 7. – P. 607–617.
29. Качество поверхностных вод Российской Федерации. Ежегодник. 2017. ФГБУ «Гидрохимический институт», Росгидромет, 2018, URL: [https://gidrohim.com/sites/default/files/%D0%95%D0%B6%D0%B5%D0%B3%D0%BE%D0%B4%D0%BD%D0%B8%D0%BA%202017\\_0.pdf](https://gidrohim.com/sites/default/files/%D0%95%D0%B6%D0%B5%D0%B3%D0%BE%D0%B4%D0%BD%D0%B8%D0%BA%202017_0.pdf) (дата обращения: 28.06.2023 г.).
30. Качество поверхностных вод Российской Федерации. Ежегодник. 2018. ФГБУ «Гидрохимический институт», Росгидромет, 2019, URL: [https://gidrohim.com/sites/default/files/%D0%95%D0%B6%D0%B5%D0%B3%D0%BE%D0%B4%D0%BD%D0%B8%D0%BA%202018\\_3.pdf](https://gidrohim.com/sites/default/files/%D0%95%D0%B6%D0%B5%D0%B3%D0%BE%D0%B4%D0%BD%D0%B8%D0%BA%202018_3.pdf) (дата обращения: 28.06.2023 г.).
31. Качество поверхностных вод Российской Федерации. Ежегодник. 2019. ФГБУ «Гидрохимический институт», Росгидромет, 2020, URL: [https://gidrohim.com/sites/default/files/%D0%95%D0%B6%D0%B5%D0%B3%D0%BE%D0%B4%D0%BD%D0%B8%D0%BA%202019\\_0.pdf](https://gidrohim.com/sites/default/files/%D0%95%D0%B6%D0%B5%D0%B3%D0%BE%D0%B4%D0%BD%D0%B8%D0%BA%202019_0.pdf) (дата обращения: 27.06.2023 г.).

### Сведения об авторах:

**Медведев Александр Николаевич**, к.т.н., доцент, ведущий научный сотрудник Института промышленной экологии УрО РАН, Россия, Екатеринбург, ул. Софьи Ковалевской 20, Эл. почта: [alnikmed52@gmail.com](mailto:alnikmed52@gmail.com).

**Медведев Максим Александрович**, к.э.н., научный сотрудник Института промышленной экологии УрО РАН, Екатеринбург, Россия.

## WEIGHTED WATER QUALITY INDEX IN ENVIRONMENTAL MONITORING OF A MINING ENTERPRISE INFLUENCE ZONE

A. N. Medvedev, M. A. Medvedev

*Institute of Industrial Ecology of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,  
Yekaterinburg, Russia*

*The article is devoted to the issues of adaptation and testing the weighted water quality index WQI to use in the environmental monitoring of a mining enterprise influence zone. WQI is widely known in the world and is a promising tool for use in the assessment of natural water quality for timely informing the public and interested organizations about water bodies pollution. To adapt the WQI index, it is proposed to determine the weights of individual pollution indicators in accordance with the hazard classes of substances for humans and the environment established in the Russian Federation. It is also proposed to use the Russian values of maximum permissible concentrations as standard values. The testing of the adapted index was conducted using the data of water quality observations in the river located in the influence zone of a mining enterprise for a three-year period (2017-2019). It showed that the WQI can be used as a relative characteristic of water pollution to compare the results of expeditionary surveys for different testing points within one year. It can also be used to assess the dynamics of water pollution in the same site in different years. The data obtained are consistent with the conclusions of the yearbooks of Roshydromet "Quality of surface waters of the Russian Federation" for 2017–2019. To use the adapted WQI as an absolute measure of water quality, it is needed to conduct additional studies to develop an appropriate classification.*

**Key words:** water quality index; weighted index; water object; environmental monitoring, hazard class.

### References

1. Federal Law No. 7-FZ of January 10, 2002 (as amended on March 26, 2022) "On Environmental Protection" (as amended on June 25, 2023, <http://pravo.gov.ru/proxy/ips/?docbody=&nd=102074303>), (accessed 06/27/2023).
2. Deryagina, S. E. Ecological monitoring – a tool for effective management of environmental activities of mining enterprises / S. E. Deryagina, O. V. Astafieva, A. N. Medvedev // Economics of nature Use. – 2011. – No. 1. – P. 48–53.
3. SanPiN 2.1.4.559-96. Drinking water and water supply of populated sites. Drinking water. Hygienic requirements for water quality of centralized drinking water supply systems. Quality control.
4. GN 2.1.5.1315-03. Maximum Permissible Concentrations (MPC) of chemicals in the water of water bodies for drinking and domestic water use.
5. GN 2.1.5.1316-03. Approximate Permissible Levels (APL) of chemicals in the water of water bodies for drinking and domestic water use.
6. Temporary guidelines for a comprehensive assessment of the quality of surface and sea waters. Approved USSR State Committee for Hydrometeorology on September 22, 1986.
7. Gagarina, O. V. Review of methods for complex assessment of the quality of surface waters / O. V. Gagarina // Nauki o Zemlje. – 2005. – No. 11. – P. 45–58.
8. Sibagatullina, A. M. Measurement of river water pollution (on the example of the small river Malaya Kokshaga) / A. M. Sibagatullina, P. M. Mazurkin. – M. : Academy of Natural Sciences, 2009.
9. RD 52.24.643-2002. Governing document (guidelines), introduction date 2004-01-01, developed by the Hydrochemical Institute (HCI) of the Russian Federal Service for Hydrometeorology and Environmental Monitoring Roshydromet; Hydrochemical indicators of the state of the environment: reference materials; ed. T. V. Guseva. – M. : FORUM : INFRA-M. – 2007. – 192 P.
10. Kichigin, V. I. The use of integral indicators of pollution for the analysis of the state of watercourses / V. I. Kichigin, E. D. Palagin // VST. – 2005. – No. 7. – P. 25.
11. Horton, R. K. An Index – Number System for rating water quality // Journal of the water pollution



- Control Federation. – 1965. – 37(3). – P. 300 – 305.
12. Water Quality Index-Crashing, the Psychological Barrier / R. M. Brown, N. I. McClelland, R. A. Deininger and M. F. O'Connor // Proc. 6th Annual Conference, Advances in Water Pollution Research. – 1972. – P. 787–794.
  13. Design and development of integrated indicators for the Sustainable Development Goals // UNEP, Report: Senior Expert Meeting, 3-5 December 2014, Gland, Switzerland.
  14. Shweta Tyagi, Bhavtosh Sharma, Prashant Singh, Rajendra Dobhal, Water Quality Assessment in Terms of Water Quality Index // American J. of Water Resources. – 2013. – Vol. 1, No. 3. – P. 34–38.
  15. Global Drinking Water Quality Index Development and Sensitivity Analysis / UNEP Global Environment Monitoring System/Water Programme, Report, 2007.
  16. Sivaranjani S., Amitava Rakshit and Samrath Singh, Water Quality Assessment with Water Quality Indices // International Journal of Bioresource Science. – 2015. – Vol 2. – Issue 2. – P. 85-94.
  17. Mnisi, L.N., Assessment of the state of the water quality of the Lusushwana River, Swaziland, using selected water quality indices // M.Sc. Thesis, University of Zimbabwe, Harare. – 2010.
  18. Hülya Boyacioglu, Utilization of the water quality index method as a classification tool, Environmental Monitoring and Assessment. – 2009. – 167. – P. 115-124.
  19. Canadian Water Quality Guidelines for the Protection of Aquatic Life, CCME Water Quality index 1.0, User's Manual // Canadian Council of Ministers of the Environment. – 2001.
  20. Amir Ali Khan, Renée Paterson and Haseen Khan, Modification and Application of the Canadian Council of Ministers of the Environment Water Quality Index (CCME WQI) for the Communication of Drinking Water Quality Data in Newfoundland and Labrador // Water Qual. Res. J. Canada. – 2004. – Vol 39. – No. 3. – P. 285-293.
  21. K. Yogendra and E.T. Puttaiah, Determination of Water Quality Index and Suitability of an Urban Waterbody in Shimoga Town, Karnataka / Sengupta, M. and Dalvani. R. (Editors) // Proceedings of Taal2007: The 12th World Lake Conference. -2008. – P. 342 -346.
  22. Balan, I. N., Shivakumar, M. and Kumar, P.D.M. An assessment of ground water quality using water quality index in Chennai, Tamil Nadu, India // Chronicles Young Scientist. – 2012. – 3(2). – P. 146-150.
  23. Garima Srivastava, Pradeep Kumar, Water quality index with missing parameters, International J. of Research in Engineering and Technology. – Apr -2013. Vol 02. – Issue 04.
  24. Water Quality Index for the Assessment of Water Quality from Different Sources in the Niger Delta Region of Nigeria / E. E. Etim, R. Odoh, A. U. Itodo [et al.] // Frontiers in Science. – 2013. – 3(3). – P. 89–95.
  25. Douglas Kwasi Boah, Stephen Boakye Twum, Kenneth B. Pelig-Ba, Mathematical Computation of Water Quality Index of Veia Dam in Upper East Region of Ghana // Environmental Sciences. – 2015. – Vol. 3. – No. 1. – P. 11–16.
  26. G. Sri Bala, G.V.R. Srinivasa Rao, P.A.R.K. Raju and M. Jagapathi Raju, Water Quality Index: A Tool for Evaluation of Surface Water Quality // International Journal of Civil Engineering and Technology. – 2017. – 8(10). – P. 814-821.
  27. Kumari, S. Assessment Of water Quality Index of Ground Water in Smalkhan, Haryana / S. Kumari, J. Rani // International J.I of Latest Research in Science and Technology. – 2014. – Vol 3. – Iss. 6. – P. 169–172.
  28. Batabyal, A. K. Hydrogeochemistry and Water Quality Index in the Assessment of Groundwater Quality for Drinking Uses / A. K. Batabyal, S. Chakraborty // Water Environment Research. – 2015. – Vol. 87. – No. 7. – P. 607–617.
  29. Quality of surface waters of the Russian Federation. Yearbook. 2017. FGBU "Hydrochemical Institute", Roshydromet, 2018, URL: [https://gidrohim.com/sites/default/files/%D0%95%D0%B6%D0%B5%D0%B3%D0%BE%D0%B4%D0%BD%D0%B8%D0%BA%202017\\_0.pdf](https://gidrohim.com/sites/default/files/%D0%95%D0%B6%D0%B5%D0%B3%D0%BE%D0%B4%D0%BD%D0%B8%D0%BA%202017_0.pdf) (accessed 28.06.2023).
  30. Quality of surface waters of the Russian Federation. Yearbook. 2018. FGBU "Hydrochemical Institute", Roshydromet, 2019, URL: [https://gidrohim.com/sites/default/files/%D0%95%D0%B6%D0%B5%D0%B3%D0%BE%D0%B4%D0%BD%D0%B8%D0%BA%202018\\_3.pdf](https://gidrohim.com/sites/default/files/%D0%95%D0%B6%D0%B5%D0%B3%D0%BE%D0%B4%D0%BD%D0%B8%D0%BA%202018_3.pdf) (accessed 28.06.2023 r.).
  31. Quality of surface waters of the Russian Federation. Yearbook. 2019. FGBU "Hydrochemical Institute", Roshydromet, 2020, URL: [https://gidrohim.com/sites/default/files/%D0%95%D0%B6%D0%B5%D0%B3%D0%BE%D0%B4%D0%BD%D0%B8%D0%BA%202019\\_0.pdf](https://gidrohim.com/sites/default/files/%D0%95%D0%B6%D0%B5%D0%B3%D0%BE%D0%B4%D0%BD%D0%B8%D0%BA%202019_0.pdf) (accessed 27.06.2023 r.).