

## 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. Использованный 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.

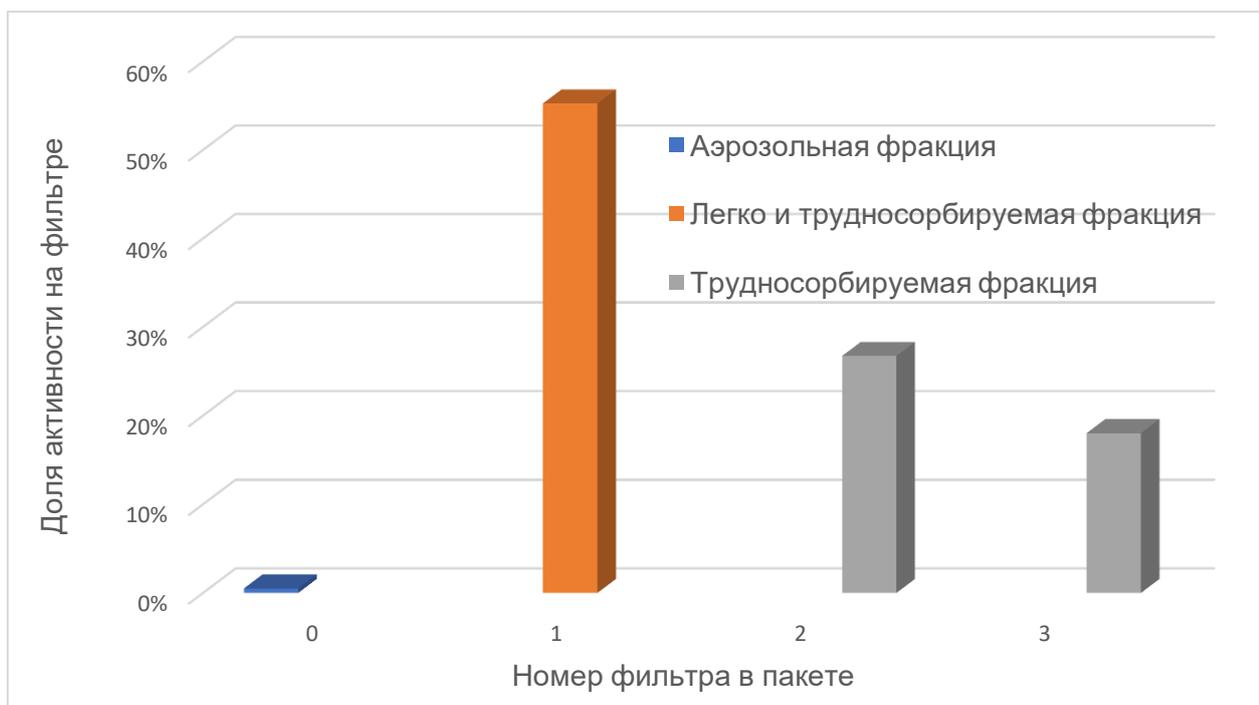


Рис. 1. Распределение активности  $^{131}\text{I}$  на отдельных фильтрах в пакете

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.