



УДК: 621.039.586

DOI: 10.26277/SECNRS.2021.99.1.001

© 2021. Все права защищены.

ВОЗМОЖНЫЕ СОЕДИНЕНИЯ ЙОДА В СВИНЦОВОМ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕ РЕАКТОРА БРЕСТ-ОД-300

Дубенков Н. Е.* (dubenkove@nikiet.ru),
Васюхно В. П.*, к. т. н. (vasyukhno@nikiet.ru),
Хачересов Г. А.*, к. т. н.

Статья поступила в редакцию 13 января 2021 г.

Аннотация

Одним из наиболее важных элементов при обосновании радиационной безопасности реактора БРЕСТ-ОД-300 является йод, поступающий в теплоноситель из топлива. Его последующий массоперенос зависит от физико-химических параметров соединения, в котором он находится.

Для определения возможных соединений йода в свинце необходимо проведение теоретических и экспериментальных исследований как для системы «свинец – йод», так и для многокомпонентной системы с учетом других элементов, которые могут накапливаться в свинцовом теплоносителе при работе реакторной установки на мощности.

Представлены результаты экспериментов по исследованию процессов массопереноса йода в свинце в зависимости от:

- *диапазона температур (420–680 °С);*
- *наличия окислов свинца, продуктов коррозии, продуктов активации и деления (в том числе цезия).*

Выбранные параметры эксперимента позволяют оценить коэффициенты распределения йода в свинце в условиях нормальной эксплуатации реакторной установки БРЕСТ-ОД-300, а также при авариях, связанных с повышением температуры теплоносителя.

► **Ключевые слова:** свинцовый теплоноситель, йод, массоперенос, растворимость, эксперимент.

* Научно-исследовательский и конструкторский институт энерготехники имени Н. А. Доллежала (НИКИЭТ), Москва, Россия.

POTENTIAL IODINE COMPOUNDS IN THE BREST-OD-300 REACTOR LEAD COOLANT

Dubenkov N. E.*,
Vasyukhno V. P.*, Ph. D.,
Khacheresov G. A.*, Ph. D.

Article is received on January 13, 2021

Abstract

One of the most important components in the BREST-OD-300 reactor radiation safety justification is iodine that enters the coolant from the fuel. Further mass transport of the iodine depends on the physicochemical parameters of the compound that contains it.

Identifying the potential iodine compounds in lead requires theoretical and experimental studies both for the lead-iodine system and for the multicomponent system in consideration for other components that can accumulate in the lead coolant during the reactor facility power operation.

Presented the results of experiments to investigate the processes of iodine mass transport in lead coolant depending on:

- *the temperature range (420 to 680 °C);*
- *the presence of lead oxides, corrosion products, and activation and fission products (including cesium).*

The selected experiment parameters make it possible to estimate the ratios of the iodine distribution in lead under normal operating conditions of the BREST-OD-300 reactor facility, as well as during accidents caused by an increase in the coolant temperature.

► **Keywords:** *lead coolant, iodine, mass transfer, solubility, experiment.*

* N. A. Dollezhal Research and Development Institute of Power Engineering JSC NIKIET, Moscow, Russia.

Введение

Миграция продуктов деления внутри реакторных установок зависит как от состояния физических барьеров, так и от физико-химических свойств продуктов деления. Большинство продуктов деления не склонно к распространению даже в условиях разрушения физических барьеров. Например, нелетучие радиоактивные продукты деления (молибден, палладий и др.) остаются в объеме топлива в виде твердых вторичных фаз [1], а большинство продуктов активации конструкционных материалов (изотопы кобальта, железа, марганца и пр.) остаются в стали.

Наиболее важными с точки зрения радиационной опасности являются радионуклиды, обладающие высокой миграционной способностью. Выделяют следующие группы продуктов деления: инертные газы (ксенон, криптон), летучие радионуклиды (йод, цезий, тритий). Миграция летучих радионуклидов во многом определяется их физико-химическими свойствами.

Йод с точки зрения радиационной опасности является одним из важных элементов из-за высокой миграционной способности, а его изотоп ^{131}I наиболее опасен, так как имеет относительно большой период полураспада (8,02 сут.). Его источниками в свинцовом теплоносителе реакторной установки БРЕСТ-ОД-300 являются:

- негерметичные твэлы, из которых в свинцовый теплоноситель поступают продукты деления ядерного топлива;
- реакция активации примесного теллура в свинцовом теплоносителе;
- деление примесных актинидов в свинцовом теплоносителе;
- деление ядерного топлива, являющегося технологическим загрязнением оболочек твэлов.

В работе анализируются результаты имеющихся теоретических и экспериментальных исследований с целью выявления возможности образования различных соединений йода и процессов их поведения в свинцовом теплоносителе при температурах, близких к имеющим место в реакторной установке БРЕСТ-ОД-300 [2].

Анализ исследований в системе «свинец – йод»

Процессы, происходящие с йодом после поступления в свинцовый теплоноситель, во многом

зависят от форм его химических соединений. Известны некоторые экспериментальные и теоретические исследования, посвященные формам соединений йода в свинце и свинцово-висмутовой эвтектике.

В работах [3, 4] приведены результаты экспериментальных исследований по взаимодействию йода и свинца при температурах до 679 К. Получено, что при молярных долях йода до 67 % и температуре выше 600 К в системе «свинец – йод» («Pb – I») есть области, в которых, помимо PbI_2 , существуют другие соединения (L_1 , L_2 , L_3 на рис. 1), а при температуре ниже 600 К наблюдаются только соединения PbI_2 [3].

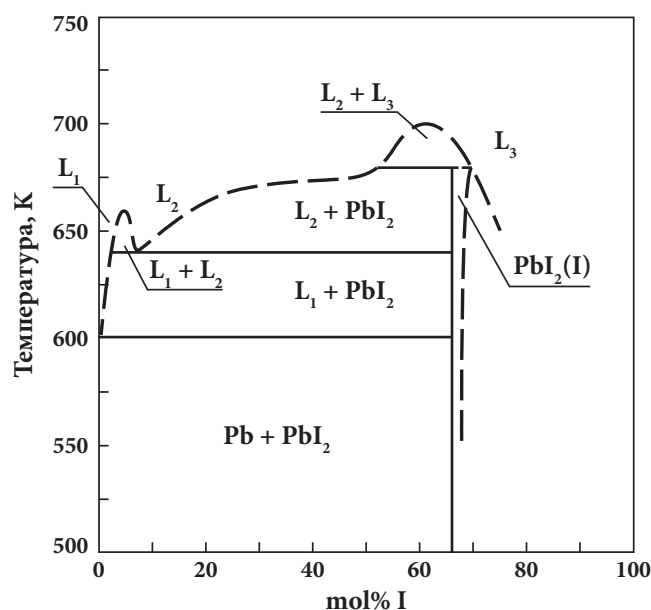


Рис. 1. Фазовая диаграмма системы «свинец – йод» [Fig. 1. «Pb – I» phase diagram]

В работе [5] также представлены результаты термодинамического анализа в системе паров «Pb – I₂». В результате исследований были сделаны следующие выводы:

- в диапазоне от 700 К до 1 100 К доминирующим соединением является PbI_2 ;
- давление насыщенных паров PbI сравнивается с давлением насыщенных паров PbI_2 лишь при температуре 1 500 К.

Вывод о том, что PbI_2 является доминирующим соединением при температурах ниже 1 200 К, подтверждается расчетами, представленными в [6]. Как видно из рис. 2, при температурах ниже 1 200 К основной формой йода в системе «Pb – I» и над поверхностью системы является PbI_2 , причем, чем ниже температура, тем ниже содержание I_2 [6].

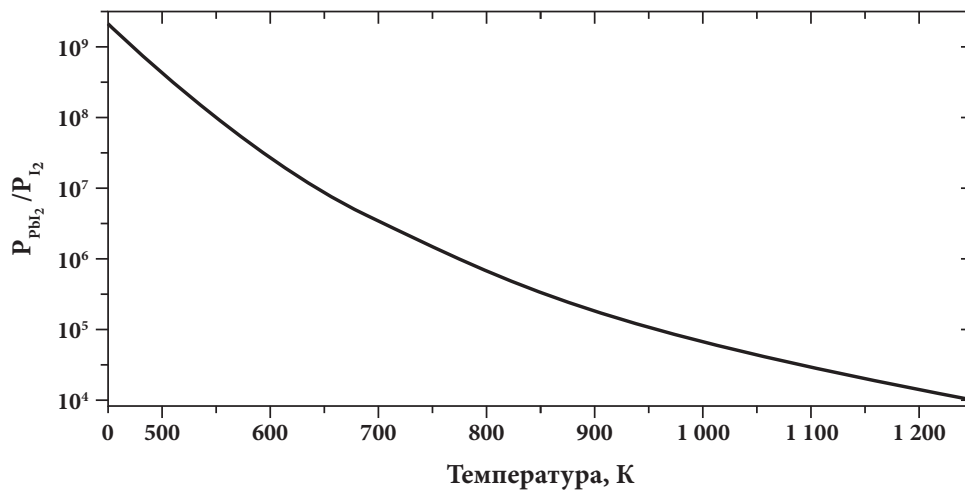


Рис. 2. Зависимость от температуры отношения равновесных парциальных давлений PbI_2 и молекулярного йода (I_2) над поверхностью жидкого свинца
 [Fig. 2. Ratio between partial pressures of PbI_2 and I_2 over liquid lead]

Из представленных результатов исследований [6] можно сделать вывод, что преобладающим соединением для системы «свинец – йод» при температурах, соответствующих температурам свинцового теплоносителя реакторной установки БРЕСТ-ОД-300, является PbI_2 . Образование других соединений возможно при температурах от 1 500 К, а также при относительно больших молярных долях йода в растворе.

Несмотря на важность результатов указанных исследований с точки зрения анализа возможных химических соединений в системе «свинец – йод», непосредственное их использование для анализа поведения йода в условиях работы реакторной установки БРЕСТ-ОД-300 затруднительно из-за следующих факторов:

- йод после разгерметизации твэла может поступать в свинцовый теплоноситель уже в виде какого-либо соединения (например, CsI);
- помимо свинца и йода в свинцовом теплоносителе будут присутствовать другие элементы (продукты деления, продукты коррозии и пр.);
- концентрация йода в свинцовом теплоносителе реакторной установки БРЕСТ-ОД-300 будет близка к нулевой, то есть намного меньше по сравнению с областями концентраций, наиболее подробно исследуемых в [3 и 4].

Результаты экспериментов на экспериментальных устройствах в условиях, приближенных к условиям реакторной установки БРЕСТ-ОД-300

Для исследования процессов массопереноса радионуклидов из свинца в газ в условиях, приближенных к условиям эксплуатации реакторной

установки БРЕСТ-ОД-300 (температура свинцового теплоносителя около 540 °С), в АО «ИРМ» был создан комплекс свинцово-газовых экспериментальных устройств, описание которых представлено в [7, 8]. При описании экспериментов далее температура будет представлена в градусах Цельсия. Несмотря на стремление создать условия реакторной установки БРЕСТ-ОД-300 (поддержание аналогичных температур в свинцовом и газовом контурах, поддержание необходимой концентрации кислорода в свинце и пр.), процессы, происходящие с исследуемыми изотопами йода, отличались, что связано со спецификой каждого экспериментального устройства, способами ввода радионуклидов и другими параметрами проведения каждого конкретного эксперимента.

Отметим, что во время исследований в экспериментальных устройствах находились: продукты активации (сурьма, теллур, серебро, цинк и пр.), продукты коррозии, продукты деления (на реакторном экспериментальном устройстве). Анализ результатов показал взаимодействие йода с этими примесями, а также влияние изменения их концентрации в свинце на массоперенос йода. Поэтому далее в статье рассматриваются изменения параметров массопереноса йода в зависимости от наличия окислов свинца в устройстве, а также наличия цезия в свинце.

Эксперимент на экспериментальном устройстве № 1

Экспериментальное устройство № 1 включало в себя свинцовый и газовый контуры и имело сравнительно небольшие размеры (высота рабочей

емкости не превышала 15 см, диаметр составлял 13 см). Результаты, полученные на экспериментальном устройстве № 1, можно считать предварительными, так как на нем отработывались методики загрузки радионуклидов, отбора проб, измерения активности и пр. Загрузка исследуемого изотопа ^{131}I (который нарабатывался в результате облучения на ^{130}Te в канале исследовательского реактора) проводилась через верхнюю крышку рабочей емкости. Радионуклид попадал в свинец, после чего начинались циклы эксперимента с обдувом и барботажем свинца. Между циклами эксперимента отбирались пробы свинца, активность в которых измерялась в спектрометре с полупроводниковым детектором.

Барботаж свинца в рабочей емкости экспериментального устройства (газовой смесью аргона с водородом) способствовал интенсивному выходу йода из свинца. Во время эксперимента практически не регулировалось содержание кислорода в свинце, что приводило к образованию окислов свинца в некоторых циклах эксперимента. По результатам измерения активности в пробах свинца были сделаны следующие выводы:

- йод, загруженный в свинец, равномерно растворялся во всем его объеме;
- в случае образования окислов свинца, которые всплывали на поверхность, йод имел тенденцию к скапливанию в них;
- осаждение йода на поверхностях свинцового контура экспериментального устройства отсутствовало.

Эксперимент на экспериментальном устройстве № 2

Экспериментальное устройство № 2 имело относительно большие размеры рабочей емкости (высота около 2 м), а также большие размеры свинцового и газового контуров. Масса свинца составляла около 162 кг. Всего на нем было проведено 27 циклов эксперимента, в 11-ти из которых в свинцовом контуре присутствовал ^{131}I . Йод загружался в экспериментальное устройство дважды: перед циклами № 14 и 17. Во время экспериментов обеспечивался контроль необходимой концентрации кислорода в свинце с проведением мероприятий по «раскислению».

Для оценки растворения ^{131}I в свинце во время эксперимента осуществлялся отбор проб свинца с помощью специального пробоотборника, расположенного на трубопроводе свинцового контура. Результаты измерений активности проб позволяли

определить удельную активность и полную ($A_{\text{св}}$) ^{131}I в свинце.

Активности ^{131}I в свинце ($A_{\text{св}}$) и в загруженном образце ($A_{\text{загр}}$), с учетом распада ^{131}I , совпадали в пределах погрешности, что свидетельствует о полном растворении загруженного йода в свинцовом контуре.

Эксперимент на экспериментальном устройстве № 3 (без цезия)

Экспериментальное устройство № 3 имело меньшие размеры по сравнению с устройством № 2. Масса свинца составляла 45 кг. Во время эксперимента обеспечивался контроль необходимой концентрации кислорода, исключая образование окислов свинца в контуре. Отличительной особенностью исследований на устройстве № 3 являлось то, что эксперимент проводился в диапазоне температур от 420 до 680 °С. Также в отличие от других экспериментальных устройств в контуре отсутствовала принудительная циркуляция свинца. Циркуляция обеспечивалась конвекцией, которая возникала при создании разности (около 100 °С) температур на определенных участках контура.

Всего на экспериментальном устройстве № 3 были проведены восемь циклов эксперимента (без цезия), во время каждого из которых в свинцовом контуре присутствовал йод.

Отношение активности ^{131}I ($A_{\text{св}}/A_{\text{загр}}$) в контуре для различного времени после загрузки йода представлено в табл. 1.

Из табл. 1 можно сделать вывод, что отношение активности ^{131}I находится в диапазоне от 0,36 до 1,29. Причем видно, что наибольшее расхождение наблюдается в первые и последние дни эксперимента. Расхождение для первых дней эксперимента можно объяснить, прежде всего, относительно медленным растворением облученных образцов, находящихся в твердом состоянии ввиду плохого перемешивания в объеме свинца на момент отбора проб. Малое значение отношения в конце эксперимента связано со значительной погрешностью измерения активности ^{131}I в последней отобранной пробе. Также необходимо учитывать, что в последние дни эксперимента температура экспериментального устройства поддерживалась на уровне 680 °С, и в свинец могли поступать продукты коррозии, которые, всплывая на границу раздела фаз «свинец – газ», могли частично сорбировать йод.

Тем не менее, несмотря на различия активностей ^{131}I , определенных двумя способами, можно

считать, что практически на всем протяжении эксперимента йод был равномерно растворен в объеме свинцового контура. Этот факт с учетом параллельно получаемых данных о скорости испарения йода из свинца в газ подтверждает то, что йод во время эксперимента находился в виде соединения PbI_2 .

Эксперимент на экспериментальном устройстве № 3 (с цезием)

Во время эксперимента с цезием и йодом было проведено 18 циклов, при этом исследуемый изотоп ^{131}I был загружен в контур экспериментальной установки перед 11 циклом. Эксперимент проводился при температуре от 420 до 680 °С.

К моменту загрузки ^{131}I в контуре находилось большое количество цезия (количество ядер ^{133}Cs и ^{134}Cs превышало количество ядер ^{131}I в тысячи раз). Основная часть цезия во время эксперимента находилась на поверхности контура. Также по результатам разделки рабочей емкости экспериментального устройства № 3 после проведения эксперимента было обнаружено, что существенная часть цезия скапливалась на границе раздела фаз «свинец – газ».

После загрузки ^{131}I во время эксперимента было отобрано восемь проб свинца, первая из которых была отобрана через 1 ч после загрузки. Отношение активности ^{131}I ($A_{св}/A_{загр}$) в контуре установки представлено в табл. 2.

Как видно из табл. 2, активность ^{131}I , определенная по отобраным пробам свинца, на несколько

порядков ниже активности, оцененной по измерениям загружаемого образца. Это означает, что йода в объеме свинца практически не оставалось. Учитывая, что большое количество цезия осело на поверхности контура, можно предположить, что основная часть йода связалась с ним, образовав соединение CsI .

Результаты измерений спектра радионуклидов около поверхности свинцового контура показали, что йод в виде соединения CsI осаждался на поверхностях контура, причем интенсивность осаждения CsI на участках контура с наименьшей температурой была несколько выше.

Стоит отметить, что после повышения температуры экспериментального устройства до 680 °С (на тринадцатые сутки после загрузки йода), активность ^{131}I в свинце выросла. Также было зафиксировано, что количество отложений на участках трубопровода уменьшилось примерно в два раза. Этот эффект, вероятно, связан с тем, что температура контура превысила температуру плавления CsI (634 °С), и часть йода поступила в объем свинца.

Исследования скорости выхода йода из свинца в газ показали, что часть йода находилась не внутри свинцового контура (в объеме свинца и на стальных поверхностях), а на зеркале свинца – границе раздела фаз «свинец – газ». Сравнение полученных скоростей испарения ^{131}I с результатами предыдущего эксперимента (без цезия) показало, что выход йода из свинца в газ стал несколько ниже. Однако однозначного вывода о виде соединения йода (PbI_2 или CsI) невозможно было сделать.

Таблица 1

Отношение активности ^{131}I в контуре экспериментального устройства № 3 (без цезия) и полной активности ^{131}I , первоначально загруженного в установку

Ratio between entered activity of ^{131}I and full activity in lead of ^{131}I during the experiment on facility № 3 (without cesium)

Время после загрузки, сут	Отношение $A_{св}/A_{загр}$, отн. ед.	Примечание
1	0,38	-
4	0,69	Область экспоненциального снижения активности
8	1,29	
12	0,72	
14	1,14	
18	0,80	
21	0,36	-

Таблица 2

Отношение активности ^{131}I в контуре экспериментального устройства № 3 (с цезием) и полной активности ^{131}I , первоначально загруженного в установку

Ratio between entered activity of ^{131}I and full activity in lead of ^{131}I during the experiment on facility № 3 (with cesium)

Время после загрузки, сут	Отношение $A_{\text{св}}/A_{\text{загр}}$, отн. ед.
0,04 (1 час)	$1,2 \cdot 10^{-1}$
2	$2,5 \cdot 10^{-2}$
4	$6,5 \cdot 10^{-3}$
6	$7,5 \cdot 10^{-3}$
8	$2,7 \cdot 10^{-3}$
12	$2,6 \cdot 10^{-3}$
13	$5,4 \cdot 10^{-3}$
15	$4,2 \cdot 10^{-3}$

Эксперимент на реакторном свинцово-газовом экспериментальном устройстве

На реакторном экспериментальном устройстве наработка изотопов йода проходила в топливной таблетке облучательного устройства со свинцом, который был загружен в канал исследовательского реактора ИВВ-2М. Топливная таблетка находилась в нижней части экспериментального устройства в потоке свинца, который циркулировал в устройстве. Длительность эксперимента составила около месяца, его результаты частично представлены в [9]. Температура топливной таблетки во время эксперимента была не более 700 °С, поэтому процессы диффузии в топливе практически не происходили, и продукты деления поступали в свинец только в виде осколков после деления тяжелых ядер.

Во время проведения эксперимента были отобраны три пробы свинца, в которых обнаружены изотопы ^{131}I , ^{132}I , ^{133}I , ^{134}I и ^{135}I , при этом других продуктов деления и коррозии обнаружено не было.

После завершения эксперимента крышка рабочей емкости экспериментального устройства была срезана для измерения активности радионуклидов на поверхности свинца: первый образец был покрыт пленкой черно-коричневого цвета, второй был без пленки. Было обнаружено, что образующаяся поверхностная пленка обладает способностью к сорбированию йода, так как удельная активность ^{131}I в первом образце была

на несколько порядков больше, чем во втором. Также в нем были обнаружены радиоактивные продукты коррозии (во втором образце их обнаружено не было).

Заключение

В условиях работы реакторной установки БРЕСТ-ОД-300 на мощности при анализе возможных соединений йода в свинцовом теплоносителе необходимо учитывать присутствие примесей, которые могут находиться в объеме свинца, осаждаются на поверхностях конструкционных материалов контура и на границе раздела «свинец – защитный газ». С учетом большего выхода цезия, чем йода, при делении тяжелых ядер (приблизительно 9 к 1) возможно образование CsI , которое может влиять на образование PbI_2 .

Из теоретических данных в системе «свинец – йод» следует, что образование молекулярного йода при температурах, соответствующих температурам нормальной эксплуатации реакторной установки БРЕСТ-ОД-300, не происходит. Поэтому при расчетном обосновании радиационной безопасности реакторной установки БРЕСТ-ОД-300 со свинцовым теплоносителем для обеспечения консервативного подхода следует принимать, что йод находится в соединении PbI_2 , так как он обладает большей летучестью по сравнению с соединением CsI .

Литература

1. Долгодворов А. П. Моделирование поведения продуктов деления в нитридном топливе: дис. на соискание уч. степени канд. техн. наук / А. П. Долгодворов; ИБРАЭ РАН. – М., 2017.
2. Драгунов Ю. Г., Лемехов В. В., Смирнов В. С., Чернецов Н. Г. Технические решения и этапы разработки реакторной установки БРЕСТ-ОД-300 // Атомная энергия. 2012. Том 113. Вып. 1. С. 58–64.
3. Zhu X. H. et al. Synthesis and Characterization of PbI_2 Polycrystals. *Crystal Research and Technology*, 2006, vol. 41 (3), pp. 239–242.
4. Konings R. J. M., Kok-Scheele A. and Cordfunke E. H. P. On the Phase Diagrams of the Systems $Pb - PbI_2$, $PbI_2 - NaI$ and $PbI_2 - ZnI_2$. *Thermochimica Acta*, 1995, no. 261, pp. 221–225.
5. Rybak O. V. and Kurilo I. V. Equilibrium Vapor Composition in the PbI_2 System. *Inorganic Materials*, 2002, 38, pp. 735–737.
6. Handbook on Lead-bismuth Eutectic Alloy and Lead Properties, Materials Compability, Thermal-hydraulics and Technologies. OECD 2015, NEA № 7268.
7. Дубенков Н. Е. Экспериментальные исследования скоростей выхода продуктов деления из свинца в газ при условиях эксплуатации РУ БРЕСТ-ОД-300 / Н. Е. Дубенков, М. С. Моркин, В. В. Лемехов, Г. А. Хачересов, В. П. Васюхно, А. В. Барыбин и др. // Инновационные проекты и технологии ядерной энергетики: сб. тезисов докладов V Международной научно-технической конференции (2–5 октября 2018 г.). – М.: НИКИЭТ, 2018. – С. 238–239.
8. Васюхно В. П. Исследование процессов массопереноса продуктов деления топлива и продуктов активации примесей свинцового теплоносителя на комплексе свинцово-газовых петлевых установок / В. П. Васюхно, Н. Е. Дубенков, В. В. Лемехов, М. С. Моркин, Г. А. Хачересов и др. // Инновации в атомной энергетике: сб. докладов Конференции молодых специалистов (23–24 мая 2017 г.). – М.: НИКИЭТ 2017. – С. 322–330.
9. Барыбин А. В., Рычков В. С., Шушлебин В. В., Дубенков Н. Е., Моркин М. С., Хачересов Г. А. Исследование выхода и миграции продуктов деления топлива в системе «топливо – тяжелый жидкометаллический теплоноситель – газ» // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Материаловедение и новые материалы. 2019. Вып. 2 (98). С. 110–118.

References

1. Dolgodvorov A. P. (2017). Modelirovanie povedeniya produktov deleniya v nitridnom toplive [Simulation of Fission Product Behaviour in Nitride Fuel]. Candidate's thesis. Moscow: IBRAE RAN [in Russian].
2. Dragunov Yu. G., Lemekhov V. V., Smirnov V. S., Chernetsov N. G. Tekhnicheskie resheniya i etapy razrabotki reaktornoj ustanovki BREST-OD-300 [Engineering Solutions and Stages in BREST-OD-300 Reactor Development]. *Atomnaya energiya – Atomic Energy*, 2012, vol. 113, issue 1, pp. 58–64.
3. Zhu X. H. et al. Synthesis and Characterization of PbI_2 Polycrystals. *Crystal Research and Technology*, 2006, vol. 41 (3), pp. 239–242.
4. Konings R. J. M., Kok-Scheele A. and Cordfunke E. H. P. On the Phase Diagrams of the Systems $Pb - PbI_2$, $PbI_2 - NaI$ and $PbI_2 - ZnI_2$. *Thermochimica Acta*, 1995, no. 261, pp. 221–225.
5. Rybak O. V. and Kurilo I. V. Equilibrium Vapour Composition in the PbI_2 System. *Inorganic Materials*, 2002, 38, pp. 735–737.
6. Handbook on Lead-bismuth Eutectic Alloy and Lead Properties, Materials Compatibility, Thermal-hydraulics and Technologies. OECD 2015, NEA № 7268.
7. Dubenkov N. E., Morkin M. S., Lemekhov V. V., Khacheresov G. A., Vasyukhno V. P., Barybin A. V. et al. (2018). Eksperimental'nye issledovaniya skorostej vyhoda produktov deleniya iz svinca v gaz pri usloviyah ekspluatatsii RU BREST-OD-300 [Experimental Studies on Rate of Lead-to-Gas Fission Product Release in BREST-OD-300 Operating Conditions]. *Innovacionnye proekty i tekhnologii yadernoj energetiki: sb. tezisov dokladov V Mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoj konferencii (2–5 oktyabrya 2018 g.) – Innovative Designs and Technologies in Nuclear Energy: Book of Abstracts of the V International Scientific and Technical Conference (October 2–5, 2018)*, pp. 238–239. Moscow: NIKIET [in Russian].

8. Vasyukhno V. P., Dubenkov N. E., Lemekhov V. V., Morkin M. S., Khacheresov G. A. et al. (2017). Issledovanie processov massoperenosa produktov deleniya topliva i produktov aktivacii primesej svincovogo teplonosatelya na komplekse svincovo-gazovyh petlevykh ustanovok [Investigation of Mass Transfer Processes in Fission Products and Activation Products of Lead Coolant Impurities at a Suite of Loop-type Lead-Gas Test Facilities]. Innovacii v atomnoj energetike: sb. dokladov Konferencii molodyh specialistov (23–24 maya 2017 g.) – Innovations in Nuclear Energy: Proceedings of the Young Professionals Conference (23–24 May 2017), pp. 322–330. Moscow: NIKIET.

9. Barybin A. V., Rychkov V. S., Shushlebin V. V., Dubenkov N. E., Morkin M. S., Khacheresov G. A. Issledovanie vyhoda i migracii produktov deleniya topliva v sisteme “toplivo – tyazhelyj zhidkometallicheskiy teplonositel’ – gaz” [Studies on Fission Product Release and Migration in a “Fuel – Heavy Liquid Metal Coolant – Gas System”]. Voprosy atomnoj nauki i tekhniki. Ser. Materialovedenie i novye materialy – Nuclear Science and Technology Challenges. Series: Materials Science and New Materials, 2019, issue 2 (98), pp. 110–118.

Сведения об авторах

Дубенков Никита Евгеньевич, начальник группы, Научно-исследовательский и конструкторский институт энерготехники имени Н. А. Доллежала (НИКИЭТ) (107140, Москва, ул. Малая Красносельская, д. 2/8).

Васюхно Владимир Петрович, главный научный сотрудник, Научно-исследовательский и конструкторский институт энерготехники имени Н. А. Доллежала (НИКИЭТ) (107140, Москва, ул. Малая Красносельская, д. 2/8).

Хачересов Григорий Артёмович, старший научный сотрудник, Научно-исследовательский и конструкторский институт энерготехники имени Н. А. Доллежала (НИКИЭТ) (107140, Москва, ул. Малая Красносельская, д. 2/8).

Author credentials

Dubenkov Nikita Evgenievich, Head of Group, N. A. Dollezhal Research and Development Institute of Power Engineering JSC NIKIET (2/8 Malaya Krasnoselskaya st., Moscow, 107140), e-mail: dubenkovne@nikiet.ru.

Vasyukhno Vladimir Petrovich, Chief Researcher, N. A. Dollezhal Research and Development Institute of Power Engineering JSC NIKIET (2/8 Malaya Krasnoselskaya st., Moscow, 107140), e-mail: vasyukhno@nikiet.ru.

Khacheresov Grigory Artyemovich, Senior Researcher, N. A. Dollezhal Research and Development Institute of Power Engineering JSC NIKIET (2/8 Malaya Krasnoselskaya st., Moscow, 107140).

Для цитирования

Дубенков Н. Е., Васюхно В. П., Хачересов Г. А. Возможные соединения йода в свинцовом теплоносителе реактора БРЕСТ-ОД-300 // Ядерная и радиационная безопасность. 2021. № 1 (99). С. 5–13. DOI: 10.26277/SECNRS.2021.99.1.001.

For citation

Dubenkov N. E., Vasyukhno V. P., Khacheresov G. A. Potential Iodine Compounds in the BREST-OD-300 Reactor Lead Coolant. Nuclear and Radiation Safety, 2021, no. 1 (99), pp. 5–13. DOI: 10.26277/SECNRS.2021.99.1.001 [in Russian].

