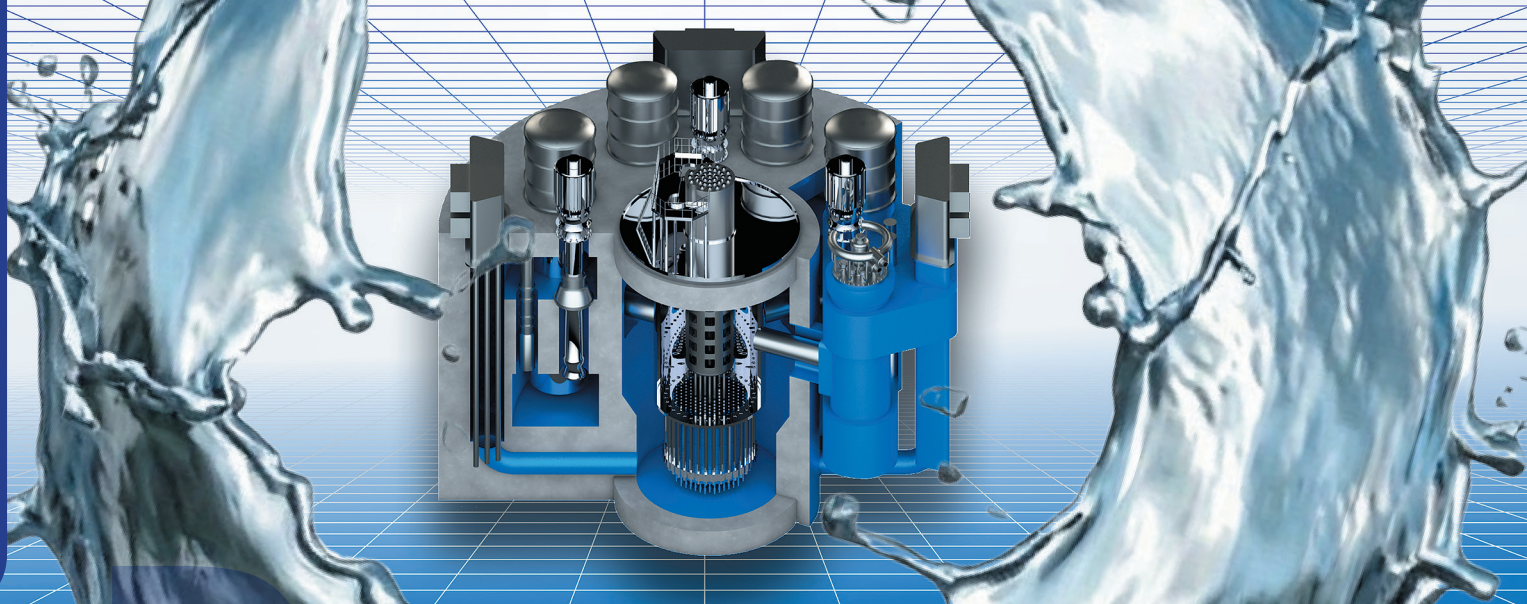




УДК: 621.039.564.5

DOI: 10.26277/SECNRS.2026.121.3.003

© 2026. Все права защищены.

РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОТНОСИТЕЛЬНОЙ СКОРОСТИ ДЕГАЗАЦИИ ГАЗООБРАЗНЫХ ПРОДУКТОВ ДЕЛЕНИЯ В ГАЗЛИФТНОМ ЗОНДЕ РЕАКТОРНОЙ УСТАНОВКИ БРЕСТ-ОД-300

Головлева А. М.* (golovleva_am@nikiet.ru),
Драгунова А. В.* (dragunova_av@nikiet.ru),
Моркин М. С.*, **, канд. техн. наук (morkin@nikiet.ru)

Статья поступила в редакцию 27 июля 2026 г.

Аннотация

В статье рассмотрена система контроля герметичности оболочек твэлов, предусмотренная для обнаружения факта разгерметизации твэла и оценки влияния дефекта на приближение к проектным пределам в реакторной установке БРЕСТ-ОД-300. В ее состав входит система контроля активности теплоносителя по инертным газам, обеспечивающая измерение нуклидного состава и активности газообразных продуктов деления (ГПД) в газеносителе, подаваемом через свинцовый теплоноситель (СТ) с помощью газлифтных зондов (ГЛЗ). ГЛЗ предназначен для транспортировки короткоживущих радиоактивных инертных газов – продуктов деления от газоуловителя, размещенного под уровнем СТ на участке выхода потока СТ из активной зоны, к моноблочному гамма-спектрометрическому устройству, размещенному над верхним перекрытием корпуса блока реакторного в центральном зале.

Для оценки реакции системы контроля активности теплоносителя по инертным газам реакторной установки БРЕСТ-ОД-300 на постулируемые сценарии разгерметизации твэла составлена расчетная модель дегазации ГПД. Расчетная модель подготовлена с учетом экспериментальных данных как по гидродинамическим параметрам ГЛЗ, так и данных по дегазации ГПД из СТ при параметрах СТ, соответствующих нормальной эксплуатации реакторной установки.

► **Ключевые слова:** относительная скорость дегазации, дефект оболочки твэла, система контроля герметичности оболочек твэлов, газлифтный зонд, газообразные продукты деления, система контроля активности теплоносителя, свинцовый теплоноситель, реакторная установка БРЕСТ-ОД-300.

* Научно-исследовательский и конструкторский институт энерготехники имени Н. А. Доллежалея (АО «НИКИЭТ»), Москва, Россия.

** Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва, Россия.

COMPUTATIONAL AND EXPERIMENTAL DETERMINATION OF THE RELATIVE FISSION GAS REMOVAL RATE IN THE GAS-LIFT PROBE OF THE BREST-OD-300 REACTOR FACILITY

Golovleva A. M.*,
Dragunova A. V.*,
Morkin M. S.*,**, Ph. D. (Engineering)

The article was received by the editors' crew on July 27, 2026.

Abstract

The article describes the fuel cladding leak detection system to detect the loss of a fuel rod integrity and to assess whether the defect leads to the reactor parameters approaching the design limits of the BREST-OD-300 reactor facility. The fuel cladding leak detection system includes a coolant activity monitoring system for inert gases, which allows measurements of the nuclide composition and gaseous fission products (GFP) activity in the carrier gas supplied by the gas-lift probes (GLP) via lead coolant (LC). A GLP is designed to transport short-lived radioactive inert gases, outcoming as fission products from the gas trap arranged below the lead coolant level in the core outlet area for LC stream, to a single-unit gamma spectrometer installed above the upper plate of the reactor vessel in the central hall.

To assess the response of the BREST-OD-300 coolant activity monitoring system for inert gases to the postulated scenarios with the loss of the fuel rod integrity, a computational model of the GFP removal was developed. The computational model was prepared taking into account both experimental data for the hydrodynamic parameters of the gas-lift probe and data on the GFP removal from LC under the LC parameters corresponding to normal operation of the reactor facility.

► **Keywords:** *relative gas removal rate, fuel cladding defect, fuel cladding leak detection system, GLP, gaseous fission products, coolant activity monitoring system, lead coolant, BREST-OD-300 reactor facility.*

* N. A. Dollezhal Research and Development Institute of Power Engineering, Joint Stock Company (NIKIET JSC), Moscow, Russia.

** National research university "MPEI", Moscow, Russia.

Введение

Опытно-демонстрационная реакторная установка (РУ) на быстрых нейтронах со свинцовым теплоносителем БРЕСТ-ОД-300 создается как прототип коммерческих реакторных установок ядерной энергетики с замкнутым ядерным топливным циклом [1]. В процессе работы РУ на мощности в топливе нарабатываются продукты деления, значительную часть которых составляют стабильные и радиоактивные изотопы инертных газов – криптона и ксенона. В случае нарушения герметичности оболочки твэла эти газы попадают в свинцовый теплоноситель (СТ) в форме пузырей.

Для обнаружения факта разгерметизации твэла и оценки влияния дефекта на приближение к установленным пределам предусмотрена система контроля герметичности оболочек твэлов (КГО) [2]. В состав системы КГО входит система контроля активности теплоносителя по инертным газам (СКАТ), обеспечивающая непрерывное измерение нуклидного состава и активности газообразных продуктов деления (ГПД) в газе-носителе, подаваемом через СТ с помощью газлифтных зондов (ГЛЗ) [2]. ГЛЗ предназначен для транспортировки короткоживущих радиоактивных инертных газов – продуктов деления от газоуловителя, размещенного под уровнем СТ на участке выхода потока СТ из активной зоны, к моноблочному гамма-спектрометрическому устройству, размещенному над верхним перекрытием корпуса блока реакторного в центральном зале.

Принцип работы ГЛЗ заключается в создании циркуляции теплоносителя за счет барботажа газа-носителя (аргона). Аргон подается из системы контроля активности газа по раздающему коллектору, размещенному на наружной поверхности защитного колпака. Через соединительный трубопровод, штуцер подачи газа и барботажную трубку газ поступает в нижнюю часть зонда под давлением, достаточным для образования пузырей на нижнем конце барботажной трубки.

Движение сред в ГЛЗ можно разделить на несколько этапов:

1. **Образование двухфазного потока.** Пузыри аргона, достигнув отрывного диаметра на нижнем конце барботажной трубки (рис. 1, поз. 1), попадают в кольцевой канал подъема газожидкостной смеси (рис. 1, поз. 2), образованный внутренней барботажной трубкой и внешней коаксиальной трубой.

2. **Возникновение циркуляции.** При непрерывном барботировании возникает подъемное течение теплоносителя за счет конвекции, обусловленной

разницей плотностей теплоносителя с пузырями газа и без них в остальном объеме контура.

3. **Подъем и захват газообразных продуктов деления.** Создаваемое непрерывное течение приводит к подъемному движению теплоносителя из газоуловителя (рис. 1, поз. 3) и захвату из него ГПД в растворенной и пузырьковой форме. По мере подъема газожидкостной смеси ГПД из теплоносителя объединяются с пузырьками газа-носителя. Пузырьки проходят по каналу подъема от нижнего конца барботажной трубки до газовой полости зонда (рис. 1, поз. 4).

4. **Сепарация и измерение.** Выходя на свободную поверхность теплоносителя внутри зонда, газ-носитель вместе с захваченными ГПД по трубке подъема газа поступает в измерительную емкость зонда, где выполняется спектрометрический анализ активности.

5. **Возврат потоков.** Теплоноситель через нижние отверстия в корпусе зонда (рис. 1, поз. 5) возвращается в объем верхней камеры блока реактора. Газ, содержащий радионуклиды, из измерительной емкости возвращается через трубку отвода газа и верхние боковые отверстия в корпусе зонда в газовый объем блока реакторного.

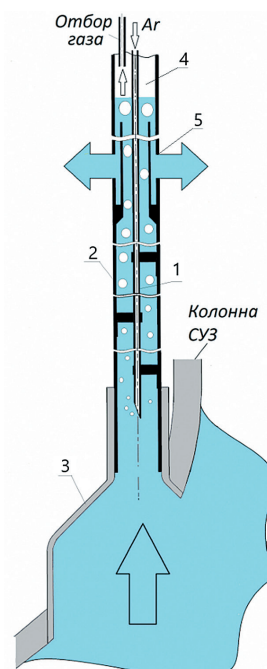


Рис. 1. Схема газлифтного зонда: 1 – барботажная трубка; 2 – подъемный кольцевой канал; 3 – газоуловитель; 4 – газовая полость; 5 – нижние отверстия для возврата теплоносителя. Стрелками показано направление потоков.

Адаптировано из [3]

[Fig. 1. Schematic diagram of the gas-lift probe: 1 – bubbling tube; 2 – annular lifting channel; 3 – gas trap; 4 – gas cavity; 5 – bottom openings for coolant return. The arrows show flow directions. Adapted from [3]

Расчет константы дегазации газообразных продуктов деления в газлифтном зонде

Для расчетного определения ожидаемых показаний гамма-спектрометра СКАТ на различные постулируемые сценарии разгерметизации твэлов в активной зоне РУ требуется значение относительной скорости дегазации ГПД (константа дегазации) $\mu_{\text{ГПД}}$. Сигнал гамма-спектрометра определяется объемной активностью ГПД в газе-носителе, которая зависит от скорости перехода ГПД из теплоносителя в газ, характеризуемой константой дегазации $\mu_{\text{ГПД}}$.

Данная константа является отношением скорости выхода растворенных ГПД из теплоносителя к их полной активности в теплоносителе:

$$\mu_{\text{ГПД}} = \frac{V_{\text{вых}}}{A_{\text{ст}}}, \quad (1)$$

где $V_{\text{вых}}$ – скорость выхода i -го изотопа из теплоносителя, $A_{\text{ст}}$ – его полная активность в теплоносителе.

Выход ГПД из теплоносителя происходит через межфазную поверхность «свинец – газовый пузырь» за счет диффузии в пограничном слое пузыря.

Согласно закону Фика, плотность диффузионного потока ГПД из свинца в газовый пузырь пропорциональна градиенту объемных активностей на границе раздела фаз [4]:

$$j = D \cdot \frac{a_{\text{ст}} - a_{\text{газа}}}{\delta_{\text{пуз}}}, \quad (2)$$

где j – плотность диффузионного потока Бк/(м²·с);

D – коэффициент диффузии ГПД в свинце, см²/с;

$a_{\text{ст}}$ – объемная активность инертных радиоактивных газов в теплоносителе, Бк/см³;

$a_{\text{г}}$ – активность газа в пузыре, Бк/см³ (в условиях ГЛЗ является пренебрежимо малой по сравнению с $a_{\text{ст}}$);

$\delta_{\text{пуз}}$ – толщина пограничного слоя на пузыре газа, см.

Согласно [4], диффузионный поток активности инертных радиоактивных газов определяется как:

$$J = \frac{D \cdot (a_{\text{ст}} - a_{\text{г}}) \cdot S_{\text{пуз}}}{\delta_{\text{пуз}}}, \quad (3)$$

где $S_{\text{пуз}} = 450 \text{ см}^2$ – площадь межфазной поверхности аргона в ГЛЗ, определенная в соответствии с гидравлической моделью ГЛЗ [3].

Толщина пограничного слоя теплоносителя на пузыре газа [4] рассчитывается с помощью формулы [5]:

$$\delta_{\text{пуз}} = \sqrt{\frac{\nu \cdot r_{\text{пуз}}}{U}}, \quad (4)$$

где ν – кинематическая вязкость свинца;

$r_{\text{пуз}}$ – радиус пузыря;

U – скорость всплытия пузыря.

Подставив в (4) параметры пузырей в ГЛЗ, определенные в [3], получим:

$$\delta_{\text{пуз}} = 9 \cdot 10^{-3} \text{ см.}$$

В [3] для оценки коэффициента диффузии ГПД рекомендована формула Эйнштейна-Стокса [6]:

$$D = \frac{kT}{6\pi r \mu}, \quad (5)$$

где $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ – постоянная Больцмана, Дж/К;

$T = 808$ – температура свинца, К [1];

r – радиус атома диффундирующего газа (ксенона), м;

$\mu = 1,7 \cdot 10^{-3}$ – динамическая вязкость свинца, Па·с.

Подстановка в (5) значений для СТ дает теоретическое значение коэффициента диффузии ксенона в свинце $3 \cdot 10^{-5} \text{ см}^2/\text{с}$. Тогда диффузионный поток активности, рассчитанный по (3), составит $J = 1,4 \cdot a_{\text{ст}}$.

Относительная скорость дегазации растворенных в СТ ГПД в ГЛЗ:

$$\mu_{\text{ГПД}} = \frac{J}{A} = \frac{J}{a_{\text{ст}} \cdot V_{\text{СТ}}^{\text{ГЛЗ}}} = \frac{1,4 \cdot a_{\text{ст}}}{a_{\text{ст}} \cdot 5500} = 2,5 \cdot 10^{-4} \frac{1}{\text{с}}, \quad (6)$$

где $V_{\text{СТ}}^{\text{ГЛЗ}}$ – объем свинца в ГЛЗ, см³.

Необходимо отметить, что полученное значение скорости дегазации ксенона применимо и для криптона как консервативно заниженное. В соответствии с формулой (5) константа дегазации криптона будет чуть выше, чем ксенона, из-за меньшего радиуса атома, а значит, большего коэффициента диффузии.

Для экспериментальной проверки применимости формулы (5) для определения коэффициента диффузии ГПД в условиях РУ с СТ использовались данные, полученные при реакторных исследованиях на свинцово-газовой петлевой установке [7, 8].

Экспериментальные исследования

Исследования дегазации ГПД из СТ выполнены на реакторной свинцово-газовой петлевой установке, размещенной на исследовательском ядерном реакторе «ИВВ-2М» в АО «ИРМ» (г. Заречный) [7, 8]. Основная цель экспериментов заключалась в получении данных о массопереносе продуктов деления из СТ в газовую среду при параметрах, соответствующих условиям нормальной эксплуатации РУ БРЕСТ-ОД-300.

Установка (рис. 2) состоит из двух основных циркуляционных контуров: свинцового и газового, а также облучательного устройства (ОУ) с топливной таблеткой.

Облучательное устройство размещается в канале отражателя реактора «ИВВ-2М» и содержит таблетку ядерного топлива [7]. В процессе работы реактора в таблетке нарабатываются продукты деления, которые выходят в протекающий через ОУ свинец за счет процессов отдачи.

Свинцовый контур включает трубопроводы, соединяющие ОУ с рабочей емкостью, циркуляционный насос и рабочую емкость [7, 8].

Рабочая емкость (рис. 3, 4) представляет собой цилиндрический сосуд. В верхней части емкости установлена тарелка диаметром 100 мм, ориентированная выпуклой стороной вверх таким образом, что ее края направлены вниз. В центре тарелки имеется отверстие, через которое проходит трубопровод подачи свинца [9].

Свинец, поступающий из свинцового контура по этому трубопроводу снизу вверх, попадает на тарелку, растекается по ее поверхности тонким слоем и стекает с краев вниз, заполняя рабочую емкость. Такая конструкция обеспечивает развитую поверхность контакта свинца с газовой средой, что способствует выходу растворенных ГПД из теплоносителя в объем газа-носителя.

Уровень свинца в емкости поддерживается на отметке около 80 мм от дна, при этом тарелка находится выше уровня свинца. Отвод газа, насыщенного ГПД, осуществляется из верхней части емкости. Далее газ поступает в измерительный участок газового контура. Свинец через нижние отверстия в корпусе рабочей емкости возвращается в свинцовый контур.

Газовый контур заполняется гелием и включает трубопроводы, измерительный участок для гамма-спектрометрии, позволяющий проводить гамма-спектрометрические измерения активности ГПД, адсорбер для удаления паров воды и побудитель расхода.

Оценка скорости наработки продуктов деления в топливной таблетке и ее активности на момент проведения экспериментов проводилась с помощью программных средств, использующих при расчете метод Монте-Карло [7].

Активность ГПД в газовом контуре измерялась с помощью гамма-спектрометра с германиевым детектором в пробах газа, которые отбирались в вакуумированные емкости.

Валидация расчетной модели

Согласно [4], относительная скорость дегазации теплоносителя в петлевой установке:

$$\mu_0 = \frac{kTS}{6\pi r\mu_{\text{пс}}V_{\text{ст}}} = \frac{D \cdot S}{\delta_{\text{пс}} \cdot V_{\text{ст}}}, \quad (7)$$

где k – постоянная Больцмана, Дж/К;

T – температура свинца, К;

r – радиус атома ксенона, м;

μ – динамическая вязкость свинца, Па·с;

$\delta_{\text{пс}}$ – толщина пограничного слоя на зеркале СТ, м;

S – площадь зеркала теплоносителя в рабочей емкости установки, м²;

$V_{\text{ст}}$ – объем свинца в контуре установки, м³.

Площадь зеркала теплоносителя в рабочей емкости реакторной свинцово-газовой петлевой установки:

$$S = \frac{\pi d_{\text{тар}}^2}{4}, \quad (8)$$

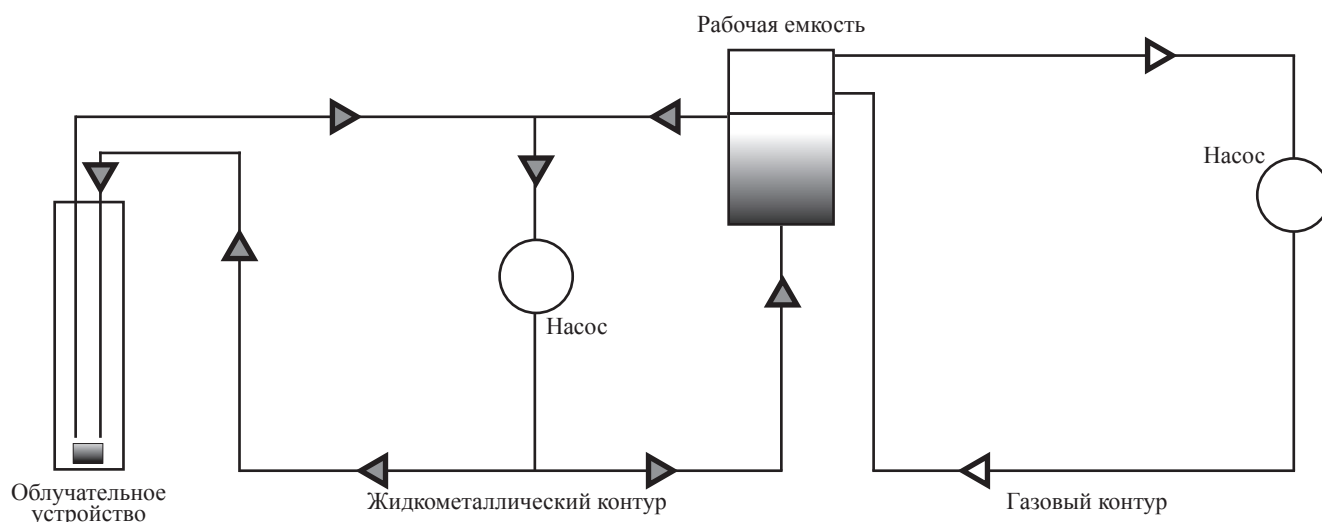


Рис. 2. Принципиальная схема реакторной свинцово-газовой петлевой установки [8]
[Fig. 2. Schematic diagram of the lead-gas loop reactor facility [8]]

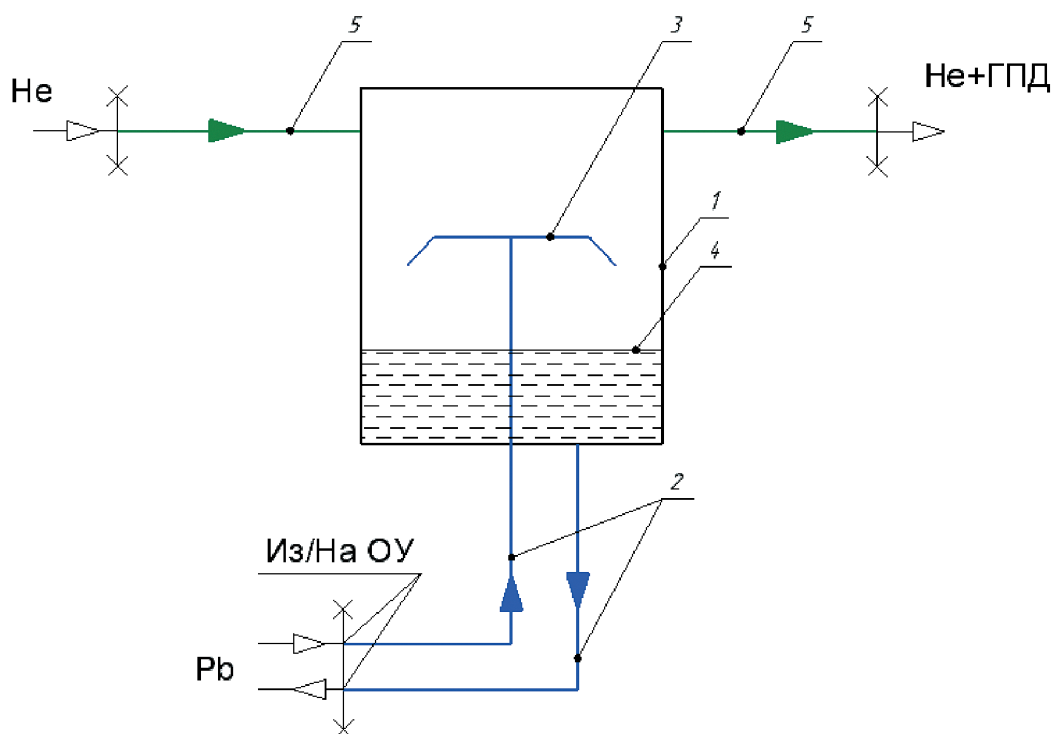


Рис. 3. Принципиальная схема рабочей емкости с подводящими и отводящими свинцово-газовыми трубопроводами экспериментальной установки: 1 – рабочая емкость; 2 – трубопровод подачи/отдачи свинцового контура; 3 – тарелка; 4 – уровень жидкого свинца в рабочей емкости; 5 – подвод/отвод газового контура.

Стрелками показано направление потоков

[Fig. 3. Schematic diagram of the reservoir with the supply and discharge pipes of the experimental facility:
1 – reservoir; 2 – lead coolant supply/discharge pipes; 3 – tray; 4 – liquid lead level in the reservoir; 5 – gas circuit inlet/outlet.
The arrows show flow directions]

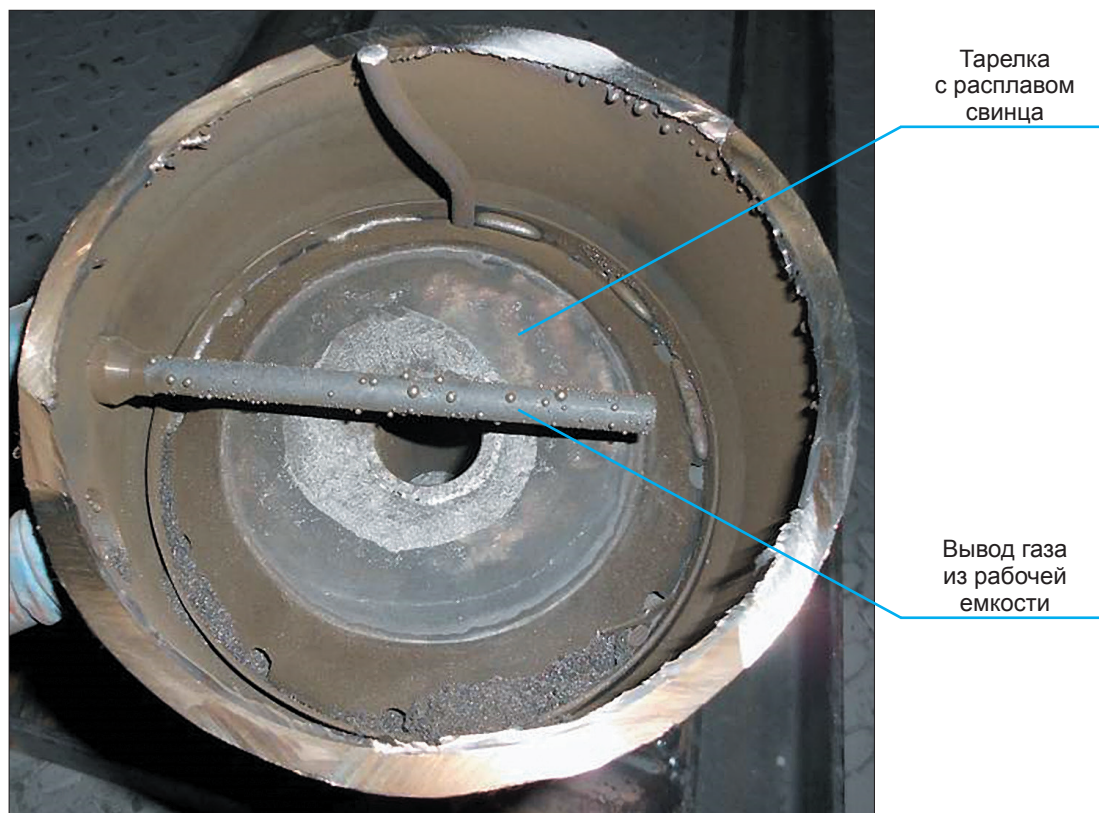


Рис. 4. Разделка рабочей емкости после завершения эксперимента
[Fig. 4. Reservoir cut after the experiment]

где $d_{\text{тар}}$ – диаметр тарелки, расположенной в центре рабочей емкости [8, 9].

Оценка толщины пограничного слоя $\delta_{\text{пс}}$ может быть выполнена исходя из гидродинамических условий на границе раздела фаз. Движение жидко-металлического теплоносителя у свободной поверхности носит нестационарный характер, сопровождающийся волнообразованием. В таком режиме, согласно [10], толщина пограничного слоя определяется выражением:

$$\delta_{\text{пс}} = \sqrt{\frac{2\mu}{\omega\rho}}, \quad (9)$$

где $\omega = \frac{u}{\lambda}$ – угловая частота колебаний, с^{-1} ;
 μ – динамическая вязкость свинца, $\text{Па}\cdot\text{с}$;
 ρ – плотность СТ, $\text{кг}/\text{м}^3$.
 Фазовая скорость волны:

$$u = \sqrt[4]{\frac{4g\sigma}{\rho}} = \sqrt[4]{\frac{4 \cdot 9,81 \cdot 0,433}{10\,500}} = 0,201 \frac{\text{м}}{\text{с}}, \quad (10)$$

где σ – коэффициент поверхностного натяжения, $\text{Н}/\text{м}$, а g – ускорение свободного падения, $\text{м}/\text{с}^2$.

Характерная длина волны:

$$\lambda = 2\pi \cdot \sqrt{\frac{\sigma}{\rho g}} = 2\pi \cdot \sqrt{\frac{0,433}{10\,500 \cdot 9,81}} = 0,013 \text{ м}. \quad (11)$$

Тогда угловая частота колебаний:

$$\omega = \frac{u}{\lambda} = \frac{0,201}{0,013} = 15,57 \text{ с}^{-1}. \quad (12)$$

Соответственно, толщина пограничного слоя:

$$\delta_{\text{пс}} = \sqrt{\frac{2\mu}{\omega\rho}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 1,764 \cdot 10^{-3}}{15,57 \cdot 10\,500}} = 1,469 \cdot 10^{-4} \text{ м}. \quad (13)$$

Тогда коэффициент диффузии ГПД в свинцовом теплоносителе, полученный по данным эксперимента:

$$D_3 = \frac{\mu_0 \delta_{\text{пс}} V_{\text{СТ}}}{S}, \quad (14)$$

где $\mu_0 = \frac{A_{\text{Г}}^i}{A_{\text{СТ}}^i \tau}$ – экспериментально определенная константа дегазации;

$A_{\text{Г}}^i$ – активность i -го ГПД в газовой части рабочей емкости, Бк;

$A_{\text{СТ}}^i$ – активность i -го ГПД в свинцовом теплоносителе, Бк;

τ – время эксперимента, с.

Среднее значение D , полученное по экспериментальным данным, согласуется с теоретическим значением, определяемым по формуле (5), отклонение составляет не более 7 %.

Используемая диффузионная модель описывает процесс перехода ГПД через границу раздела фаз «жидкость – газ» в условиях, когда движущей силой массопереноса является градиент концентрации на границе раздела. В ядре потока теплоносителя радионуклиды продуктов деления подерживаются равномерно распределенными за счет турбулентного перемешивания, а их перенос к межфазной поверхности и переход через границу раздела ограничивается молекулярной диффузией через концентрационный пограничный слой. Поскольку определяющим механизмом является диффузионное сопротивление приграничной области, коэффициент диффузии не зависит от конкретной гидродинамической обстановки, а именно: стекания пленки или барботажа пузырей. Поэтому валидированное на петлевой установке значение коэффициента диффузии может быть использовано для определения константы дегазации по формуле (7) в условиях ГЛЗ, где массоперенос осуществляется через поверхность всплывающих пузырей.

Заключение

Для оценки реакции системы контроля активности теплоносителя по инертным газам РУ БРЕСТ-ОД-300 на постулируемые сценарии разгерметизации твэла составлена расчетная модель дегазации ГПД, которая подготовлена с учетом экспериментальных данных как по гидродинамическим параметрам газлифтного зонда, так и данных по дегазации ГПД из СТ при параметрах СТ, соответствующих нормальной эксплуатации РУ. Экспериментальные и теоретические значения коэффициента диффузии ксенона в свинце удовлетворительно согласовываются. Валидированное значение коэффициента диффузии может быть использовано для расчета константы дегазации ГПД в ГЛЗ.

Литература

1. Адамов Е. О., Каплиенко А. В., Орлов В. В., Смирнов В. С., Лопаткин А. В., Лемехов В. В., Моисеев А. В. Быстрый реактор со свинцовым теплоносителем БРЕСТ: от концепции к реализации технологии // Атомная энергия. 2020. Т. 129. Вып. 4. С. 185–194.

2. Моркин М. С., Драгунова А. В., Перевезенцев В. В., Гордиенко А. А., Дербенева Н. В., Крылова Д. Д. Система контроля герметичности оболочек твэлов реакторной установки с БРЕСТ-ОД-300 // Атомная энергия. 2025. Т. 138. № 6. С. 351–357.
3. Верещагина Т. Н., Лемехов В. В., Моркин М. С. Гидравлика газлифтного зонда со свинцовым теплоносителем // Вопросы атомной науки и техники. Ядерно-реакторные константы. 2021. Вып. 1. С. 124–134.
4. Михайлов А. Ю., Гончар Н. И. Определение характеристик дегазации жидкометаллического теплоносителя первого контура / Научно-техническая конференция «Теплофизические экспериментальные и расчетно-теоретические исследования в обоснование характеристик и безопасности ядерных реакторов на быстрых нейтронах». – Обнинск, октябрь 2014.
5. Левич В. Г. Физико-химическая гидродинамика / Сер.: Нефтегазовый инжиниринг. – Изд. 3-е, испр. и доп. – М., Ижевск: Газпром нефть, Институт компьютерных исследований, 2016. – 686 с.
6. Бабичев А. П., Бабушкина Н. А., Братковский А. М. и др. Физические величины: справочник / Под ред. И. С. Григорьева, Е. З. Мейлихова. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 1232 с.
7. Васюхно В. П., Дубенков Н. Е., Лемехов В. В., Моркин М. С., Хачересов Г. А., Рычков В. С., Шушлебин В. В. Исследование процессов массопереноса продуктов деления топлива и продуктов активации примесей свинцового теплоносителя на комплексе свинцово-газовых петлевых установок: доклад. – М.: АО «НИКИЭТ», 2017.
8. 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. Материаловедение и новые материалы. 2019. № 2 (98). С. 110–118.
9. Дубенков Н. Е. Определение параметров массопереноса цезия и йода в свинцовом теплоносителе реакторных установок: дис. канд. техн. наук. – М.: АО «НИКИЭТ», 2025. – 135 с.
10. Фабер Т. Е. Гидродинамика. – М.: изд-во «Постмаркет», 2001. – С. 57, 211, 216.

References

1. Adamov Ye. O., Kapliencko A. V., Orlov V. V., Smirnov V. S., Lopatkin A. V., Lemekhov V. V., Moiseyev A. V. (2020). Bystryi reaktor so svintsovim teplonositelem BREST: ot kontseptsii k realizatsii tekhnologii [BREST lead-cooled fast reactor: from the concept to the technology implementation]. Atomnaya energiya – Atomic Energy, vol. 129, iss. 4, pp. 185–194. [in Russian].
2. Morkin M. S., Dragunova A. V., Perevezentsev V. V., Gordienko A. A., Derbeneva N. V., Krylova D. D. (2025). Sistema kontrolya germetichnosti obolochek tvehlov reaktornoj ustanovki s BREST-OD-300 [BREST-OD-300 fuel cladding leak detection system]. Atomnaya energiya – Atomic Energy, vol. 138, No. 6, pp. 351–357. [in Russian].
3. Vereshchagina T. N., Lemekhov V. V., Morkin M. S. (2021). Gidravlika gazliftnogo zonda so svintsovim teplonositelem [Hydraulics of the gas-lift probe with lead coolant]. Voprosy atomnoy nauki i tekhniki. Yaderno-reaktornyie konstanty – Issues of nuclear science and technology. Nuclear reactor constants, Iss. 1, pp. 124–134. [in Russian].
4. Mikhaylov A. Yu., Gonchar N. I. (2014). Opreделение kharakteristik degazatsii zhidkometallichesкого teplonositelya pervogo kontura [Determination of degassing characteristics of primary liquid metal coolant]. Nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya “Teplofizicheskie ehksperimental'nye i raschetno-teoreticheskie issledovaniya v obosnovanie kharakteristik i bezopasnosti yadernykh reaktorov na bystrykh neitronakh” – Scientific and technical conference “Thermophysical experiments and computational and theoretical studies to justify the performance and safety of fast nuclear reactors” (Obninsk, October, 2014). [in Russian].
5. Levich V. G. (2016). Fiziko-khimicheskaya gidrodinamika. Ser.: Neftgazovyi inzhiniring [Physicochemical hydrodynamics. Ser.: Oil and gas engineering]. Moscow, Izhevsk: Gazprom Neft, Institute of Computer Research, 686 p. [in Russian].
6. Babichev A. P., Babushkina N. A., Bratkovskiy A. M. et al. (1991). I. S. Grigoriev, Ye. Z. Meylikhov (Eds.). Fizicheskie velichiny [Physical values]. Handbook. Moscow: Energoatomizdat publishing house, 1232 p. [in Russian].
7. Vasyukhno V. P., Dubenkov N. Ye., Lemekhov V. V., Morkin M. S., Khacheresov G. A., Rychkov V. S., Shushlebin V. V. (2017). Issledovanie protsessov massoperenosa produktov deleniya topliva i produktov aktivatsii primesei svintsovogo teplonositelya na komplekse svintsovo-gazovykh petlevykh ustanovok [Study of mass

transfer processes of fuel fission products and lead coolant impurity activation products at an integrated lead-gas loop facility]. Report. Moscow: NIKIET JSC. [in Russian].

8. Barybin A. V., Rychkov V. S., Shushlebin V. V., Dubenkov N. E., Morkin M. S., Khacheresov G. A. (2019). Issledovanie vykhoda i migratsii produktov deleniya topliva v sisteme “toplivo – tyazhelyi zhidkometallicheskii teplonositel'-gaz” [Investigation of fuel fission product release and migration in the “fuel – heavy liquid-metal coolant – gas system”]. Voprosy atomnoi nauki i tekhniki. Materialovedenie i novye materialy – Problems of atomic science and technology. Materials science and new materials, No. 2 (98), pp. 110–118.

9. Dubenkov N. Ye. (2025). Opredelenie parametrov massoperenosa tseziya i ioda v svintsovom teplonositele reaktornykh ustanovok [Determination of the cesium and iodine mass transfer parameters in lead coolants of reactor plants]. Candidate's thesis in engineering. Moscow: NIKIET JSC, 135 p. [in Russian].

10. Faber T. E. (2001). Gidrodinamika [Hydrodynamics]. Moscow: Postmarket publishing house, pp. 57, 211, 216. [in Russian].

Сведения об авторах

Головлева Алёна Михайловна, техник, Научно-исследовательский и конструкторский институт энерготехники имени Н. А. Доллежала (АО «НИКИЭТ») (107140, Москва, вн. тер. г. муниципальный округ Красносельский, ул. Малая Красносельская, д. 2/8).

Драгунова Анастасия Витальевна, инженер-конструктор 2 категории, Научно-исследовательский и конструкторский институт энерготехники имени Н. А. Доллежала (АО «НИКИЭТ») (107140, Москва, вн. тер. г. муниципальный округ Красносельский, ул. Малая Красносельская, д. 2/8).

Моркин Михаил Сергеевич, ведущий инженер-конструктор, Научно-исследовательский и конструкторский институт энерготехники имени Н. А. Доллежала (АО «НИКИЭТ») (107140, Москва, вн. тер. г. муниципальный округ Красносельский, ул. Малая Красносельская, д. 2/8); Национальный исследовательский университет «МЭИ» (111250, Москва, ул. Красноказарменная, д. 14, стр. 1).

Authors credentials

Golovleva Alyona Mikhaylovna, Assistant Engineer, N. A. Dollezhal Research and Development Institute of Power Engineering, Joint Stock Company (NIKIET JSC) (2/8 Malaya Krasnoselskaya str., vn. ter. g. municipalnyi okrug Krasnoselskii, Moscow, 107140), e-mail: golovleva_am@nikiet.ru.

Dragunova Anastasiya Vitalievna, Category 2 Design Engineer, N. A. Dollezhal Research and Development Institute of Power Engineering, Joint Stock Company (NIKIET JSC) (2/8 Malaya Krasnoselskaya str., vn. ter. g. municipalnyi okrug Krasnoselskii, Moscow, 107140), e-mail: dragunova_av@nikiet.ru.

Morkin Mikhail Sergeyevich, Leading Design Engineer, N. A. Dollezhal Research and Development Institute of Power Engineering, Joint Stock Company (NIKIET JSC) (2/8 Malaya Krasnoselskaya str., vn. ter. g. municipalnyi okrug Krasnoselskii, Moscow, 107140); National research university “MPEI” (14 bld. 1, Krasnokazarmennaya str., Moscow, 111250), e-mail: morkin_ms@nikiet.ru.

Для цитирования

Головлева А. М., Драгунова А. В., Моркин М. С. Расчетно-экспериментальное определение относительной скорости дегазации газообразных продуктов деления в газлифтном зонде реакторной установки БРЕСТ-ОД-300 // Ядерная и радиационная безопасность. 2026. № 3 (121). С. 32–40. DOI: 10.26277/SECNRS.2026.121.3.003.

For citation

Golovleva A. M., Dragunova A. V., Morkin M. S. (2026). Raschetno-eksperimental'noe opredelenie odnositel'noi skorosti degazatsii gazoobraznykh produktov deleniya v gazliftnom zonde reaktornoj ustanovki BREST-OD-300 [Computational and experimental determination of the relative fission gas removal rate in the gas-lift probe of the BREST-OD-300 reactor facility]. Yadernaya i radiatsionnaya bezopasnost' – Nuclear and Radiation Safety Journal, No. 3 (121), pp. 32–40. [in Russian]. DOI: 10.26277/SECNRS.2026.121.3.003.