

# ОСОБЕННОСТИ МЕТОДОВ КОНТРОЛЯ ГЕРМЕТИЧНОСТИ ОБОЛОЧЕК ТВЭЛОВ РЕАКТОРОВ НА БЫСТРЫХ НЕЙТРОНАХ СО СВИНЦОВЫМ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕМ

А.В. Драгунова \*, \*\*, М.С. Моркин\*, В.В. Перевезенцев\*\*

\* АО «НИКИЭТ»

107140, г. Москва, ул. Малая Красносельская, д. 2/8

\*\* МГТУ им. Н.Э. Баумана

105005, г. Москва, ул. 2-я Бауманская, д. 5, стр. 1



Для своевременного обнаружения разгерметизированных твэлов в реакторной установке (РУ) должна быть предусмотрена система контроля герметичности оболочек твэлов (СКГО). В реакторах с тяжелым жидкометаллическим теплоносителем (ТЖМТ) наиболее эффективным является контроль герметичности оболочек твэлов по детектированию газообразных продуктов деления (ГПД).

Рассмотрены принципы построения СКГО в реакторах с жидкометаллическим теплоносителем, основанные на детектировании продуктов деления и запаздывающих нейтронов. Отмечено, что в РУ с ТЖМТ наиболее эффективным является контроль герметичности оболочек твэлов (КГО) по ГПД. Показаны различные аспекты поведения продуктов деления в РУ с ТЖМТ, такие как перемещение ГПД в растворенном и пузырьковом виде по контуру, сорбция летучих ПД в свинцовом теплоносителе (СТ) и на поверхностях элементов конструкций, дегазация растворенных в СТ ГПД и фильтрация защитного газа от аэрозольных частиц различной природы.

Описаны общие представления об условиях переноса ГПД в среде СТ разрабатываемой реакторной установки и математическая модель, позволяющая определить расчётную активность реперных радионуклидов в каждом блоке РУ в любой момент времени после разгерметизации твэла, на основе которой будут предложены способы КГО по активности газа в газовых объёмах РУ.

**Ключевые слова:** БРЕСТ, контроль герметичности оболочек твэлов, свинцовый теплоноситель, твэл, дефект оболочки, продукты деления, инертные радиоактивные газы, двухфазные течения, всплытие пузырей, диффузия, дегазация, математическая модель.

## ВВЕДЕНИЕ

Разработка РУ БРЕСТ-ОД-300 с нитридным уран-плутониевым топливом и свинцовым теплоносителем ведется с целью обоснования возможности развития крупномасштабной ядерной энергетики с быстрыми реакторами, которая могла бы решить задачи сня-

© А.В. Драгунова, М.С. Моркин, В.В. Перевезенцев, 2021

тия ограничений по топливным ресурсам, исключения тяжелых аварий на АЭС и замыкания ядерного топливного цикла с обеспечением экономической конкурентоспособности [1].

Основной целью достижения безопасности для современных РУ является предотвращение выхода радиоактивных продуктов за пределы физических барьеров, к которым относятся топливная матрица, оболочка твэла, граница контура теплоносителя реактора и т. д. [2].

В связи с ограничением дозовой нагрузки на население проектом регламентируется максимально возможное количество (в %) газонеплотных и имеющих контакт топлива с теплоносителем твэлов, так как при разгерметизации твэлов некоторое количество продуктов деления выходит в теплоноситель, повышая его радиоактивность.

В соответствии с современными нормами в области атомной энергетики для того, чтобы определить количество разгерметизированных твэлов, их расположение и вид дефекта оболочки, в РУ БРЕСТ должна быть предусмотрена система контроля герметичности оболочек твэлов (КГО), разрабатываемая с учетом опыта проектирования и эксплуатации систем КГО для существующих типов реакторов на быстрых нейтронах [3].

### **КГО В РЕАКТОРАХ С ЖМТ**

В реакторах на быстрых нейтронах типа БН КГО построен на основе детектирования продуктов деления и запаздывающих нейтронов в теплоносителе и защитном газе первого контура [4]. Секторная система, предназначенная для непрерывного измерения плотности потока запаздывающих нейтронов с целью регистрации дефектов типа «прямой контакт топлива с теплоносителем», позволяет определить сектор расположения дефектной ТВС в пределах  $1/6$  активной зоны. Показания газовой системы, служащей для непрерывного измерения активности газообразных продуктов деления в газовой подушке реактора, используются для регистрации дефекта типа «газовая неплотность» и области активной зоны с дефектной ТВС. Для выделения реперных радионуклидов в теплоносителе используются спектрометрические методы с замораживанием и предварительным выдерживанием пробы натрия и метод сорбирования изотопов цезия в адсорбере на основе реакторного графита [5].

Принцип работы системы КГО ядерной энергетической установки (ЯЭУ) со свинцово-висмутовым теплоносителем (СВТ) заключается в отборе части защитного газа в измерительную петлю, его очистке от аэрозолей для уменьшения фоновой аэрозольной активности и гамма-спектрометрическом анализе изотопного состава радиоактивных благородных газов (РБГ) в измерительной емкости [6].

Доминирующий вклад в активность теплоносителя вносят продукты активации, а в активность защитного газа – РБГ, что объясняется высоким коэффициентом распределения РБГ между газовой средой и жидким металлом. Нарушение герметичности оболочек твэлов ведет к увеличению содержания ПД как в теплоносителе, так и в газовом контуре.

Для РУ СВБР-100 с промежуточным спектром нейтронов в [7] было показано, что при плотности поверхностного загрязнения твэлов, равной  $1 \cdot 10^{-8}$  г/см<sup>2</sup>, суммарная объемная активность РБГ близка к верхней границе нормального состояния активной зоны, когда все твэлы герметичны. В этом случае наибольший вклад в фоновую активность вносит поверхностное загрязнение оболочек твэлов топливной композицией. При минимальной плотности поверхностного загрязнения оболочек твэлов основной вклад в фоновую активность вносит деление быстрыми нейтро-

нами содержащегося в СВТ  $^{238}\text{U}$ .

Фоновый источник запаздывающих нейтронов в теплоносителе, который определяет пороговую чувствительность для оценки размеров дефекта типа «прямой контакт топлива с теплоносителем», при вышеуказанной весовой доле урана в СВТ соответствует примерно от 10 до 15 см<sup>2</sup> суммарной площади открытой поверхности топлива в активной зоне [7].

Таким образом, для РУ с ЖМТ в качестве способов контроля герметичности твэлов в специальной литературе рассмотрены гамма-спектрометрия защитного газа и измерение плотности потока запаздывающих нейтронов в теплоносителе. Для обоснования конкретных технических решений системы КГО РУ со СТ необходимо учитывать особенности переноса радионуклидов в СТ и защитном газе. Рассмотрим основные соотношения, используемые при расчётном обосновании такой системы.

### ОСОБЕННОСТИ КГО В РУ СО СТ

По мере выгорания топлива давление под оболочкой твэла растёт из-за накопления как стабильных, так и радиоактивных изотопов ГПД, образующихся при делении топливных ядер и радиоактивном распаде осколков деления.

При возникновении дефекта в твэле до определенного выгорания топлива из-за большой плотности свинца его давление превышает давление газов внутри твэла, что приводит к затеканию свинца внутрь твэла при условии [8]

$$d_{\text{деф}}^{\text{трещ}} > 2\sigma_{\text{Pb}}/\Delta p, \quad (1)$$

где  $d_{\text{деф}}^{\text{трещ}}$  – характерный размер дефекта (трещины);  $\sigma_{\text{Pb}}$  – коэффициент поверхностного натяжения свинца, Н/м;  $\Delta p$  – перепад давлений на трещине.

При достижении критического значения давления газов под оболочкой твэла в объём теплоносителя будут выходить одиночные пузыри ГПД. При возникновении дефекта в момент времени, когда давление газов в твэле больше давления теплоносителя, ГПД, формирующие избыточное давление, за короткое время выходят из твэла в виде струи, после чего по мере наработки будут выходить в виде одиночных пузырей.

Ввиду низкой скорости движения теплоносителя и его большого объёма в РУ по запаздывающим нейтронам удастся отследить только крупные дефекты, поэтому наиболее эффективен контроль герметичности оболочек твэлов в реакторе со СТ по ГПД.

### ПОВЕДЕНИЕ ПД В ТЕПЛОНОСИТЕЛЕ

#### Растворённые ГПД

При обосновании эффективности обнаружения негерметичности твэлов методом измерения активности ГПД должны учитываться физические процессы, определяющие их перенос в теплоносителе, других средах РУ и вспомогательных системах. Газ может поступать из негерметичного твэла в теплоноситель как в растворённом виде, так и в виде пузырей различного размера. Для оценки возможного содержания растворённых ГПД в СТ требуются данные о растворимости (концентрации насыщения) газов в нем при рабочих температурах в контуре.

В [9] оценены теоретические величины растворимости ксенона и криптона в свинце при температуре до 1500 К. Для растворимости криптона или ксенона в свинце при давлении газа 0,1 МПа предложена зависимость, рекомендованная в [10]:

$$\ln(S) = A + B/\tau + C \cdot \ln(\tau) + D \cdot \tau, \quad (2)$$

где  $S$  – растворимость в молях газа на моль свинца;  $\tau = T/1000$ ,  $T$  – температура, К;  $A, B, C, D$  – коэффициенты, представленные в табл. 1 [9].

Таблица 1

**Коэффициенты для расчёта растворимости криптона и ксенона при давлении 0,1 МПа**

	A	B	C	D
Kr	-17,41852	2,17779	9,06075	-0,81210
Xe	-20,77263	3,54320	11,70382	-1,06850

Согласно «дырочной» модели, растворимость инертных газов в жидких металлах линейно зависит от давления [9]:

$$S_p = (p/p_0) \cdot S_{10}, \quad (3)$$

где  $S_{10}$ ,  $S_p$  – растворимость инертных газов в ТЖМТ при расчётном давлении  $p_0 = 0,1$  МПа и равновесном давлении в системе  $p$  в МПа соответственно.

Для температуры и давления свинца на выходе из активной зоны РУ БРЕСТ-ОД-300 растворимость криптона и ксенона составляет  $182 \cdot 10^{-9}$  и  $16 \cdot 10^{-9}$  моль газа/моль Pb соответственно.

**Пузыри**

Помимо растворенного вида ГПД присутствуют в теплоносителе в виде пузырей различного размера. Оценка максимально возможного диаметра газового пузыря в потоке СТ по формуле, верифицированной по результатам испытаний макета газлифтного зонда на стенде АО «НИКИЭТ» [11], даёт максимальный диаметр пузыря в потоке СТ при режимных параметрах в РУ БРЕСТ-ОД-300, равный 18 мм:

$$d_{\max} = 2L^{2/3}(2\sigma/\rho_{\text{ж}})^{3/5}U_{\text{ж}}^{-6/5}(\rho_{\text{ж}}/\rho_{\text{г}})^{1/5}, \quad (4)$$

где  $L$  – характерный размер канала;  $\sigma$  – коэффициент поверхностного натяжения;  $\rho_{\text{ж}}$  – плотность СТ;  $\rho_{\text{г}}$  – плотность газа;  $U_{\text{ж}}$  – скорость течения СТ.

В [12] представлена математическая модель коагуляции пузырей при истечении газожидкостного потока из струйного инжектора в канал с потоком СТ, позволяющая рассчитать распределение пузырей по размерам в любой момент времени:

$$C_i(t) = \frac{C_{i0}}{(1 + 0,5kC_0t)^2} + \sum_{k=1}^{i-1} \sum_{j=1}^{i-1} C_{j0} C_{i-j,k-1} \frac{0,5(k \cdot t)^{k-1}}{(1 + 0,5kC_0t)^{k+1}}, \quad (5)$$

где  $C_{i0}$  – начальные концентрации пузырей  $i$ -го размера;  $k$  – константа коагуляции, которая зависит от её механизма.

В турбулентных потоках имеют место три механизма коагуляции: градиентная (при большом градиенте скорости струи), турбулентная и инерционная.

Наиболее быстрое слияние пузырей происходит на начальном участке струи. Далее полидисперсный спектр размеров пузырей вырождается в монодисперсный, соответствующий максимально возможному размеру пузыря в потоке.

Таблица 2

**Предельная скорость всплытия одиночных газовых пузырей в жидкости**

Область	Предельная скорость	Диапазон применимости
1	$w = 0,33g^{0,76}(\rho_{\text{г}}/\mu_{\text{г}})^{0,52}(d/2)^{1,28}$	$2 < Re < 4,02G_1^{-0,0214}$
2	$w = 1,35[2\sigma/(\rho_{\text{г}}d)]^{0,5}$	$4,02G_1^{-0,0214} < Re < 3,1G_1^{-0,25}$
3	$w = 1,18[g\sigma/\rho_{\text{г}}]^{0,25}$	$Re > 3,1G_1^{-0,25}$

Зависимость скорости всплытия пузыря от его диаметра определяется с помощью соотношений Пиблса и Гарбера [13], которые соответствуют случаю пренебрежимо малой плотности газа по сравнению с плотностью жидкости. Диапазон применимо-

сти каждого уравнения определяется безразмерным комплексом, представленным в табл. 2:

$$G_1 = g\mu_f^4 / (\rho_f \sigma^3), \quad (6)$$

где  $g$  – ускорение свободного падения;  $\mu_f$  – динамическая вязкость жидкости;  $\rho_f$  – плотность жидкости;  $\sigma$  – коэффициент поверхностного натяжения.

Зависимость скорости всплытия пузыря в СТ от его размера, рассчитанная по соотношениям из табл. 2, приведена на рис. 1.

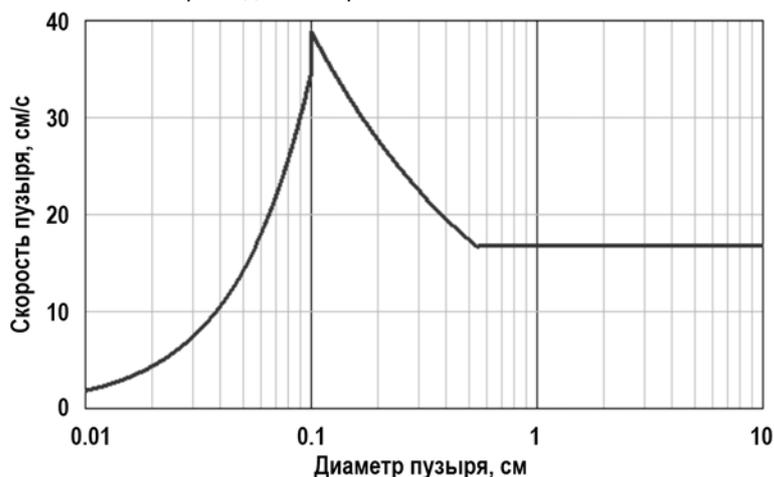


Рис. 1. Зависимость скорости всплытия пузыря от его размера

### Сорбция летучих ПД

Из твэла через дефект в его оболочке выходят летучие ПД, прежде всего изотопы йода и цезия, которые могут содержаться в пузырях в виде паров или аэрозолей, в случае крупных дефектов – смываться с поверхности топлива и внутренней стороны оболочки, а также поступать в теплоноситель прямой отдачей. Попав в контур циркуляции, в зависимости от природы теплоносителя и содержания кислорода в нем ПД распределяются между твёрдыми поверхностями контура и теплоносителем [14].

Для КГО в реакторах со СТ рекомендуется в качестве реперных рассматривать радионуклиды, хорошо растворимые в теплоносителе и определяемые в пробе, например,  $^{106}\text{Ru}$  и  $^{125}\text{Sb}$ . С другой стороны, встречаются предложения о применимости в качестве реперных радионуклидов изотопов цезия, нерастворимых в расплаве и хорошо сорбирующихся на поверхностях элементов конструкций.

Таблица 3

### Данные по распределению оксидных отложений цезия между стенками контейнера и расплавом Рb-Vi

Источник	Выдержка, сут	Доля активности, %	
		Расплав	Оксидные отложения
Радионуклиды, выделяющиеся в расплав из облученных в быстром реакторе таблеток $\text{UO}_2$	30	4	96
	47	4	96
	47	6	94
Радионуклиды, выделяющиеся в расплав из облученных в быстром реакторе таблеток $\text{UBe}_{13}$	30	73	27

Найденные при проведении экспериментальных исследований доли активности цезия в форме оксидных отложений на поверхности контейнера при массовом со-

держании кислорода в сплаве Pb-Bi 5·10<sup>-4</sup>% и температуре сплава 500°C представлены в табл. 3 [14]. Согласно [15], система радиационного контроля должна обеспечивать контроль реперных радионуклидов, характеризующих герметичность защитных барьеров, в том числе <sup>134</sup>Cs и <sup>137</sup>Cs. В связи с этим в РУ должна быть предусмотрена система, позволяющая определить количество цезия в пробе теплоносителя.

### ДЕГАЗАЦИЯ ГПД В СТ

После поступления к поверхности теплоносителя в процессе его перемешивания растворенные ГПД выходят из теплоносителя в газовую систему через межфазную поверхность за счёт диффузионных процессов в пограничном слое. Скорость их выхода определяется относительной скоростью дегазации, т.е. отношением скорости выхода *i*-го изотопа к его активности в теплоносителе.

В [16] рекомендуется для расчёта коэффициента диффузии РБГ в теплоносителе использовать формулу Эйнштейна-Стокса [17], так как результаты расчётов с её использованием сходятся с экспериментальными данными:

$$D = kT / (6\pi\eta r) \quad (7)$$

где  $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж/К – постоянная Больцмана;  $T$  – температура теплоносителя, К;  $r$  – радиус атома газа, м;  $\eta$  – динамическая вязкость ЖМТ, Па·с.

Согласно [16], приближённая оценка относительной скорости дегазации может быть выполнена следующим образом:

$$\begin{aligned} v_0 &= D \cdot S_{\text{мф}} / (\delta_{\text{гр}} \cdot V_{\text{тн}}) = kTS_{\text{мф}} / (6\pi\eta\delta_{\text{гр}}V_{\text{тн}}) = \\ &= kTS_{\text{мф}} / [6(\pi\eta)^{3/2}rV_{\text{тн}}] \cdot [\rho^5g^3 / (64\sigma)]^{0,125}, \end{aligned} \quad (8)$$

где  $D$  – коэффициент диффузии газа в теплоносителе, см<sup>2</sup>/с;  $S_{\text{мф}}$  – площадь зеркала теплоносителя в буферной емкости, м<sup>2</sup>;  $\delta_{\text{гр}}$  – толщина пограничного слоя, м;  $V_{\text{тн}}$  – объём теплоносителя, м<sup>3</sup>;  $\rho$  – плотность теплоносителя, кг/м<sup>3</sup>;  $\sigma$  – коэффициент поверхностного натяжения, Н/м.

Приблизительно коэффициент диффузии ГПД в СТ можно оценить с помощью данных, приведенных в справочнике [18], в котором указаны различные зависимости для коэффициента диффузии кислорода от температуры. Наиболее широкий возможный диапазон температур применимости (673 – 1273 К) у формулы Громова:

$$D [\text{см}^2/\text{с}] = 6,6 \cdot 10^{-5} \cdot \exp[-16158 / (R \cdot T)], \quad (9)$$

где  $R = 8,314$  Дж/(моль·К) – универсальная газовая постоянная.

Для экспериментального подтверждения скоростей выхода из свинца в газовую среду для конкретных радионуклидов в конкретных условиях в АО «ИРМ» был разработан и создан комплекс петлевых установок со СТ, на которых исследовались процессы миграции продуктов деления топлива и продуктов активации жидкометаллического теплоносителя [19].

### ПОВЕДЕНИЕ АЭРОЗОЛЕЙ В ЗАЩИТНОМ ГАЗЕ

Физико-химические процессы, протекающие в контурах ЯЭУ с циркулирующим ТЖМТ, приводят к образованию мелкодисперсных частиц различной природы с последующим выходом их в газовые объёмы в виде аэрозолей [20]. Для исследования характеристик аэрозолей были созданы экспериментальные установки, моделирующие реальные условия и режимы работы с ТЖМТ. Было отмечено, что образующиеся в ходе испарения свинца аэрозоли характеризуются высокой полидисперсностью. Обобщенные данные по концентрации частиц на разном расстоянии от поверхности свинца представлены в табл. 4.

Таблица 4

**Обобщенные данные по концентрации частиц в зависимости от высоты отбора анализируемого газа при испарении**

Температура сплава, °С	Характерный размер частиц, мкм	Общая массовая концентрация, мг/м <sup>3</sup>		
		Высота точки отбора над поверхностью свинца, мм		
		50	500	1000
450	0,1	0,03	0,02	> 2
500	0,1	0,05	0,03	> 2
600	0,4	0,13	0,12	0,4 – 0,5

Если не принимать специальных мер по очистке циркулирующего защитного газа от аэрозольных частиц, возможны неблагоприятные последствия, связанные с увеличением гидравлического сопротивления каналов, снижением работоспособности контрольно-измерительного оборудования, а также ухудшением радиационной обстановки из-за отложения на элементах газовых систем примесей – источников ионизирующего излучения. В [21] предлагается применение фильтрующих устройств с несколькими секциями очистки: высокотемпературной – для очистки газа на выходе из реактора от крупных аэрозольных частиц размером более 5 мкм при температуре 450 – 600°С и низкотемпературной – для финишной очистки газа на холодной стороне контура (20 – 40°С). В качестве высокотемпературного фильтрующего материала было рассмотрено иглопробивное металлополотно, полученное методом экстракции (извлечения с помощью растворителя) висящей капли расплава. Его эффективность для частиц размером 0,2 – 1,0 мкм оказалась близка к 35%, для более крупных частиц – до 86%. Испытания стеклотканей производства ОАО «ВНИИ ЦБП» и «Hollingsworth and Vose» на эффективность очистки газа от частиц размером более 0,3 мкм показали высокие результаты – 99,95 и 99,96% соответственно.

**КГО ДЛЯ РУ БРЕСТ**

С учетом всего вышесказанного при разработке перспективной РУ со СТ предусматриваются средства непрерывного отбора газа из объема газовых полостей реакторного блока для контроля его суммарной активности и нуклидного состава. Радионуклиды, растворенные в СТ, переносятся в контуре с потоком теплоносителя и выходят в защитный газ со свободных поверхностей над активной зоной, около парогенераторов и главных циркуляционных насосов. Ожидаемое влияние этого процесса на измеряемую активность газа может быть рассчитано с помощью математической модели, учитывающей перенос нуклидов, при котором ГПД, вышедшие из негерметичных твэлов, поступают в СТ, проходящий через активную зону, затем в остальные части контура циркуляции свинца и в газовые объемы блока реакторного. Модель воспроизводит контур циркуляции свинца как последовательность переходов от одного выделенного объема к другим, что представлено на рис. 2. Такой подход описан в монографии [22].

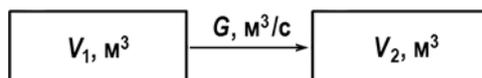


Рис. 2. Схема перехода ГПД между блоками модели

Основными параметрами модели, определяющими точность её приближения к условиям РУ, являются задаваемые константы (относительные скорости) перехода нуклидов от блока к блоку. При переходе ГПД из объема  $V_1$  в объем  $V_2$  с расходом  $G$

относительная скорость равна

$$\mu = G/V_1. \quad (10)$$

Данная методика позволяет определить расчётную активность реперных радионуклидов в каждом блоке в любой момент времени после разгерметизации твэла.

При одинаковой температуре поверхности СТ на входе в ПГ в каждой из четырёх петель абсолютная скорость выхода радионуклидов ГПД будет выше в той петле, которая ближе к сектору а.з., имеющему негерметичный твэл. Это позволяет определять сектор расположения дефектного твэла.

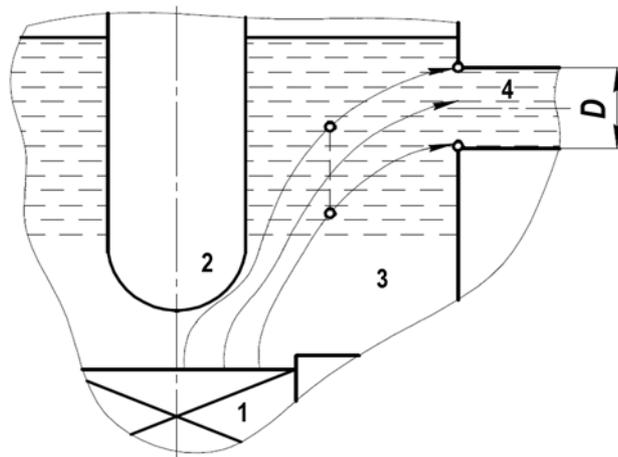


Рис. 3. Схема всплытия пузырей в центральной полости: 1 – активная зона; 2 – колонна ИМ СУЗ; 3 – ЦП БР; 4 – коллектор СТ

Перемещение пузыря, вышедшего из активной зоны, складывается из его перемещения с потоком СТ и смещения относительно потока за счёт всплытия. Схема на рис. 3 показывает, что возможность попасть в коллектор имеют пузыри, которые за расчётное время движения СТ от активной зоны до коллектора всплывут не более, чем на расстояние, равное диаметру коллектора  $D$ . Более крупные пузыри всплывают к поверхности СТ в центральной полости. Скорость всплытия пузырей определялась по соотношениям Пиблса и Гарбера [13].

Часть пузырей в полости выгородки парогенератора может быть захвачена восходящими потоками СТ непосредственно к свободной поверхности. Здесь же дегазируются пузыри, которые претерпели коагуляцию. Кроме того, укрупнение пузырей возможно за счёт значительного падения давления в пузыре при всплытии с большой глубины свинца, которое приведет к выходу растворенных газов из СТ в пузыри.

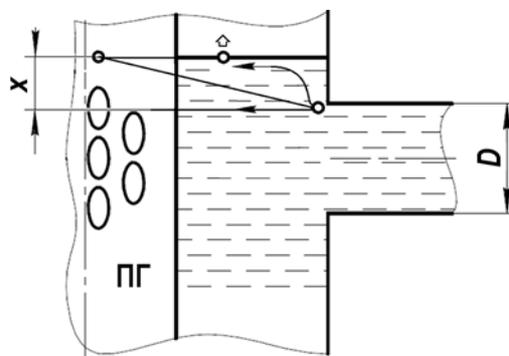


Рис. 4. Схема всплытия пузыря в периферийной полости

Часть пузырей после выхода из коллектора будет двигаться с горизонтальным потоком СТ. На рисунке 4 схематично показано, что пузыри, расчётное вертикальное смещение за счёт всплытия которых больше расстояния  $x$  от верха коллектора до верхнего отверстия в ПГ, дегазируются до входа в ПГ.

Оставшаяся часть мелких пузырьков увлекается потоком СТ внутрь ПГ, где могут переноситься течением СТ вниз, поскольку скорость опускного течения свинца в ПГ во много раз превышает скорость всплытия пузырей. Далее такие пузыри ведут себя в контуре СТ как растворенные примеси.

После дегазации из газовых полостей ГПД попадают в трубки отбора защитного газа специальной системы, позволяющей с помощью гамма-спектрометрического анализа определить факт, приблизительный момент и приблизительный сектор повреждения оболочки твэла при работе на мощности по всплеску активности ГПД.

### **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

В работе описаны основные принципы КГО и уже существующие системы в реакторах с ЖМТ. Показано, что основной вклад в фоновую активность вносит деление быстрыми нейтронами содержащегося в теплоносителе  $^{238}\text{U}$ . Приведены особенности КГО в реакторах со СТ. ГПД могут выходить из негерметичных твэлов как в растворённом, так и в пузырьковом виде. Рассмотрены их поведение в теплоносителе, особенности дегазации, а также процессы сорбции летучих ПД и очистки защитного газа от аэрозолей.

Описаны общие представления об условиях переноса ГПД в среде СТ разрабатываемой реакторной установки, на основании которых будут разработаны способы КГО по активности газа в газовых объёмах РУ.

### **Литература**

1. *Адамов Е.О., Каплиенко А.В., Орлов В.В. и др.* Быстрый реактор со свинцовым теплоносителем БРЕСТ: от концепции к реализации технологии. // Атомная энергия. – 2020. – Вып. 4. – С. 185-194.
2. *Адамов Е.О., Драгунов Ю.Г., Орлов В.В. и др.* Машиностроение ядерной техники. В 2-х кн. Кн. 1. / Под общ. ред. Е.О. Адамова. – М.: Машиностроение, 2005. – 960 с.
3. *Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору.* Правила ядерной безопасности реакторных установок атомных станций. НП-082-07. // Ядерная и радиационная безопасность. – 2008. – № 1. – С. 52-77.
4. *Лукьянов Д.А., Албутова О.И.* Метод локализации дефектных ТВС в реакторах на быстрых нейтронах. // ВАНТ. Серия: Ядерно-реакторные константы. – 2017. – Вып. 3. – С. 100-117.
5. *Лукьянов Д.А., Албутова О.И., Зверев И.Д. и др.* Расчетно-экспериментальное обоснование натриевой системы контроля герметичности оболочек твэлов перспективного коммерческого реактора. // ВАНТ. Серия: Ядерно-реакторные константы. – 2018. – Вып. 5. – С. 110-118.
6. *Дедуль А.В., Кальченко В.В., Колик М.В. и др.* Гамма-спектрометрия защитного газа первого контура РУ с ТЖМТ как средство оперативного контроля герметичности оболочек твэлов и поверхности теплообмена парогенератора. // ВАНТ. Серия: Обеспечение безопасности АЭС. – 2009. – Вып. 24. – С. 44-50.
7. *Гончар Н.И.* Влияние примеси урана и тория в ТЖМТ и конструкционных материалах активной зоны на эффективность контроля герметичности оболочек твэлов. // ВАНТ. Серия: Ядерно-реакторные константы. – 2018. – Вып. 5. – С. 176-184.
8. *Путилов К.А.* Курс физики. Том I. Механика, акустика, молекулярная физика, термодинамика. – М.: Физматгиз, 1963. – 560 с.
9. *Сковородько С.Н., Мозговой А.Г.* Растворимость инертных газов в тяжелых жидкометаллических теплоносителях при высоких температурах. // Теплофизика высоких

температур. – 2010. – №4. – С. 633-637.

10. Solubility data series. Volume 2. Krypton, Xenon and Radon – Gas Solubilities. – Great Britain. Pergamon press, 1979. – P. XVIII.

11. *Верещагина Т.Н., Лемехов В.В., Моркин М.С.* Гидравлика газлифтного зонда со свинцовым теплоносителем. / Сб. тез. докл. научно-технической конференции «Теплофизика реакторов нового поколения (Теплофизика-2020)». – Обнинск: ГНЦ РФ-ФЭИ, 2020. – С. 136.

12. *Федотовский В.С., Верещагина Т.Н., Орлов Ю.И.* Модель коагуляции пузырьков, вводимых струйным инжектором в поток тяжелого жидкометаллического теплоносителя. // Известия высших учебных заведений. Ядерная энергетика. – 2007. – №1. – С. 92-102.

13. *Уоллис Г.* Одномерные двухфазные течения. – М.: Мир, 1972. – 440 с.

14. *Наумов В.С., Коновалов Э.Е.* Сорбция радионуклидов, образующихся в первых контурах реакторов с Pb-Bi-теплоносителем, поверхностью конструкционных материалов активной зоны. // Радиохимия. – 2018. – №2. – С. 167-174.

15. СанПиН 2.6.1.24-03. Санитарные правила проектирования и эксплуатации атомных станций (СП АС-03). Электронный ресурс: <https://docs.cntd.ru/document/901862274> (дата доступа 17.03.2021).

16. *Михайлов А.Ю., Гончар Н.И.* Определение характеристик дегазации жидкометаллического теплоносителя первого контура. / Сб. докл. научно-технической конференции «Теплофизика реакторов на быстрых нейтронах (Теплофизика-2014)». – Обнинск: ГНЦ РФ-ФЭИ, 2015. – С. 437-444.

17. *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.

18. Handbook on Lead-Bismuth Eutectic Alloy and Lead Properties, Materials Compatibility, Thermal-hydraulics and Technologies. – France. Nuclear Energy Agency Organization for Economic Co-Operation and Development, 2015. – 168 p.

19. *Васюхно В.П., Дубенков Н.Е., Лемехов В.В. и др.* Исследование процессов массопереноса продуктов деления топлива и продуктов активации примесей свинцового теплоносителя на комплексе свинцово-газовых петлевых установок. / Труды конференции «Инновации в атомной энергетике». – М.: АО «НИКИЭТ», 2017. – С. 322-330.

20. *Мартынов П.Н., Посажеников А.М., Ягодкин И.В.* Исследование поведения аэрозолей в газовых контурах реакторных установок с тяжелым теплоносителем. // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2007. – №1. – С. 152-158.

21. *Посажеников А.М., Ягодкин И.В., Паповянец А.К. и др.* Очистка защитного газа от аэрозолей тяжелых жидкометаллических теплоносителей. // ВАНТ. Серия: Ядерно-реакторные константы. – 2015. – Вып. 2. – С. 102-119.

22. Инженерный расчет защиты атомных электростанций. / Под ред. А.П. Веселкина, Ю.А. Егорова. – М.: Атомиздат, 1976. – 296 с.

Поступила в редакцию 20.03.2021 г.

#### Авторы

*Драгунова Анастасия Витальевна*, инженер-конструктор 3 категории, аспирант

E-mail: a-dragunova@bk.ru

*Моркин Михаил Сергеевич*, ведущий инженер-конструктор

E-mail: morkin@nikiet.ru

*Перевезенцев Владимир Васильевич*, профессор, д.т.н.

E-mail: perevezentsev@bmstu.ru

## FEATURES OF METHODS FOR MONITORING THE TIGHTNESS OF THE CLADDING OF FUEL ELEMENTS IN FAST BREEDER REACTORS WITH LEAD COOLANT

Dragunova A.V. \*, \*\*, Morkin M.S. \*, Perevezentsev V.V. \*\*

\* NIKIET JCS

2/8 Malaya Krasnoselskaya Str., 107140 Moscow, Russia

\*\* Bauman Moscow State Technical University

5, bldg. 1 Vtoraya Baumanskaya Str., 105005 Moscow, Russia

### ABSTRACT

For the timely detection of unpressurized fuel elements in the reactor, a system for monitoring the tightness of the fuel element cladding should be provided. In reactors with a heavy liquid metal coolant, the most effective is the control of the tightness of the cladding of fuel elements by detecting gaseous fission products.

The paper considers the basic principles of constructing a system for monitoring the tightness of fuel element cladding in reactors with a liquid metal coolant based on the detection of fission products and delayed neutrons. It is noted that in reactors with a heavy liquid-metal coolant the most effective is the control of the tightness of the cladding of fuel elements by gaseous fission products. Various aspects of the behavior of fission products in a reactor with a heavy liquid metal coolant are shown such as the movement of gaseous fission products in dissolved and bubble form along the circuit, sorption of volatile fission products in the lead coolant and on the surfaces of the structural elements, degassing of the gaseous fission products dissolved in the lead coolant and filtration of cover gas from aerosol particles of various nature.

General concepts of the transfer of gaseous fission products in a lead coolant and a mathematical model are described, which makes it possible to determine the calculated activity of reference radionuclides in each block of the reactor at any time after the depressurization of the fuel element. On the basis of this model, methods for monitoring the tightness of the fuel element cladding by the gas activity in the gas volumes of the reactor plant will be proposed.

**Key words:** BREST, fuel-element cladding tightness monitoring, lead coolant, fuel element, cladding defect, fission products, inert radioactive gases, two-phase flows, bubbling up, diffusion, degassing, mathematical model.

### REFERENCES

1. Adamov E.O., Kaplienko A.V., Orlov V.V., Smirnov V.S., Lopatkin A.V. Lead-cooled fast reactor BREST: from concept to technology implementation. *Atomnaya Energiya*. 2020, no. 4, pp. 185-194 (in Russian).
2. Adamov E.O., Dragunov Yu.G., Orlov V.V. *Mechanical Engineering of Nuclear Technology*. Moscow. Mashinostroenie Publ., 2005. 960 p. (in Russian).
3. Federal'naya Sluzhba po Ekologicheskomu, Tekhnologicheskomu i Atomnomu Nadzoru. Nuclear Safety Rules for Reactor Facilities of Nuclear Power Plants. NP-082-07. *Yadernaya i Radiatsionnaya Bezopasnost'*. 2008, no. 1, pp. 52-77 (in Russian).
4. Luk'yanov D.A., Albutova O.I. Method of localization of defective fuel assemblies in fast reactors. *VANT. Ser. Yaderno-Reaktornye Konstanty*. 2017, iss. 3, pp. 100-117 (in Russian).
5. Luk'yanov D.A., Albutova O.I., Zverev I.D., Salyaev A.V., Fadeev I.D., Prokoptsov I.S.,

- Mikhajlenko M.A., Gur'ev S.A. Computational and experimental substantiation of the sodium system for monitoring the tightness of the cladding of fuel elements of a promising commercial reactor. *VANT. Ser. Yaderno-Reaktornye Konstanty*. 2018, iss. 5, pp. 110-118 (in Russian).
6. Dedul' A.V., Kal'chenko V.V., Kolik M.V., Stepanov V.S., Gonchar N.I., Pankratov D.V., Trykov L.A., Efremov Yu.V., Yakunin S.N. Gamma spectrometry of shielding gas of the primary circuit of RP with HLHC as a means of operational monitoring of tightness of fuel element cladding and heat exchange surface of a steam generator. *VANT. Ser. Obespechenie Bezopasnosti AES*. 2009, iss. 24, pp. 44-50 (in Russian).
7. Gonchar N.I. Influence of uranium and thorium impurities in HLHC and structural materials of the core on the efficiency of fuel element cladding tightness control. *VANT. Ser. Yaderno-Reaktornye Konstanty*. 2018, iss. 5, pp. 176-184 (in Russian).
8. Putilov K.A. *Physics Course. Volume I. Mechanics, Acoustics, Molecular Physics, Thermodynamics*. Moscow. Fizmatgiz Publ., 1963, 560 p. (in Russian).
9. Skovorod'ko S.N., Mozgovej A.G. Solubility of inert gases in heavy liquid metal coolants at high temperatures. *Teplofizika Vysokih Temperatur*. 2010, no. 4, pp. 633-637 (in Russian).
10. *Solubility data series. Volume 2. Krypton, xenon and radon – Gas Solubilities*. Great Britain. Pergamon press, 1979, p. XVIII.
11. Vereschagina T.N., Lemehov V.V., Morkin M.S. Lead-cooled gas lift probe hydraulics. *Proc. of the Sci.-Techn. Conf. «Thermophysics-2020»*. Obninsk. GNTs RF-FEI Publ., 2020, p. 136 (in Russian).
12. Fedotovskij V.S., Vereschagina T.N., Orlov Yu.I. Model of coagulation of bubbles introduced by a jet injector into a flow of a heavy liquid-metal coolant. *Izvestia Vysshikh Uchebnykh Zawedeniy. Yadernaya Energetika*. 2007, no. 1, pp. 92-102 (in Russian).
13. Uollis G. *One-Dimensional Two-Phase Flows*. Moscow. Mir Publ., 1972, 440 p. (in Russian).
14. Naumov V.S., Konovalov E.E. Sorption of radionuclides formed in the primary circuits of reactors with Pb-Bi coolant, the surface of structural materials of the core. *Radiokhimiya*. 2018, no. 2, pp. 167-174 (in Russian).
15. SanPiN 2.6.1.24-03. Sanitary rules for the design and operation of nuclear power plants (SPAS-03). Available at: <https://docs.cntd.ru/document/901862274> (accessed Mar. 17, 2021) (in Russian).
16. Mikhajlov A. Yu., Gonchar N.I. Determination of the degassing characteristics of the liquid metal coolant of the primary circuit. *Proc. of the Sci.-Techn. Conf. «Thermal Physics of Fast Nuclear Reactors (Thermophysics-2014)»*. Obninsk. GNTs RF-FEI Publ., 2015, pp. 437-444 (in Russian).
17. Babichev A.P., Babushkina N.A., Bratkovskij A.M. *Physical Quantities: Handbook*. Moscow. Energoatomizdat Publ., 1991, 1232 p. (in Russian).
18. *Handbook on Lead-Bismuth Eutectic Alloy and Lead Properties, Materials Compatibility, Thermal-hydraulics and Technologies*. France. Nuclear Energy Agency Organization for Economic Co-Operation and Development Publ., 2015, 168 p.
19. Vasyuhno V.P., Dubenkov N.E., Lemekhov V.V., Morkin M.S., Hacheresov G.A., Rychkov V.S., Shushlebin V.V. Investigation of the processes of mass transfer of fuel fission products and activation products of lead coolant impurities at a complex of lead-gas loop installations. *Proc. of the Conf. «Nuclear innovations»*. Moscow. NIKIET JSC Publ., 2017, pp. 322-330 (in Russian).
20. Martynov P.N., Posazhennikov A.M., Yagodkin I.V. Investigation of the behavior of aerosols in the gas circuits of reactor plants with a heavy coolant. *Izvestia Vysshikh Uchebnykh Zawedeniy. Yadernaya Energetika*. 2007, no. 1, pp. 152-158 (in Russian).
21. Posazhennikov A.M., Yagodkin I.V., Papovyants A.K., Grishin A.G., Isaev A. Yu. Cleaning of protective gas from aerosols of heavy liquid metal coolants. *VANT. Ser.*

*Yaderno-Reaktornye Konstanty*. 2015, iss. 2, pp. 102-119 (in Russian).

22. Veselkin A.P., Egorov Yu.A. *Engineering Calculation of the Protection of Nuclear Power Plants*. Moscow. Atomizdat Publ., 1976, 296 p. (in Russian).

**Authors**

Dragunova Anastasiya Vitalievna, Design Engineer, PhD Student

E-mail: a-dragunova@bk.ru

Morkin Mikhail Sergeevich, Leading Design Engineer

E-mail: morkin@nikiet.ru

Perevezentsev Vladimir Vasilievich, Professor, Dr. Sci. (Engineering)

E-mail: perevezentsev@bmstu.ru