

Расчетный анализ силового взаимодействия графитовой кладки и металлоконструкции схемы «КЖ» РБМК-1000 согласуется с экспериментами до начала появления сквозных трещин (раскалывания блока). По результатам расчетного анализа на малом макете определены характеристики материала графитового блока для расчета контактного взаимодействия с его выкрошиванием, на полномасштабном макете — устойчивое деформирование металлоконструкции. Максимальная деформация по конечно-элементной модели макета плавно возрастает с увеличением перемещения корпуса держателя графитового блока. Расчетный анализ оказался более консервативным, чем результаты экспериментов, поскольку в последнем колонны раскололись и нагрузка на полномасштабный макет снизилась.

Заключение. Учитывая прочностные расчеты взаимодействия металлоконструкции схемы «КЖ» с графитовой кладкой РБМК-1000 и экспериментальные исследования, можно сделать вывод, что при силовом взаимодействии металлоконструкции схемы «КЖ» и графитовой кладки не нарушается целостность металла металлоконструкции при их совместном перемещении до обоснованного критерия 50 мм. При таком взаимодействии происходят выкрошивание, растрескивание и разрушение графита до достижения предельного прогиба графитовой колонны, локальные зоны пластической деформации не влияют на выполнение металлоконструкцией своих функций как барьера безопасности.

Следует отметить, что рассмотренный в работе вопрос деформационных критериев для объектов использования атомной энергии является актуальным. В 2020—2022 гг. введены в

нормативную базу три документа, с помощью которых имеется возможность оценить напряженно-деформированное состояние металлических конструкций по допустимым деформациям [4—6]. Согласно им предельная локальная деформация для основного металла составляет 5% при режимах штатной эксплуатации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Слободчиков А.В., Решетин В.Л., Михальченко А.П. и др. Обоснование безопасности эксплуатации энергоблока РБМК при силовом взаимодействии металлоконструкции схемы «КЖ» и графитовой кладки. — В сб.: Научно-технич. годовой отчет НИКИЭТ, 2018, с. 62—65.
2. Слободчиков А.В., Бирюков А.Н., Жмакин А.В. и др. Экспериментальное исследование силового взаимодействия элементов металлоконструкции схемы «КЖ» и графитовой кладки РУ РБМК-1000 при их контакте. — Там же, 2021, с. 211—213.
3. Программный комплекс для решения задач динамики и прочности Abaqus. Аттестационный паспорт программного средства № 486 от 19.12.2019 г. М., ФБУ «НТЦ ЯРБ», 2019.
4. Обеспечение целостности корпуса блока реакторного, оборудования, трубопроводов и внутрикорпусных устройств ядерной энергетической установки со свинцовым теплоносителем. Оборудование, трубопроводы и внутрикорпусные устройства. Поверочный расчет на прочность. СТО 95 12048—2019. М., Госкорпорация «Росатом», 2019.
5. Обеспечение целостности корпуса блока реакторного, оборудования, трубопроводов и внутрикорпусных устройств ядерной энергетической установки со свинцовым теплоносителем. Корпус блока реакторного. Расчет на прочность. СТО 95 12052—2019. М., Госкорпорация «Росатом», 2019.
6. Обоснование прочности оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. Поверочный расчет на прочность. ГОСТ Р 59115.9—2021. М., ФГБУ «РСТ», 2022.

Поступила в Редакцию 16.12.22

УДК 621.039.51

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ФУНКЦИИ ЦЕННОСТИ НЕЙТРОНОВ НА ФУНКЦИОНАЛЫ КИНЕТИКИ ПО ПРОГРАММЕ MCSU

Архангельский Д.М., Олейник Д.С. (НИЦ «Курчатовский ин-т», г. Москва)
e-mail: arkhangelskiy_dm@nrcki.ru

Развитие вычислительной техники позволило существенно повысить качество и степень точности расчетов. Стало возможным проводить полномасштабные расчеты активных

зон, а также использовать функцию ценности нейтронов в расчетах различных функционалов, в том числе эффективной доли запаздывающих $\beta_{\text{эф}}$ и времени жизни мгновенных нейтронов Λ

[1—3]. Ранее расчет этих функционалов с использованием метода Монте-Карло проводился в предположении, что функция ценности является константой на всем фазовом пространстве, т.е. без учета зависимости от фазовых координат [4, 5]. В свою очередь, это поднимает вопрос о точности полученных ранее оценок $\beta_{\text{эф}}$ и Λ .

В программном комплексе MCU реализована возможность вычисления функции ценности и ее использования при расчете функционалов нейтронной кинетики $\beta_{\text{эф}}$ и Λ [6—9].

Целью настоящей работы является анализ влияния зависимости функции ценности нейтронов от фазовых координат на точность расчета функционалов нейтронной кинетики. В рамках расчета рассматривались эксперименты на уран-водных критических стендах Стенд П и ZR-6 из сборника ICSBER [10]. Для количественного анализа введено понятие коррекции оценки — отношения значений функционала, полученного с учетом и без учета функции ценности. Расчетное исследование состоит из двух частей: исследование коррекции оценок в зависимости от типа пространственного разбиения и от параметров расчетных моделей критических стендов, таких, как концентрация поглотителя в замедлителе, размер сборки и обогащение топлива.

Методика расчета. Эффективная доля запаздывающих $\beta_{\text{эф}}$ и время жизни мгновенных нейтронов Λ представляются как дробно-линейные функционалы ценности

$$\beta_{\text{эф}} = (\psi^+, \mathbf{B}\psi) / (\psi^+, (\mathbf{F} + \mathbf{B})\psi); \quad (1)$$

$$\Lambda = (\psi^+, \tau(\mathbf{F} + \mathbf{B})\psi) / (\psi^+, (\mathbf{F} + \mathbf{B})\psi), \quad (2)$$

где ψ^+ — вектор, элементы которого соответствуют ценности нейтронов в регистрационных объектах; ψ — плотность генерации нейтронов в объектах; $\mathbf{F}$, $\mathbf{B}$ — операторы генерации мгновенных и запаздывающих нейтронов соответственно; τ — время жизни нейтронов [11, 12]. Как видно, ценность нейтронов играет роль весового множителя.

Использование матричного представления плотности генерации и функции ценности нейтронов обосновано спецификой метода Монте-Карло: регистрация локальных функционалов возможна только в объектах конечного объема. Таким образом, детализация функции ценности будет влиять на результаты расчета функциона-

лов (1), (2) [13, 14]. Однако при большой степени детализации ее дальнейшее увеличение не приведет к изменению оценок функционалов.

Вычисляются функционалы в два этапа: на первом этапе моделируется перенос нейтронов методом Монте-Карло

$$k_{\text{эф}}\psi = \mathbf{T}\psi, \quad (3)$$

в результате чего определяются плотность генерации в объектах и матрица делений $\mathbf{T}$, элемент T_{ij} которой соответствует среднему числу нейтронов, появившихся в объекте i в результате деления нуклида родившимся в объекте j нейтроном [15, 16]. На втором этапе вычисляется функция ценности в регистрационных объектах. Для этого решается уравнение, сопряженное с выражением (3):

$$k_{\text{эф}}\psi^+ = \mathbf{T}^T\psi^+. \quad (4)$$

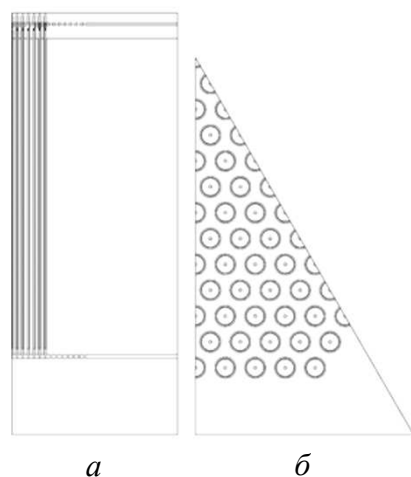
Уравнение (4) представляет собой обычную систему линейных алгебраических уравнений, которую можно решить любым подходящим способом.

Следует отметить, что в полученную по формуле (4) функцию ценности нейтронов не входит энергетическая зависимость, что справедливо для систем с тепловым спектром, в которых выход нейтронов при одном делении слабо зависит от энергии [17].

Среди преимуществ используемой методики можно выделить однократное моделирование переноса нейтронов, возможность произвольной детализации функции ценности — допускаются разбиение расчетной модели на любое конечное число регистрационных объектов, возможность табуляции ценности из других программ.

Описание расчетных моделей. Для расчетов рассматривались эксперименты на уран-водных критических стендах Стенд П (LCT-053 и LCT-085) и ZR-6 (LCT-015) из сборника ICSBER.

Экспериментальная установка нулевой мощности Стенд П представляет собой решетку твэлов, расположенных в баке с водой. Внутренний диаметр бака 204 см, высота 307 см. Решетка твэлов расположена с шагом 1,27 см. Твэлы располагаются на нижней опорной решетке и фиксируются с помощью верхней опорной решетки. Топливом является диоксид урана. Критическое состояние стенда достигается



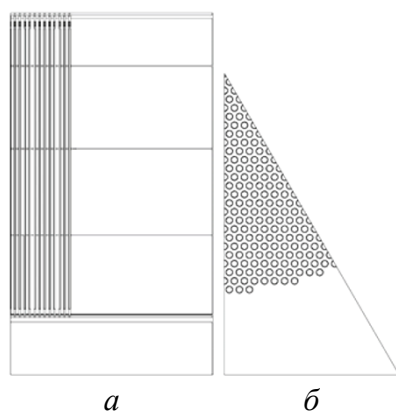
Р и с. 1. Расчетная модель Стенд П: а, б — продольное и поперечное сечение соответственно

изменением уровня замедлителя в баке. Продольное и поперечное сечение одной из конфигураций стенда показано на рис. 1. Для исследования влияния размера сборки и обогащения топлива на коррекцию оценок функционалов были выбраны два эксперимента — LCT-053 и LCT-085.

Экспериментальный стенд ZR-6 также представляет собой бак с водой, в который погружена ТВС. Сборка состоит из 1765 твэлов, расположенных с шагом 1,27 см. В качестве топлива используется диоксид урана обогащением 4,4%. Высота топливного столба составляет 125 см. Вертикальное и горизонтальное сечение модели показано на рис. 2.

Для исследования влияния концентрации борной кислоты в замедлителе на коррекцию оценок функционалов были выбраны две конфигурации эксперимента LCT-015.

Исследование влияния детализации функции ценности. Первым этапом исследова-



Р и с. 2. Расчетная модель ZR-6: а, б — продольное и поперечное сечение соответственно

ния являлось определение параметров детализации, при которых учет ценности оказывает наибольшее влияние на коррекцию оценок функционалов. В рамках этой задачи были проведены расчеты с различным типом пространственного разбиения функции ценности:

радиальное — каждому твэлу соответствует свой регистрационный объект;

аксиальное — модель разбивается на 10 высотных слоев;

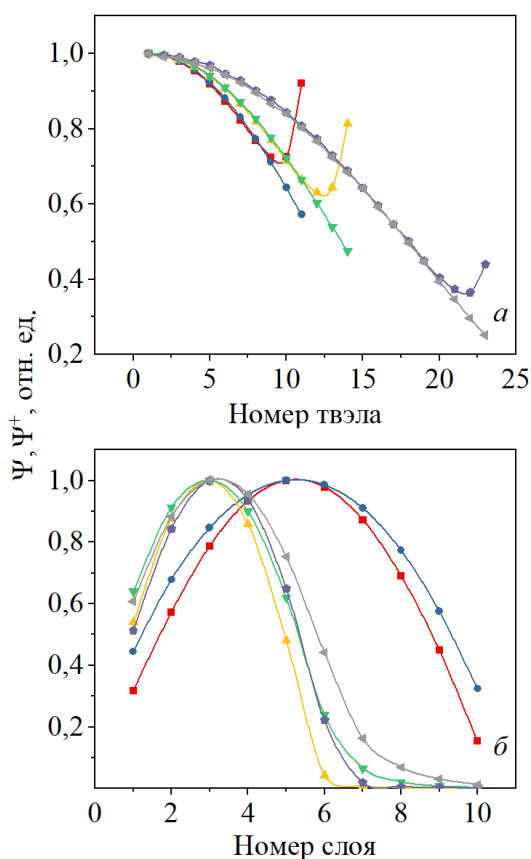
комбинированное — комбинация радиального и аксиального разбиения.

Результаты расчетов $\beta_{\text{эф}}$ и Λ для конфигураций экспериментов LCT-053, LCT-085, LCT-015 приведены в табл. 1. На рис. 3 показана зависимость радиальной и аксиальной составляющей плотности генерации и функции ценности нейтронов от радиуса и высоты соответственно. Нумерация твэлов в радиальном разбиении проводится начиная с центрального, нумерация слоев в аксиальном — с нижнего слоя.

Т а б л и ц а 1. Результаты расчета $\beta_{\text{эф}}$ и Λ в разных экспериментах

Тип разбиения	$\beta_{\text{эф}}, 10^{-5}$	$\Delta\beta, \%$	$\Lambda, 10^{-5} \text{ с}$	$\Delta\Lambda, \%$
LCT-053, 11				
Без учета ценности	815,6	—	3,1	—
Аксиальное	816,2	−0,1	3,1	0,1
Радиальное	822,1	−0,8	2,7	15,7
Комбинированное	822,4	−0,9	2,7	15,9
LCT-085, 13				
Без учета ценности	804,3	—	3,3	—
Аксиальное	806,6	−0,3	3,3	0,6
Радиальное	810,4	−0,8	2,9	14,5
Комбинированное	812,7	−1	2,8	15,3
LCT-015 163/161				
Без учета ценности	778	—	2,72	—
Аксиальное	783	−0,6	2,60	2
Радиальное	783	−0,6	2,46	10,3
Комбинированное	788	−1,2	2,44	11,5

Полученные результаты свидетельствуют о преимущественном вкладе радиального разбиения в коррекцию оценок функционалов. Нейт-



Р и с. 3. Радиальные (а) и аксиальные составляющие (б) плотности генерации (■) и ценности (●) для эксперимента LCT-085, LCT-053 (▲, ▼), LCT-015 (◆, ◀)

роны, попадающие в отражатель, находятся там продолжительное время. Возвращаясь обратно в сборку, они, скорее всего, будут поглощаться во внешнем ряду твэлов — об этом свидетельствует соответствующее изменение плотности генерации на периферии сборки. Такие нейтроны обладают большим временем жизни, однако ценность их потомков мала, в результате оценка Λ завышена. Роль функции ценности заключается во взвешивании вклада различных нейтронов в оценку, что приводит к уменьшению вклада времени жизни таких нейтронов в итоговую оценку Λ . Вместе с тем по сравнению с Λ учет функции ценности почти не оказывает влияния на $\beta_{\text{эф}}$, что можно объяснить тепловым спектром системы.

Исследование влияния параметров критических стенов. Следующим этапом проводимого исследования являлся поиск зависимости коррекции функционалов от различных параметров критических стенов, таких, как концентрация борной кислоты, размер сборки, обогащение топлива.

Влияние концентрации борной кислоты.

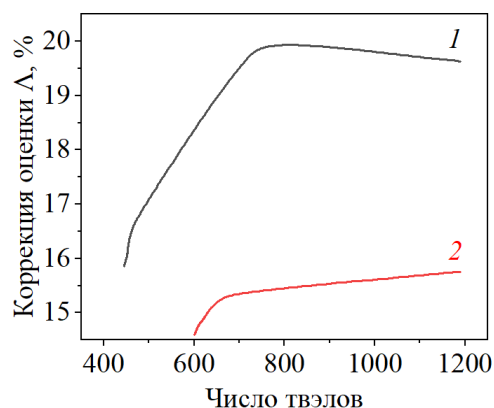
Результаты расчетов эксперимента LCT-015 в двух конфигурациях без учета (MCU) и с учетом ценности (MCUadj) приведены в табл. 2. Содержание борной кислоты в варианте 162/161 составляет 1,1 г/л, в варианте 163/161 — 5,8 г/л. Увеличение концентрации поглотителя в замедлителе приводит к уменьшению коррекции оценок на 0,2% для $\beta_{\text{эф}}$ и 6% для Λ в результате возросшего поглощения в отражателе: меньше нейтронов, попавших в отражатель, могут вернуться обратно в сборку.

Т а б л и ц а 2. Результаты расчета $\beta_{\text{эф}}$ и Λ конфигураций эксперимента LCT-015

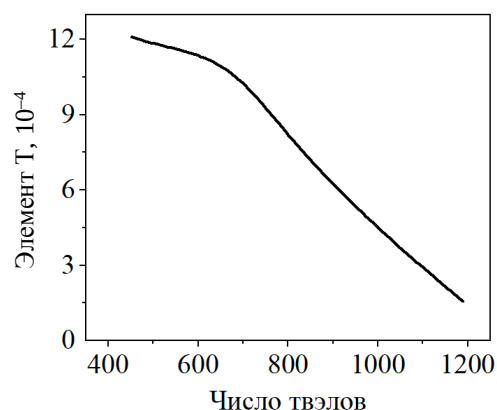
Функционал	LCT-015 162/161			LCT-015 163/161		
	MCU	MCUadj	Δ , %	MCU	MCUadj	Δ , %
$\beta_{\text{эф}}, 10^{-5}$	778	788	-1,2	758	765	-1
$\Lambda, 10^{-5} \text{ с}$	2,72	2,44	11,5	2,12	2,02	4,9

Влияние размера сборки и обогащения топлива.

На рис. 4 показана зависимость коррекции оценки Λ от размера сборки для двух вариантов, различающихся обогащением топлива: 4,4% (LCT-053) и 6,5% (LCT-085). Характер зависимостей можно объяснить, рассмотрев два крайних случая: систему, состоящую из нескольких твэлов, и бесконечную решетку. Если размеры системы малы, ценность нейтронов в центре и на периферии сборки почти одинакова, поэтому необходимости во взвешенной оценке нет. По мере увеличения размеров повышается градиент ценности, в результате появляется необходимость взвешивать вклад в оценку. Однако для больших систем доля нейтронов, вылетевших из сборки в отражатель, уменьшается.



Р и с. 4. Зависимость коррекции оценки Λ от размеров сборки при обогащении 6,5 (1) и 4,4% (2)



Р и с. 5. Зависимость вклада нейтронов из центральной части в деление на периферии сборки

С использованием элементов матрицы делений T можно, проведя нормировку, получить зависимость вероятности попадания нейтрона из центральной части на периферию и вызова там деления от размера системы (рис. 5). Таким образом, в предельном случае — бесконечной решетке влияние функции ценности при расчете функционалов кинетики стремится к нулю.

Как видно на рис. 4, повышение обогащения приводит к увеличению коррекций оценок примерно на 27%, что вызвано увеличением числа нейтронов в системе и, как следствие, числа нейтронов, вылетающих из сборки в отражатель.

Заключение. В работе проанализирован учет зависимости функции ценности от фазовых координат на точность оценок функционалов нейтронной кинетики — эффективной доли запаздывающих $\beta_{\text{эф}}$ и времени жизни мгновенных нейтронов Λ . В результате численного моделирования различных экспериментов получено, что наибольшая коррекция оценок необходима в системах с большим временем жизни нейтронов в отражателе.

Анализ расчетов также показал, что наибольшая коррекция соответствует относительно небольшим системам с большим числом нейтронов. Важным результатом исследования является пренебрежимо малая коррекция при учете функции ценности в расчете бесконечных или близких к бесконечным систем. Это подтверждает достоверность расчетов $\beta_{\text{эф}}$ и Λ при полномасштабном моделировании активных зон реакторов, которые проводились в предположении, что функция ценности является константой на всем фазовом пространстве.

Работа выполнена с использованием вычислительных ресурсов Объединенного вычислительного кластера НИЦ «Курчатовский институт».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Dement'ev V.G., Oleinik D.S. Monte Carlo simulation of the neutron characteristics of VVER-1000 core using the MCU-PD program and comparison of the results with calculations by the BIPR-7A program and experimental data. — *Phys. Atom. Nuclei*, 2011, v. 74, p. 1831—1835.
2. Vitali V., Chevallier F., Jinaphanh A. e.a. Comparison of direct and adjoint k and α -eigenfunctions. — *J. Nucl. Engng*, 2021, № 2, p. 132—151.
3. Zoia A., Nauchi Y., Brun E., Jouanne C. Monte Carlo analysis of the CROCUS benchmark on kinetics parameters calculation. — *Ann. Nucl. Energy*, 2016, v. 96, p. 377—388.
4. Гомин Е.А. Статус MCU-4. — *Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика ядерных реакторов*, 2006, вып. 1, с. 6—32.
5. Kiedrowski B. Theory, Interface, Verification, Validation, and Performance of the Adjoint-Weighted Point Reactor Kinetics Parameter Calculations in MCNP. LA-UR-10-01700, 2010.
6. Kalugin M.A., Oleynik D.S., Shkarovsky D.A. Overview of the MCU Monte Carlo software package. — *Ann. Nucl. Energy*, 2015, v. 82, p. 54—62.
7. Гуревич М.И., Олейник Д.С., Шкаровский Д.А. Адаптация программы MCU-PD к параллельным вычислениям на многопроцессорных компьютерах. — *Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика ядерных реакторов*, 2009, № 4, с. 66—77.
8. Gurevich M.I., Kalugin M.A., Oleynik D.S., Shkarovsky D.A. Estimation of some neutron physics characteristics by Monte Carlo method using the importance function. — *Ann. Nucl. Energy*, 2019, v. 130, p. 388—393.
9. Гуревич М., Дайченко Ю., Калугин М. и др. Исследование влияния функции ценности нейтронов на точность расчета эффективной доли запаздывающих и времени генерации мгновенных нейтронов по программе MCU. — *Атомная энергия*, 2022, т. 132, вып. 5, с. 259—264.
10. International Handbook of Evaluated Criticality Safety Benchmark Experiments: NEA/NSC/DOC(95)03, 2002.
11. Золотухин В.Г., Майоров Л.В. Оценка параметров критичности реакторов методом Монте-Карло. М.: Энергоатомиздат, 1984. 120 с.
12. Brown F., Kiedrowski B., Wilson P. Adjoint-weighted tallies for k -eigenvalue calculations with continuous-energy Monte Carlo. — *Nucl. Sci. Engng*, 2011, v. 168, № 3, p. 226—241.
13. Гуревич М.И., Шкаровский Д.А. Расчет переноса нейтронов методом Монте-Карло по программе MCU. Учебное пос. М., НИЯУ МИФИ, 2012. 154 с.
14. Гуревич М.И., Шкаровский Д.А. Расчет переноса нейтронов методом Монте-Карло по программе MCU в примерах. Учебное пос. М., МФТИ, 2018. 160 с.

15. Oleinik D.S. Monte Carlo calculation of weakly coupled systems. — Atomic Energy, 2005, v. 99, № 4, p. 694—701.
16. Brown F., Carney S., Kiedrowski B., Martin W. Fission Matrix Capability for MCNP. Part I. Theory. Mathematics & Computation. LA-UR-13-23152, 2013.

17. Забродская С.В., Игнатюк А.В., Кошечев В.Н. и др. РОСФОНД — Российская национальная библиотека оцененных нейтронных данных. — Вопросы атомной науки и техники. Сер. Ядерные константы, 2007, вып. 1—2, с. 3—21.

Поступила в Редакцию 15.11.22

УДК 621.039.548.34

СРАВНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ КОРРОЗИОННОЙ СТОЙКОСТИ СТАЛИ ЭП823 В СВИНЦОВОМ И СВИНЦОВО-ВИСМУТОВОМ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕ

Биржевой Г.А., Троянов В.М. (АО «ГНЦ РФ — ФЭИ», г. Обнинск)

e-mail: birzhevoy@ippe.ru

Использование тяжелых жидких металлов в реакторных технологиях и прежде всего в качестве теплоносителя быстрых ядерных реакторов широко изучается во всем мире. Как правило, речь идет об использовании свинца или эвтектики свинец—висмут. В нашей стране сооружается опытно-демонстрационный реактор БРЕСТ ОД-300 со свинцовым теплоносителем, разработан проект реактора СВБР-100, теплоносителем которого является эвтектика свинец—висмут. Однако препятствием для использования тяжелых жидкометаллических теплоносителей является коррозия конструкционных материалов, в первую очередь, элементов активной зоны из-за высокой температуры.

В качестве материала оболочек твэлов, органов регулирования и защиты реакторов БРЕСТ ОД-300 и СВБР-100 выбрана 12%-ная хромистая сталь ферритно-мартенситного класса 16Х12МВСФБР (ЭП823). Марочный состав стали в соответствии с ТУ 14-1-1135—2020 [1] следующий:

C ...	0,14—0,18	V ...	0,2—0,4
Si ...	1,0—1,3	Nb ...	0,2—0,4
Mn ...	0,5—0,8	Ce + La ...	≤0,1
Cr ...	10,0—12,0	S ...	≤0,01
Ni ...	0,5—0,8	P ...	≤0,015
W ...	0,5—0,8	Fe ...	Основа
Mo ...	0,6—0,9		

Установлено, что в зависимости от концентрации кислорода, растворенного в теплоносителе $C_{[O]}$, наблюдаются три механизма взаимодействия свинца и свинца—висмута со сталью. При содержании кислорода $C_{[O]} \leq 10^{-7}\%$ по массе наблюдается жидкометаллическая коррозия стали, заключающаяся в ее растворении, при содержании $C_{[O]} \geq 10^{-5}\%$ по массе отмечается

коррозия, сопровождаемая неконтролируемым окислением стали на большую глубину. При промежуточной концентрации кислорода на поверхности стали образуется защитная оксидная пленка, препятствующая как жидкометаллической, так и кислородной коррозии. Для БРЕСТ ОД-300 и СВБР-100 в качестве рабочего выбран интервал концентрации кислорода $(1—4)10^{-6}\%$ по массе.

Атомная доля свинца в эвтектике свинец—висмут составляет 44,5%. Представляет интерес сравнение скорости коррозии стали ЭП823 в жидком свинце и эвтектике свинец—висмут. Специальных экспериментов в этой области не проводилось, однако есть возможность сравнить их влияние на сталь ЭП823, используя результаты испытаний в неизотермических циркуляционных стендах.

Скорость коррозии стали ЭП823 в жидком свинце и эвтектике свинец—висмут. Доступные данные ограничиваются 1998—2014 гг. и выполнены в АО «ГНЦ РФ — ФЭИ» [2—7]. Большая часть результатов приведена для содержания кислорода $(1—4)10^{-6}\%$ по массе. При этом в работе [4] также отмечается, что сталь ЭП823, предназначенная для использования в качестве оболочек твэлов, выплавляется из особо чистых шихтовых материалов, что обеспечивает ее эксплуатационную надежность при контакте с тяжелыми жидкометаллическими теплоносителями.

Максимальная толщина оксидной пленки на поверхности стали ЭП823 после испытаний в свинце—висмуте при различной температуре приведена в работе [2] (табл. 1). В работе [3] показано, что толщина оксидной пленки после испытаний в свинце при 650 °С и концентрации