

6. Rana S., Subbaraman H., Fleming A., Kandadai N. Numerical analysis of radiation effects on fiber optic sensors. — *Sensors*, 2021, v. 21, p. 4111—4122.
7. Rovera A., Tancu A., Boetti N. e.a. Fiber optic sensors for harsh and high radiation environments in aerospace applications. — *Ibid.*, 2023, v. 23, p. 2512—2323.
8. Girard S., Morana A., Ladaci A. e.a. Recent advances in radiation-hardened fiber-based technologies for space applications. — *J. Optics*, 2018, v. 20(9), p. 093001.
9. Davydov R., Dudkin V., Logunov S., Bobyl A. Optical method for controlling the flow rate of the coolant in nuclear reactors. — In: *Proc. of the Intern. Conf. on Electrical Engineering and Photonics*, 2021, p. 179—183.
10. Cieslikiewicz-Bouet M., El Hamzaoui H., Ouerdane Y. e.a. Investigation of the incorporation of cerium ions in MCVD-Silica glass preforms for remote optical fiber radiation dosimetry. — *Sensors*, 2021, v. 21, p. 3362—3376.
11. Girard S., Kuhnhehn J., Gusarov A. e.a. Radiation effects on silica-based optical fibers: recent advances and future challenges. — *IEEE Transac. Nucl. Sci.*, 2013, v. 60(3), p. 2015—2036.
12. Toccafondo I., Alessi A., Blanc J. e.a. Irradiation of multimode Ge-doped and F-doped optical fibers at cryogenic temperatures down to 10 K. — *J. Lightwave Techn.*, 2023, v. 41, p. 286—292.
13. Girard S., Alessi A., Richard N. e.a. Overview of radiation induced point defects in silica-based optical fibers. — *Rev. Phys.*, 2019, v. 4, p. 100032.
14. Jiang R., Wang R., Guo J. e.a. Design and analysis of a two-dimensional large-scale silicon-photon optical phased array. — *Optics Laser Techn.*, 2022, v. 156, p. 108551.
15. Davydov V., Reznikov B., Dudkin V. New optical system for long distance control of electrical energy flows. — *Energies*, 2023, v. 16, p. 1040—1058.
16. Le Corre K., Barnini A., Robin T. e.a. Watt-level deep-UV subnanosecond laser system based on Nd-doped fiber at 229 nm. — *Optics Lett.*, 2023, v. 48, p. 1276—1279.
17. Davydov V.V., Davydov R.V., Kiryukhin A.V. e.a. Optical flowmeter for measuring the coolant flow rate in the primary loop of a nuclear reactor. — *Atomic Energy*, 2022, v. 132, № 5, p. 282—287.
18. Dmitrieva D.S., Pilipova V.M., Davydov V.V., Valiulin L.R. About compensation of radiation — induced losses in optical fibers. — *J. Phys.: Conf. Ser.*, 2020, v. 1695, p. 012130—012136.
19. Оборин А.В., Виллевальде А.Ю., Трофимчук С.Г. Государственный первичный эталон единиц кермы в воздухе, мощности кермы в воздухе, экспозиционной дозы, мощности экспозиционной дозы и потока энергии рентгеновского и гамма-излучения ГЭТ 8—2019. — *Измерительная техника*, 2020, № 8, с. 12—18.
20. Берлянд А.В. Государственный первичный эталон единиц поглощенной дозы и мощности поглощенной дозы фотонного, электронного, протонного излучений и в пучках ионов углерода, количества, флюенса, плотности потока и энергии частиц в пучках протонов и тяжелых заряженных частиц ГЭТ 38—2024. — *Там же*, 2024, № 9, с. 12—18.

Поступила в Редакцию 06.03.24

УДК 621.039.58

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ИНТЕГРАЛЬНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ QUENCH-10, -16 ПО ИССЛЕДОВАНИЮ ОКИСЛЕНИЯ ЦИРКОНИЕВЫХ ОБОЛОЧЕК ТВЭЛОВ В ПАРОВОЗДУШНОЙ СРЕДЕ

*Меркулов В.В., Федоров М.С., Васильев А.Д. (НИЦ «Курчатовский ин-т», г. Москва)
e-mail: fedorov_ms@nrcki.ru*

Одним из аспектов обоснования безопасности при проектировании АЭС является обеспечение водородной взрывозащиты при тяжелых запроектных авариях. Основным источником водорода при авариях с осушением и плавлением топлива является пароциркониевая реакция. Эксперименты 2000-х гг. показали, что при наличии воздуха характер ее протекания может изменяться. Такие данные были получены в том числе в рамках серии экспериментальных исследований QUENCH (Германия), которые были направлены на изучение процессов, происходящих при заливе водой осушенной разогретой активной зоны легководных реакторов [1]. Особое внимание уделялось влиянию параметров

экспериментов на скорость генерации и количество водорода, образующегося при окислении циркониевых оболочек твэлов, в том числе на стадии залива активной зоны водой. Исследования проводились для условий окисления в паровой и паровоздушной среде (табл. 1).

В экспериментах QUENCH-03, -06 исследовалось окисление оболочек твэлов в паровой среде в условиях, характерных для развития аварий в реакторной установке [2, 3]. Постановка экспериментов QUENCH-10, -16, -18 была приближена к условиям развития аварии в бассейне выдержки, при этом исследовалось влияние наличия воздуха на образование водорода [4].

Таблица 1. Параметры некоторых экспериментов серии QUENCH (Германия)

Эксперимент	Год проведения	Атмосфера	Масса водорода, г		Интегральная масса водорода, г
			до залива	во время залива	
3	1999	Пар	18	120	138
4	1999		10	2	12
5	1999		25	2	27
6	2000		32	4	36
10	2004	Паровоздушная смесь	47,6	5,2	52,8
11	2005	Пар	9	132	141
12	2006		34	24	58
16	2011	Паровоздушная смесь	16	128	144
LOCA	2016	Пар	—	—	0,8
18	2017	Паровоздушная смесь	57	238	295

В настоящей работе для моделирования экспериментов QUENCH-10, -16 использовали интегральный тяжелоаварийный код улучшенной оценки СОКРАТ, который предназначен для комплексного численного моделирования динамики физико-химических, теплогидравлических и термомеханических процессов, происходящих в реакторных установках с водяным теплоносителем типа ВВЭР при тяжелых запроектных авариях [5]. Модель окисления кода СОКРАТ может применяться для разных условий окисления циркониевых оболочек твэлов в заданном температурном диапазоне и позволяет описывать внешнее и внутреннее окисление, окисление с учетом растрескивания оксидных слоев и др. В расчетах использовали версию В1/В2 кода СОКРАТ.

Экспериментальная установка QUENCH.

Установка состояла из рабочего участка с пучком имитаторов твэлов, систем термостатирования, подачи воды и газов, измерения температуры имитаторов твэлов и концентрации газов. В экспериментах QUENCH-10, -16 конфигурация рабочих участков одинаковая, отличалась только продолжительность стадий эксперимента и расход газов на входе в него. Пучок из 21-го имитатора твэлов, моделирующий ТВС, содержал один необогреваемый стержень в центре и 20 электрообогреваемых стержней. Имитаторы твэлов состояли из вольфрамового сердечника,

таблеток диоксида циркония, моделирующих топливные таблетки, и циркониевой оболочки. Пучок был окружен чехлом из циркалоя-4, пористой изоляцией ZYFB-3 из диоксида циркония и стальной кольцевой рубашкой, охлаждаемой аргоном. Термопары были установлены по высоте пучка с шагом 100 мм. Смесь аргона и перегретого пара поступала в рабочий участок снизу. При заливе вода подавалась в нижнюю часть рабочего участка, аргон — в верхнюю.

Результаты расчета экспериментов QUENCH-10, -16. Эксперимент QUENCH-10 состоял из пяти стадий. На первой стадии продолжительностью 1920 с пучок твэлов разогревали до температуры не менее 873 К, на второй — стадии предварительного окисления в течение ~7200 с подавали смесь пара и аргона расходом 3 г/с, циркониевые оболочки имитаторов твэлов окислялись в паровой среде, на третьей — стадии охлаждения нагрев прекращали, в течение 2260 с максимальная температура оболочек твэлов снижалась до ~1190 К, на четвертой — стадии подачи воздуха продолжительностью ~1800 с подачу пара прекращали, пучок твэлов-имитаторов разогревался до ~2200 К, в рабочий участок подавали воздух расходом 1 г/с. Таким образом, окисление оболочек продолжалось в воздушной среде без водяного пара. В течение короткого времени ~50 с массовый расход кислорода на выходе из сборки равнялся нулю, создавались условия для кислородного голодания. Заключительной стадией эксперимента являлась стадия залива пучка твэлов водой, которую подавали расходом 50 г/с. Оболочки твэлов на этом этапе окислялись паром, образующимся при заливе (рис. 1, 2).

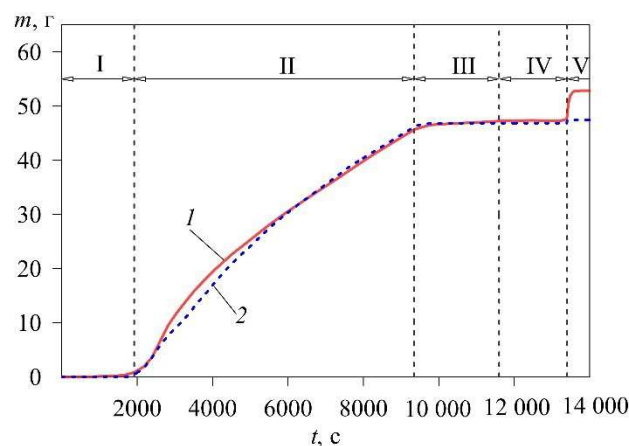
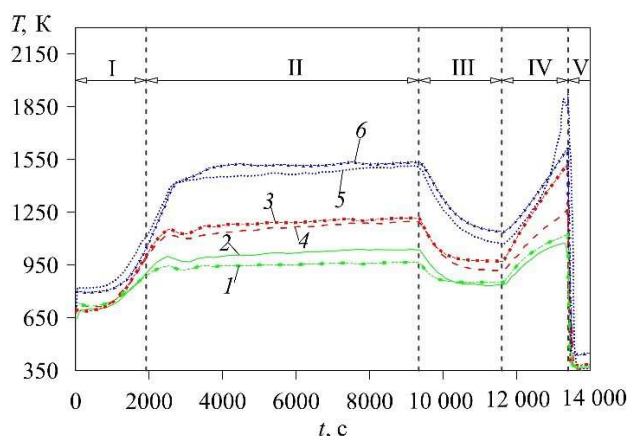


Рис. 1. Измеренное (1) и расчетное количество водорода (2) в эксперименте QUENCH-10



Р и с. 2. Расчетная (1, 3, 5) и измеренная температура (2, 4, 6) оболочек твэлов на высотной отметке +350, +550 и +950 мм соответственно в эксперименте QUENCH-10

На первой стадии расчетное количество водорода и температура оболочек на разных высотных отметках согласуются с экспериментом. На второй стадии также наблюдается качественное и количественное согласие: наибольшее отклонение расчетной температуры оболочек твэлов соответствует окончанию стадии 9340 с, наблюдается на высотной отметке +350 мм и составляет ~ 72 K, максимальное отклонение выхода водорода не превышало $\sim 0,4\%$. На третьей стадии расчет также согласуется с экспериментом, различие температуры не превышает 70 K, выход водорода — 3,3%. На четвертой стадии различие температуры возрастает и по окончании стадии составляет ~ 225 K: на нижней части пучка — 1842 K в эксперименте, 1617 K в расчете. На пятой стадии наблюдается качественно одинаковое изменение скорости генерации водорода в эксперименте и расчете, однако количественно результаты отличаются: в эксперименте на этапе залива выделилось 5,2 г водорода, в расчете предполагалось 0,8 г. Всего в эксперименте выделилось 52,8 г водорода, из них 47,6 г до залива, в расчете — 47,5 и 46,7 г соответственно.

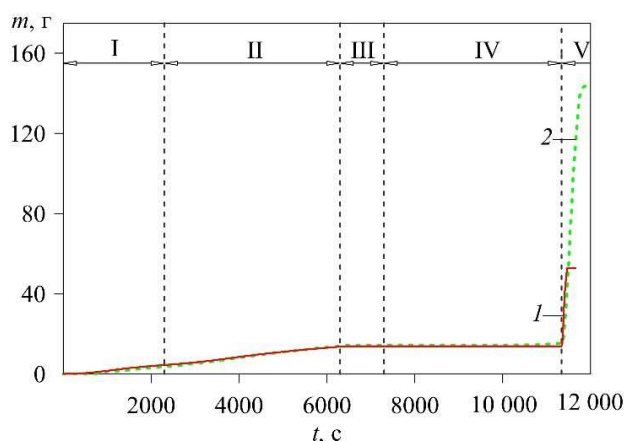
Посттестовые исследования оболочек твэлов-имитаторов показали, что, помимо пленки диоксида циркония, образовавшейся при окислении в паре на третьей стадии, на оболочках также появились локальные участки с рыхлым пористым веществом желтоватого цвета — нитридом циркония. Нитрид циркония образовывался и на четвертой стадии в условиях выдержки разогретых твэлов в воздушной среде и особенно интенсивно в условиях кислородного

голодания, когда на верхних высотных уровнях не оставалось кислорода. При последующем заливе на пятой стадии на внешней границе оболочки происходило окисление нитрида циркония.

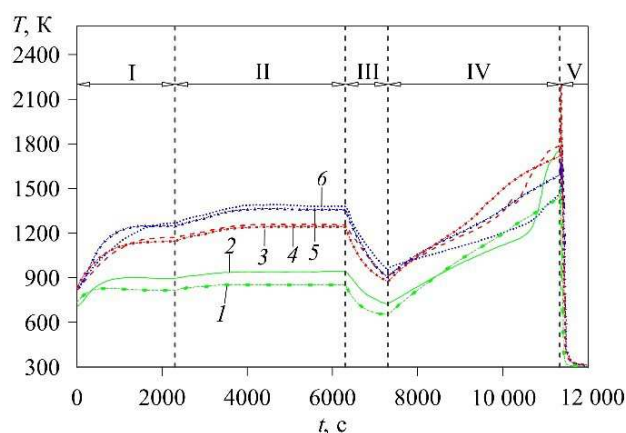
Частично образовавшийся в результате окисления нитридов циркония азот выделялся в канал рабочего участка, частично диффундировал вглубь оболочки имитатора твэла и взаимодействовал с цирконием, что приводило к локальному заглублению слоев нитрида и оксида циркония. Измерение выхода газов показало, что всего на стадии залива выделилось 3,5 г азота, что соответствует ~ 1 г водорода. Таким образом, в результате окисления нитридов циркония выделяется около 20% водорода на стадии залива. Отличие расчета от эксперимента на стадии залива топлива может быть объяснено тем, что из-за особенностей модели окисления кода СОКРАТ не учитывались процессы образования нитридов циркония на стадии кислородного голодания и их последующего окисления паром.

Для исследования влияния формирования нитридов циркония и их последующего окисления на образование водорода в эксперименте QUENCH-16 было сокращено время предварительного окисления и в несколько раз увеличена продолжительность стадии кислородного голодания.

На первой стадии эксперимента QUENCH-16 в течение 2300 с пучок твэлов разогревали до температуры ~ 1300 K с подачей в рабочий участок пара и аргона расходом 3,4 и 3 г/с соответственно. На второй стадии продолжительностью ~ 4000 с окислялись циркониевые оболочки имитаторов твэлов — их максимальная температура возрастала до 1380 K. На третьей стадии в течение 1000 с после прекращения нагрева максимальная температура оболочек твэлов снижалась до ~ 1000 K. На четвертой стадии подачу пара прекращали, пучок твэлов-имитаторов снова разогревался до ~ 1873 K, в рабочий участок подавали воздух расходом 0,2 г/с. Длительность четвертой стадии составила ~ 4040 с. При этом в течение ~ 860 с в сборке создавались условия для кислородного голодания. Таким образом, в отличие от эксперимента QUENCH-10 фаза кислородного голодания длилась значительно дольше — 860 с в эксперименте QUENCH-16, 50 с в QUENCH-10. По оконча-



Р и с. 3. Измеренное (1) и расчетное количество водорода (2) в эксперименте QUENCH-16



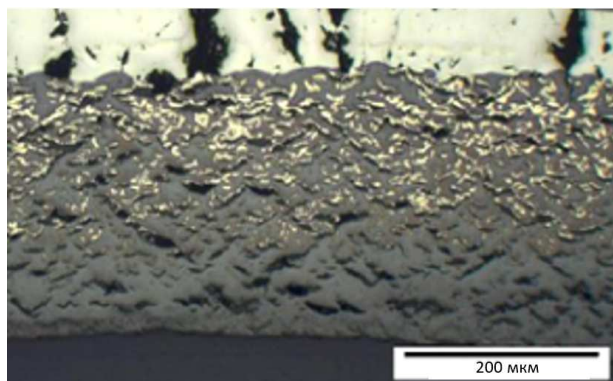
Р и с. 4. Расчетная (1, 3, 5) и измеренная температура (2, 4, 6) оболочек твэлов на высотной отметке +350, +550 и +950 мм соответственно в эксперименте QUENCH-16

нии четвертой стадии в рабочий участок подавали воду расходом 53 г/с — пятая стадия (рис. 3, 4).

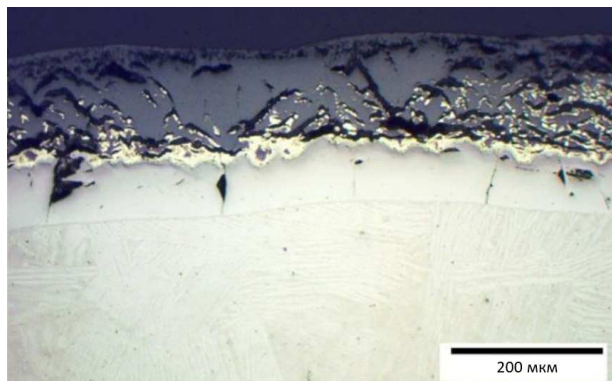
На первой стадии расчетное содержание водорода и температура оболочек на разных высотных отметках согласуются с экспериментом. На второй и третьей стадиях также видно совпа-

дение: наибольшее отклонение расчетной температуры оболочек твэлов соответствует окончанию второй стадии, высотной отметке +350 мм и не превышает 66 К, максимальное отклонение выхода водорода составляет ~2,9% — 13,8 г в эксперименте, 14,2 г — в расчете. На четвертой стадии максимальное различие температуры наблюдалось на отметке +350 и к окончанию стадии равнялось ~310 К — 1751 К в эксперименте, 1441 К в расчете. На пятой стадии наблюдалось качественно одинаковое изменение скорости образования водорода в эксперименте и расчете, но количественно результаты значительно отличаются: в эксперименте на этапе залива выделилось 128 г водорода, в расчете прогнозировались 48,9 г. Всего в эксперименте выделилось 144 г водорода — 16 г до залива, в расчете количество водорода составило 52,8 г — 13,8 г до залива.

Посттестовые исследования показали, что аналогично эксперименту QUENCH-10, помимо оксидной пленки, на поверхности твэлов образовывались локальные участки из нитрида циркония, который частично окислялся на стадии залива (рис. 5, а). Для сравнения на рис. 5, б показана микроструктура слоя $ZrO_2 + ZrN$, образовавшегося при окислении и нитридации оболочки из циркалоя в тесте по исследованию отдельных явлений в условиях изотермического окисления на воздухе при 1473 К [6]. Необходимо отметить, что в тесте по исследованию отдельных явлений не было фазы кислородного голодания в отличие от эксперимента QUENCH-16. Тем не менее качественно образцы похожи: в обоих случаях — отсутствие или наличие кислородного голодания, при окисле-



а



б

Р и с. 5. Структура оболочки твэла из Zry: а — эксперимент QUENCH-16; б — эксперимент по исследованию отдельных явлений

нии в воздушной атмосфере — формирование и рост преципитатов ZrN [6, 7]. Отличие между этими случаями заключается в дополнительном образовании слоя нитрида циркония в эксперименте QUENCH-16 с более длительной фазой кислородного голодания на границе раздела слоев $ZrO_2 + ZrN$ и металлического циркония. При этом поверхность раздела нитрид циркония/цирконий имела гребенчатый профиль, что увеличивало ее площадь и, как следствие, интенсифицировало окисление циркония на стадии залива водой.

Эффективный коэффициент диффузии слоя. При моделировании переноса кислорода в оболочке при окислении и нитридации интенсификацию окисления на стадии залива после стадии кислородного голодания можно учесть двумя способами. Первый способ — уменьшить толщину слоя диоксида циркония, что приведет к увеличению потока кислорода через слой, второй способ — ввести усредненный по объему эффективный коэффициент диффузии кислорода в слоях $ZrO_2 + ZrN$ и $\alpha\text{-Zr(O)} + ZrN$:

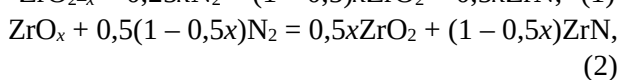
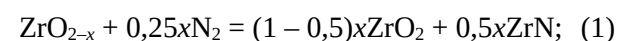
$$D_{d,\text{эф}} = K_d D_d;$$

$$D_{d,\text{эф}} = K_d D_\alpha,$$

где D_d , D_α — коэффициент диффузии кислорода в слое ZrO_2 и $\alpha\text{-Zr(O)}$ соответственно; K_d — фактор увеличения коэффициента диффузии.

В настоящей работе выбран подход с изменением эффективного коэффициента диффузии. Анализ экспериментальных исследований окисления циркониевых оболочек в паровоздушной среде [4, 7, 8] показал, что при возникновении кислородного голодания толщина слоя ZrO_2 не уменьшается. Более того, согласно представленным в настоящей статье результатам для совпадения с экспериментом QUENCH-16 диффузионный поток необходимо увеличить в 4 раза. Следовательно, также в 4 раза необходимо уменьшить толщину слоя. Такого значительного утончения слоя не наблюдается ни в одном эксперименте.

Реакция формирования нитридов циркония протекает в слоях циркония и оксида циркония согласно уравнениям



где x — показатель нестехиометрии.

Таким образом, нитридация протекает наиболее эффективно вблизи границы раздела $ZrO_2 + ZrN/\alpha\text{-Zr(O)}$, т.е. там, где имеются нестехиометрический диоксид циркония и металлический цирконий (показатель x не равняется нулю).

Из-за различия плотности циркония, оксида и нитрида циркония 5680, 6510, 7090 кг/м³ соответственно и вследствие роста механических напряжений в слое $ZrO_2 + ZrN$ в процессе окисления и нитридации появляются поры и трещины, т.е. защитные свойства оксидного слоя ухудшаются, что приводит к увеличению массопереноса кислорода и азота через слой $ZrO_2 + ZrN$, т.е. к росту эффективного коэффициента диффузии кислорода. С использованием уравнений (1), (2) можно оценить пористость слоев $ZrO_2 + ZrN$ и $\alpha\text{-Zr(O)}$. Для случая отсутствия кислородного голодания оценка показала пористость 0,04—0,1. В условиях кислородного голодания такая же оценка показала рост — пористость составляет 0,15—0,25. При достаточно продолжительной фазе кислородного голодания, как в эксперименте QUENCH-16, резко возрастает объемная доля $\alpha\text{-Zr(O)}$. В дальнейшем при взаимодействии с азотом в этой нестехиометрической металлической фазе $\alpha\text{-Zr(O)}$ интенсивно формируются нитриды циркония.

Увеличение эффективного коэффициента диффузии кислорода в циркониевой оболочке со сформировавшимися очагами нитрида циркония можно оценить, используя реализованный в работе [9] подход. Стационарная диффузия вблизи поры радиусом a в приближении сферической формы пор может быть записана в следующем виде:

$$\Delta c = 0;$$

$$c|_{r=a+0} = sc|_{r=a-0};$$

$$D_0 \mathbf{n} \nabla c|_{r=\alpha+0} = D_1 \mathbf{n} \nabla c|_{r=\alpha-0},$$

где c — концентрация кислорода; s — коэффициент сегрегации, показывающий отношение концентрации примеси в материале к концентрации на границе раздела фаз; r — радиальная координата, ее нулевое значение соответствует центру сферического включения; $\mathbf{n}$ — единичный нормальный вектор к поверхности раздела среды и поры; D_0 — коэффициент диффузии; D_1 — увеличенный коэффициент диффузии.

Увеличенный коэффициент диффузии обычно в 2—3 раза превышает стандартный.

Для описания эффективной диффузии кислорода в слое, включающем в себя смесь двух материалов, применима модель Максвелла—Гарнетта [10], в соответствии с которой эффективный коэффициент диффузии можно оценить по формуле

$$\frac{D_{d,эф} - D_d}{D_{d,эф} + 2D_d} = p \frac{D_f - D_d}{D_f - 2D_d};$$

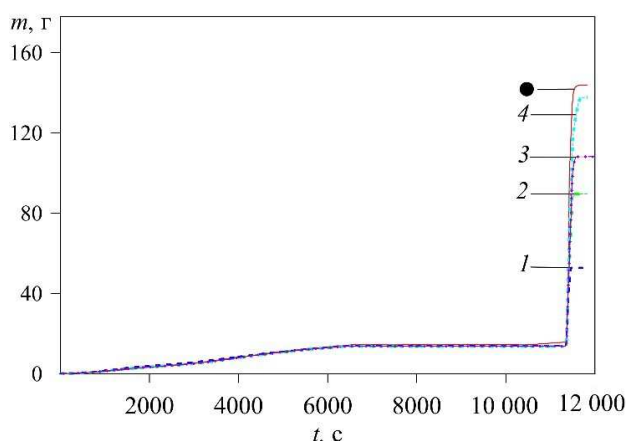
$$K_d = D_{d,эф} / D_d,$$

где D_d — область плотного диоксида циркония; p — объемная доля включения, в данном случае $p = \varepsilon$ — пористость; D_f — область пор и область, непосредственно примыкающая к порам. Эффективный коэффициент диффузии нелинейно зависит от пористости и параметра сегрегации (табл. 2). Для его увеличения в слоях оксида и нитрида циркония на стадии залива в уравнение диффузии модуля СВЕЧА был добавлен дополнительный множитель K_d и проведены варианты расчеты. На рис. 6 показаны результаты расчета интегрального количества водорода в эксперименте QUENCH-16 для базового расчета ($K_d = 1$) и вариантных $K_d = 2, 3, 4$. Видно, что для $K_d = 4$, что соответствует пористости $\varepsilon \sim 0,22$, расчет коррелирует с экспериментом.

Таблица 2. Оценочный фактор увеличения эффективного коэффициента диффузии K_d при $D_f/D_d = 100$

Пористость	Параметр сегрегации	K_d
0,02	1	1,06
0,05	1	1,17
0,1	1	1,41
0,2	1	2,31
0,3	1	5,19
0,02	0,8	1,33
0,05	0,8	1,46
0,1	0,8	1,78
0,2	0,8	2,89
0,25	0,8	4,12

Таким образом, значительное занижение расчетного количества водорода в эксперименте QUENCH-16 по сравнению с экспериментом QUENCH-10 может быть объяснено более дли-



Р и с. 6. Интегральная масса водорода в эксперименте QUENCH-16 (●) и расчетная с эффективным коэффициентом диффузии 1 (1), 2 (2), 3 (3), 4 (4)

тельной фазой кислородного голодания и меньшей толщиной защитного слоя диоксида циркония — 130 вместо 500 мкм, образованного на этапе предварительного окисления. Это привело к образованию большего количества нитрида циркония и, как следствие, к увеличению массы водорода, выделившегося на стадии залива в результате повышенного массопереноса через потерявший защитные свойства оксидный слой и в результате окисления нитридов.

Выводы. Результаты расчета экспериментов QUENCH-10, -16 с использованием кода СОКРАТ-B1/B2 удовлетворительно согласуются с экспериментом на стадиях разогрева, предварительного окисления и охлаждения. Однако на этапе залива после стадии кислородного голодания расчетное количество водорода оказывается значительно ниже экспериментального. Расчетная недооценка массы водорода связана с тем, что при моделировании не учитывались образование нитридов циркония на стадии кислородного голодания и их вклад в последующее окисление циркония на стадии залива.

Аналитическая оценка показывает, что эффективный коэффициент диффузии в слое из оксида и нитрида циркония будет в несколько раз выше по сравнению со слоем оксида циркония, что приведет к значительной интенсификации окисления и, как следствие, к росту массы водорода, образовавшегося на стадии залива.

Таким образом, модели высокотемпературного окисления циркониевых оболочек твэлов в паровоздушной среде в интегральных тяжелоаварийных кодах должны учитывать такие процессы, как кислородное голодание, образование

и последующее окисление нитридов циркония, а также интенсификацию окисления металлического циркония вследствие образования нитридов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Steinbrück M., Große M., Sepold L., Stuckert J. Synopsis and outcome of the QUENCH experimental program. Forschungszentrum Karlsruhe FZKA 6295. — Nucl. Engng Des., 2010, v. 240, p. 1714—1727.
2. Hofmann P., Homann C., Leiling W. e.a. Experimental and Calculational Results of the Experiments QUENCH-02 and QUENCH-03. Forschungszentrum Karlsruhe FZKA 6235, 2000.
3. Sepold L., Hering W., Homann C. e.a. Experimental and Computational Results of the QUENCH-06 Test (OECD ISP-45). Forschungszentrum Karlsruhe FZKA 6235, 2004.
4. Schanz G., Heck M., Hozer Z. e.a. Results of the QUENCH-10 Experiment on Air Ingress. Forschungszentrum Karlsruhe FZKA 7087. SAM-LACOMERA-D09, 2006.
5. Bolshov L., Strizhov V. SOCRAT — the system of codes for realistic analysis of severe accidents. — In: Congress on Advances in Nuclear Power Plants (ICAPP '06). USA, 2006, Paper 6439.
6. Steinbrück M., Schaffer S. High-temperature oxidation of zircaloy-4 in oxygen—nitrogen mixtures. — J. Oxid. Met., 2016, v. 33, p. 245—262.
7. Stuckert J., Große M., Hozer Z. e.a. Experimental Results of the QUENCH-16 Bundle Test on Air Ingress. Forschungszentrum Karlsruhe GmbH, Karlsruhe, 2013.
8. Steinbrück M. High-temperature reaction of oxygen-stabilized α -Zr(O) with nitrogen. — J. Nucl. Mater., 2014, p. 46—55.
9. Markel V. Introduction to the Maxwell—Garnett Approximation. — J. Optical Soc. Am., 2016, v. 33(7), p. 1244—1256.
10. Frolova K.P., Vilchevskaya E.N. Effective diffusivity of transversely isotropic material with embedded pores. — J. Mater. Phys. Mech., 2021, v. 47, p. 937—950.

Поступила в Редакцию 23.10.24

УДК 621.039-78

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЧНОСТИ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ С БОРСОДЕРЖАЩИМ НАПОЛНИТЕЛЕМ ДЛЯ НЕЙТРОННОЙ ЗАЩИТЫ

Четвериков Ю.О., Дергачева Е.В., Тарнавич В.В. (НИЦ «Курчатовский ин-т» — ПИЯФ, г. Гатчина),
Кротов А.В. (ООО «РАД», г. Всеволожск), Мурашев М.М. (НИЦ «Курчатовский ин-т», г. Москва),
Смирнов И.В. (СПбГУ, г. Санкт-Петербург).
e-mail: chetverikov_yo@pnpi.nrcki.ru

Изготовление методом послойного наплавления нитей расплавленного пластика — недорогой и эффективный метод производства индивидуальных изделий сложной формы. Свойства пластиковой нити можно изменить за счет введения в матрицу полимера материала с заданной функциональной характеристикой. В настоящей работе таким материалом является порошок с высоким сечением поглощения нейтронов. Его соединение с полимером можно использовать как материал для трехмерной печати, обеспечивая при этом необходимую функциональную характеристику — защиту от нейтронного излучения. Подобный подход широко используется для исследования таких свойств материала, как электропроводность, намагниченность и бактерицидные свойства [1—3]. Защита от ионизирующего излучения является еще одной характеристикой, которая также находится в стадии изучения.

Введение борсодержащих порошков в пластиковую нить для трехмерной печати позволяет повысить эффективность защиты от тепловых нейтронов. По сравнению с другими элементами с большим сечением захвата нейтронов, которые обычно используются в качестве экранирующих нейтронное излучение материалов, такими, как кадмий и гадолиний, бор имеет относительно низкую энергию γ -излучения при захвате. Низкоэнергетический спектр излучения существенно снижает требования к размеру и массе биологической защиты от вторичного излучения материала поглотителя.

Наиболее распространенным наполнителем композитов нейтронной защиты для трехмерной печати является порошок карбида бора. Из-за высоких абразивных свойств карбида, приводящих к порче печатающего устройства, исследуются другие борсодержащие материалы с низкой твердостью, такие, как гексагональный нит-