

УДК 621.039.54

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПЛАСТИНЧАТЫХ РЕШЕТОК-ИНТЕНСИФИКАТОРОВ ТЕПЛООБМЕНА В СБОРКАХ ТИПА ТВСА-Т

Самойлов О.Б., Шипов Д.Л., Куприянов А.В., Шолин Е.В., Вишневая Т.Ю., Молодцов А.А., Осин А.Б.
(АО «ОКБМ Африкантов», г. Нижний Новгород), Дмитриев С.М., Хробостов А.Е., Доронков Д.В.
(Нижегородский государственный технический ун-т им. Р.Е. Алексеева, г. Нижний Новгород),
Морозкин О.Н. (АО «ТВЭЛ», г. Москва)
e-mail: dep105@okbm.nnov.ru

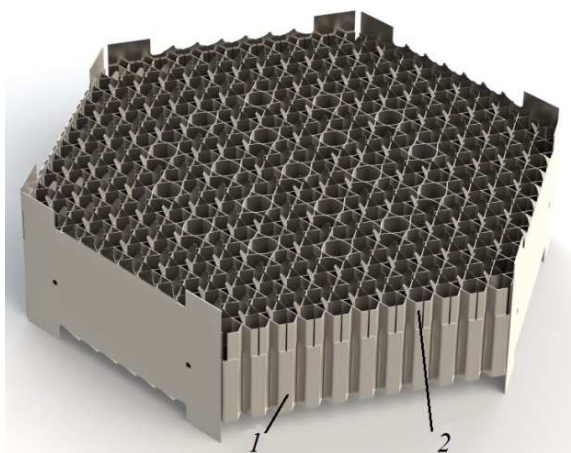
В связи с созданием сборки ТВСА-Т для реакторов АЭС «Темелин» (Чехия) с необходимыми термомеханическими и теплогидравлическими характеристиками, включая совместимость, была разработана комбинированная дистанционирующая решетка, состоящая из сотовой типа ТВСА и пластинчатой решетки перемешивания теплоносителя и интенсификации теплообмена с дефлекторами по схеме «закрутка потока теплоносителя вокруг твэлов» (рис. 1). ТВСА-Т характеризуется увеличенными до 510 мм шагом расположения и до 35 мм высотой дистанционирующих решеток. Разработана пластинчатая решетка с дефлекторами без функции дистанционирования. Расположение дефлекторов в ней организовано таким образом, чтобы обеспечивать закрутку потока вокруг твэлов. Эффективность и теплогидравлическое обоснование применения перемешивающих решеток исследовали совместно в АО «ОКБМ Африкантов», АО «ГНЦ РФ — ФЭИ» и НГТУ им. Р.Е. Алексеева.

Исследования показали, что критическая мощность модели ТВСА-Т по сравнению с ТВСА на 10% выше [1]. Повышение критической мощности решает две задачи: рост эконо-

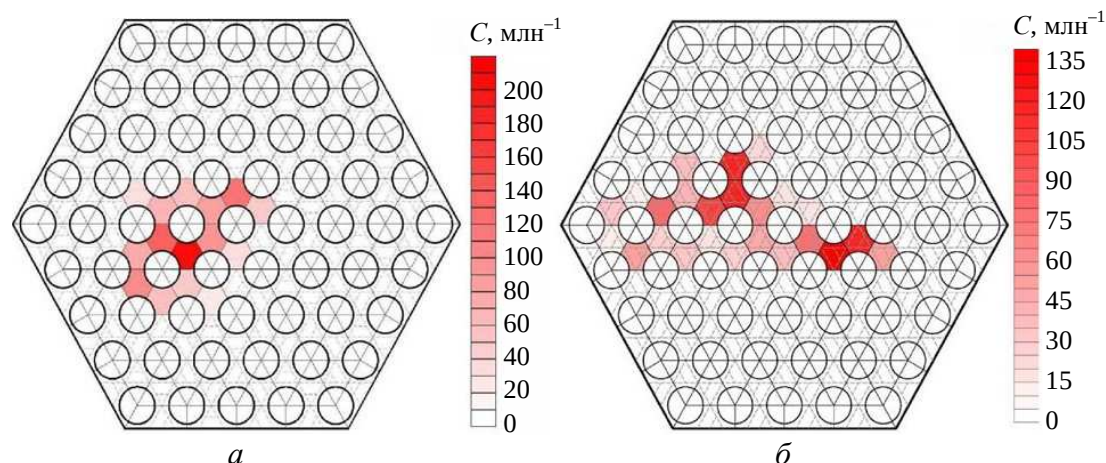
мических характеристик энергоблоков за счет увеличения эксплуатационной мощности и улучшения параметров теплоносителя с сохранением определенного запаса по мощности до кризиса теплоотдачи и повышение безопасности и гибкости топливного цикла благодаря увеличенному запасу до кризиса теплового потока. Критическую мощность можно повысить как за счет интенсификации тепломассообмена, так и выравнивания локальных параметров теплоносителя по поперечному сечению ТВС [2]. Экспериментальные исследования влияния на кризис тепломассообмена размещения в ТВС в дополнение к сотовым дистанционирующим решеткам-интенсификаторам сотовых промежуточных решеток различного типа приведены в работе [3]. Настоящая работа посвящена исследованиям возможности дальнейшего повышения критической мощности в сборке типа ТВСА-Т. Представлены результаты интенсификации тепломассообмена и перемешивания теплоносителя, обоснован выбор конструкции, числа, расположения промежуточных решеток-интенсификаторов пластинчатого типа в комбинации с сотовыми дистанционирующими решетками в конструктивном исполнении ТВСА-Т с учетом гидравлических и термомеханических ограничений проекта.

Экспериментальные исследования гидродинамики и массообмена в ТВСА с решетками-интенсификаторами. Локальные характеристики межъячеечного массообмена потока в экспериментальных моделях ТВС изучали методом трассера на стенде, представляющем собой аэродинамический контур, через который прокачивается воздух [4]. Исследования проводили на 61-стержневой модели, геометрически соответствующей конструкции фрагмента ТВСА с перемешивающими решетками-интенсификаторами разных типов [5].

Исследования локальной гидродинамики и массообмена потока теплоносителя показали,

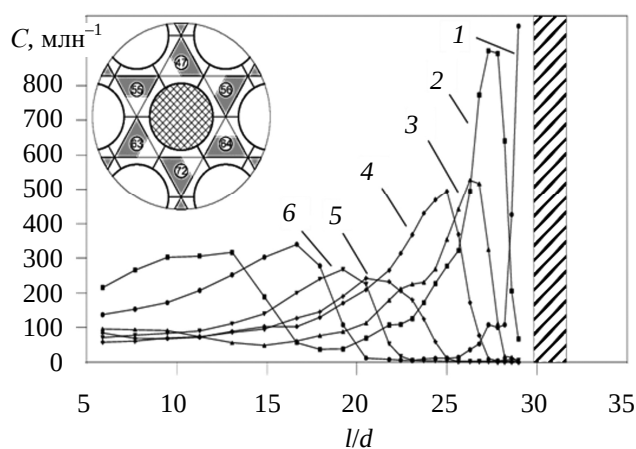


Р и с. 1. Комбинированная дистанционирующая решетка:
1, 2 — сотовая дистанционирующая и пластинчатая перемешивающая решетка соответственно



Р и с. 2. Распределение концентрации газа в поперечном сечении модели фрагмента ТВСА за перемешивающими решетками с дефлекторами типа «закрутка» (а) и «прогонка» (б)

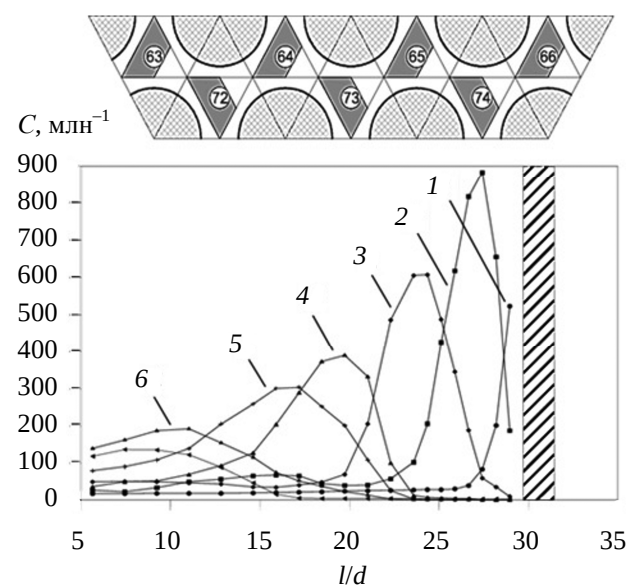
что за перемешивающими решетками-интенсификаторами теплообмена возникает отклоненный дефлектором поперечный поток, затем за счет конвективного переноса часть потока теплоносителя из каждой ячейки переходит в соседнюю, смешиваясь при этом с основным осевым потоком (рис. 2, 3). По направлению дефлекторов движется не весь поток теплоносителя, часть его поступает в соседние ячейки за счет значительно большего турбулентного массообмена вследствие дополнительной турбулизации потока дефлекторами (см. рис. 2). За перемешивающими решетками-интенсификаторами со схемой расположения дефлекторов «закрутка вокруг твэла» наблюдается винтовое, постепенно затухающее движение, обусловленное закруткой потока посредством дефлекторов (см. рис. 2, а, 3).



Р и с. 3. Распределение концентрации газа по длине 61-стержневой экспериментальной модели при постановке перемешивающей решетки типа «закрутка вокруг твэла»: 1 — зона 63; 2 — зона 72; 3 — зона 64; 4 — зона 56; 5 — зона 47; 6 — зона 55

Расположение дефлекторов согласно схеме «порядная прогонка» приводит к течению теплоносителя за решеткой, при котором твэлы, омываемые потоком, расположены в одном ряду, направленный поток теплоносителя, в основном, омывает только половину смоченного периметра твэлов данного ряда, другую половину омывает обратно направленный поток теплоносителя в соседнем ряду (см. рис. 2, б, 4).

Сопоставление картограмм концентрации газа за решетками разных типов показало, что за перемешивающими решетками-интенсификаторами типа «закрутка вокруг твэла» газ распространился в 15 ячеек вокруг точки подачи, за решетками типа «порядная прогонка» — в



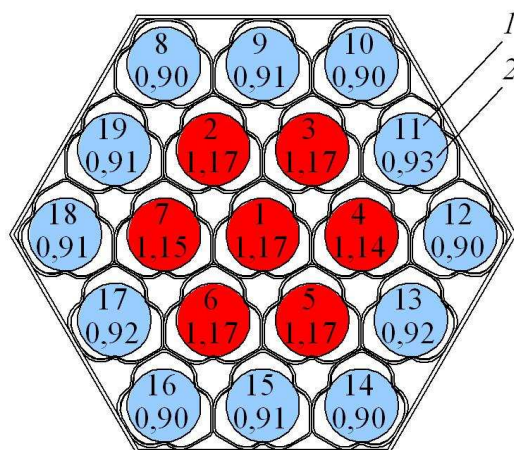
Р и с. 4. То же, что и на рис. 3, при постановке перемешивающей решетки типа «порядная прогонка»: 1 — зона 63; 2 — зона 72; 3 — зона 64; 4 — зона 73; 5 — зона 65; 6 — зона 74

24 ячейки, что свидетельствует о значительно более интенсивном перемешивании потока в поперечном сечении (см. рис. 2). Эффективное перемешивание газа в поперечном сечении модели заканчивается на расстоянии $l/d \sim 16$ —17 после решетки типа «закрутка вокруг твэла» и $l/d \sim 20$ —21 после решетки типа «порядная прогонка», что свидетельствует о большей длине распространения возмущений потока теплоносителя за решеткой с дефлекторами, расположенными по схеме «порядная прогонка» (см. рис. 3, 4).

Полученные результаты показывают, что пластинчатые перемешивающие решетки-интенсификаторы с дефлекторами потока, расположенными по схеме «прогонка», эффективнее решеток типа «закрутка», принятых ранее в ТВСА-Т (рис. 5).

Исследование критической мощности на электрообогреваемых моделях ТВСА-Т с пятью перемешивающими решетками-интенсификаторами. Экспериментальные исследования кризиса теплоотдачи на электрообогреваемых моделях ТВСА-Т проводили на теплофизическом стенде Л-186 АО «ОКБМ Африкантов».

Экспериментальные модели представляли собой пучки с длиной тепловыделения 3 м, состоящие из 19 труб-имитаторов твэлов наружным диаметром 9,1 мм, расположенных в треугольной решетке с шагом 12,75 мм. Тепловыделение осуществлялось за счет пропускания через трубки постоянного электрического тока. Толщину стенки имитаторов твэлов выбирали по электрическому сопротивлению таким образом, чтобы обеспечить заданное радиальное и аксиальное тепловыделение. Исследования с



Р и с. 6. Поперечное сечение сборки с центрально-симметричной радиальной неравномерностью энергоснабжения: 1 — номер имитатора твэла; 2 — коэффициент радиальной неравномерности энергоснабжения

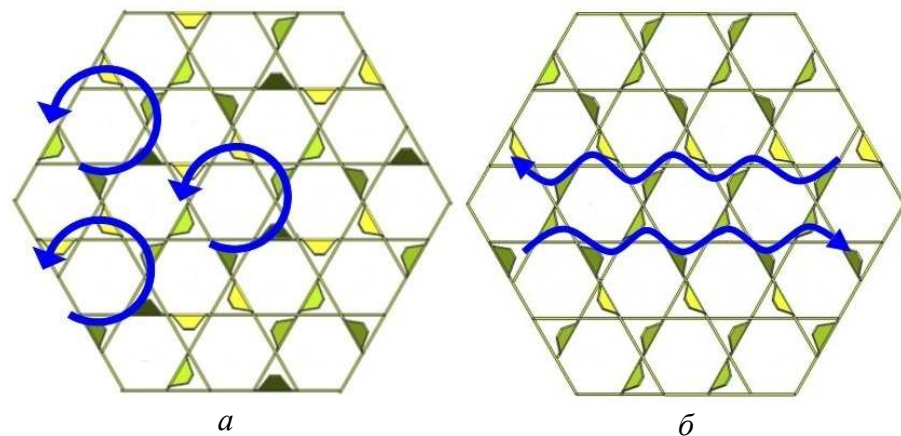
пятью перемешивающими решетками-интенсификаторами проведены на четырех моделях:

модель 1 — с центрально-симметричной радиальной неравномерностью энергоснабжения и равномерным аксиальным энергоснабжением (рис. 6);

модель 2 — с равномерным радиальным энергоснабжением и аксиальной неравномерностью энергоснабжения с максимумом наверху;

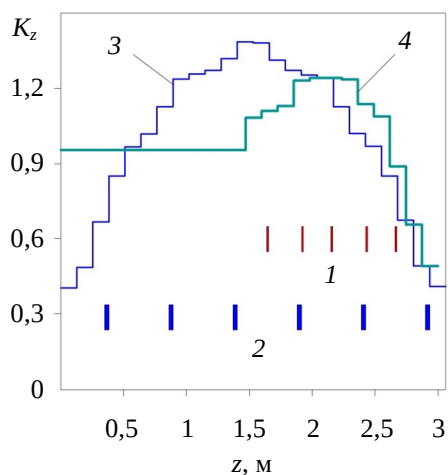
модель 3 — с центрально-симметричной радиальной неравномерностью энергоснабжения и аксиальной неравномерностью энергоснабжения с максимумом наверху;

модель 4 — с равномерным радиальным энергоснабжением и аксиальной неравномерностью энергоснабжения с максимумом в центре.



Р и с. 5. Пластинчатые решетки-интенсификаторы с дефлекторами потока, размещенными по схеме «закрутка» (а) и «прогонка» (б)

На моделях использовались шесть дистанционирующих решеток сотового типа высотой 35 мм, установленных с шагом 510 мм. В качестве перемешивающих использовали решетки пластинчатого типа с дефлекторами, расположение которых обеспечивало порядную прогонку теплоносителя. Высота пластин 15 мм без учета дефлекторов. Перемешивающие решетки устанавливали в верхних пролетах между дистан-

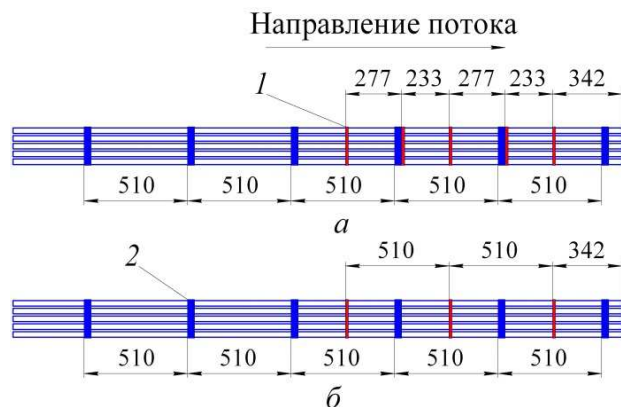


Р и с. 7. Расположение перемешивающих (1) и дистанционирующих решеток (2) в сопоставлении с аксиальной неравномерностью энерговыделения с максимумом в центре (3) и наверху (4) (z — расстояние от начала зоны тепловыделения; K_z — коэффициент аксиальной неравномерности энерговыделения)

ционирующими: по две в двух верхних пролетах и одну в третьем пролете согласно рис. 7, 8, а. Температуру имитаторов твэлов контролировали термозондами, размещенными во внутренних полостях имитаторов твэлов.

Для определения критической мощности модели выводили в режим кризиса теплоотдачи ступенчатым увеличением подводимой электрической мощности с шагом не более 0,5—1%. Наступление кризиса теплоотдачи фиксировали по скачкообразному изменению температуры стенки имитаторов твэлов.

Результаты экспериментальных исследований. Первые эксперименты были выполнены на моделях ТВСА без решеток-интенсификаторов и являлись базовыми для оценки эффективности конструктивных изменений. В качестве



Р и с. 8. Расположение трех (а) и пяти (б) перемешивающих (1) и дистанционирующих высотой 35 мм решеток (2) на моделях типа ТВСА-Т

показателя эффективности решеток-интенсификаторов и их размещения сравнивали критическую мощность, достигнутую на однотипных с точки зрения тепловыделения моделях:

$$\delta N_{\text{кр}} = \frac{1}{n_i} \sum_{(P, T \sim \text{const})}^n \frac{N_{\text{кр}}(G_i) - N_{\text{кр}}^{\text{баз}}(G_i)}{N_{\text{кр}}^{\text{баз}}(G_i)},$$

где $N_{\text{кр}}(G_i)$ — зависимость критической мощности модели с перемешивающими решетками-интенсификаторами от расхода теплоносителя G при постоянных давлении P и температуре теплоносителя на входе T , полученная степенной аппроксимацией данных; $N_{\text{кр}}^{\text{баз}}(G_i)$ — подобная зависимость по результатам экспериментов на базовой модели без решеток-интенсификаторов.

Согласно результатам исследования гидродинамических характеристик потока за перемешивающими решетками типа «прогонка» [6] установка дополнительных перемешивающих решеток в пролетах между дистанционирующими усиливает турбулизацию потока в наиболее напряженных областях сборок. Такие же результаты были получены на моделях с пятью перемешивающими решетками типа «прогонка».

Экспериментальные исследования на моделях с равномерным аксиальным энерговыделением. На моделях с равномерным аксиальным энерговыделением прирост критической мощности от применения пяти перемешивающих решеток-интенсификаторов типа «прогонка» составляет 20—25% по сравнению с базовой моделью без перемешивающих решеток при параметрах, приведенных в табл. 1. При этом критическая мощность увеличивается с ростом температуры на входе, что может свидетельствовать о повышении эффективности перемешивающих решеток типа «прогонка» при большем паросодержании.

Экспериментальные исследования на моделях с неравномерным аксиальным энерговыделением. Значительный положительный эффект от применения пяти перемешивающих решеток-интенсификаторов типа «прогонка» также наблюдался и на модели с неравномерным аксиальным энерговыделением — прирост критической мощности составил 25—30% относительно модели без перемешивающих решеток при параметрах, приведенных в табл. 1.

Таблица 1. Увеличение критической мощности моделей от применения пяти перемешивающих решеток типа «прогонка» относительно моделей без решеток-интенсификаторов при различных условиях аксиального энерговыделения

Давление, МПа	Температура на входе, °С	Расход, кг/с	Увеличение критической мощности, %
Равномерное аксиальное энерговыделение			
15,7	270	2,7—3,7	21
	290	1,8—4,3	22
	310	2,7—4,3	24
Аксиальная неравномерность энерговыделения с максимумом в верхней части			
15,7	290	1,8—3	26
16,2	290	1,8—4,5	31

Сравнение критической мощности, полученной на моделях с пятью перемешивающими решетками типа «прогонка» с разными видами аксиальной неравномерности энерговыделения, с максимумом в центре и максимумом наверху, показывает отсутствие заметного влияния эпюры неравномерного аксиального энерговыделения на критическую мощность. Тем самым установка пяти перемешивающих решеток типа «прогонка» на моделях типа ТВСА-Т с неравномерным аксиальным энерговыделением позволяет повысить критическую мощность на 25—30% относительно моделей без решеток-интенсификаторов в исследованном диапазоне режимных параметров.

Дополнительно для исследования влияния числа перемешивающих решеток на критическую мощность проводили эксперименты с тремя перемешивающими решетками (см. рис. 8, б). Исследования показали прирост критической мощности от их применения по сравнению с моделями без решеток-интенсификаторов на 15—20% [6]. На основании этого исследования можно проследить влияние числа перемешивающих решеток на критическую мощность. Еще одним фактором, позволяющим повысить критическую мощность, является оптимизация их шага установки [3].

Гидравлические испытания полномасштабных макетов. Гидравлические характеристики сборок типа ТВСА-Т с пластинчатыми перемешивающими решетками-интенсификаторами определяли на стенде ресурсно-гидравлических испытаний АО «ОКБМ Африкантов» на полномасштабных макетах ТВСА-Т и на макете

ТВСА с перемешивающими решетками со схемой размещения дефлекторов типа «прогонка» (см. рис. 5, б). Полномасштабный макет ТВСА-Т аналогичен по конструкции штатной ТВСА-Т, имеет шесть комбинированных решеток, включающих пластинчатые перемешивающие решетки со схемой размещения дефлекторов типа «закрутка» и две дистанционирующие решетки. Полномасштабный макет ТВСА с перемешивающими решетками состоял из восьми дистанционирующих и трех перемешивающих пластинчатых решеток со схемой размещения дефлекторов типа «прогонка» в середине пролетов между дистанционирующими решетками. Параметры стенда обеспечивали испытания в диапазоне чисел Рейнольдса от 100 000 до 450 000. Коэффициент гидравлического сопротивления участков макета определяли по формуле

$$\xi_i^{уч} = 2\Delta P_i^{гидр} F^2 / \rho Q^2,$$

где i — номер участка; $\Delta P_i^{гидр}$ — гидравлическое сопротивление i -го участка; ρ — плотность; Q — объемный расход. Наряду с общим сопротивлением ТВС определяли коэффициенты сопротивления отдельных участков, на которых были размещены дистанционирующие решетки и отдельно стоящие перемешивающие решетки-интенсификаторы.

Коэффициенты гидравлического сопротивления дистанционирующих решеток и решеток-интенсификаторов определялись по формуле

$$\xi_i^{ДР} = \xi_i^{уч} - [(L_j - L_j^{ДР}) / L_{безДР}] \xi_{безДР},$$

где j , L_j — номер и длина j -го участка с дистанционирующей решеткой; $L_j^{ДР}$ — высота j -й дистанционирующей решетки или решетки-интенсификатора; $\xi_{безДР}$ — коэффициент гидравлического сопротивления участка без решеток.

Коэффициенты гидравлического сопротивления сборок ТВСА-Т с восьмью дистанционирующими сотовыми и шестью пластинчатыми решетками-интенсификаторами приведены в табл. 2. Из сравнения следует, что сборка типа ТВСА-Т с шагом между сотовыми дистанционирующими решетками 510 мм по сравнению с базовой ТВСА-Т имеет резерв на размещение шести пластинчатых перемешивающих решеток с сохранением запаса гидравлического сопротивления по отношению к проектным ограничениям.

Таблица 2. Коэффициент гидравлического сопротивления макета сборки типа ТВСА-Т относительно базовой сборки ТВСА-Т

Коэффициент гидравлического сопротивления	ТВСА-Т	Типа ТВСА-Т
ТВС в целом	1	
Всех сотовых дистанционирующих	0,23	
Всех решеток-интенсификаторов	0,29	
ТВС в целом		0,89
Без решеток-интенсификаторов		0,71
Всех решеток-интенсификаторов		0,18

Исследования критической мощности и гидравлических характеристик позволяют заключить, что с помощью установки сборок типа ТВСА-Т с шестью перемешивающими решетками-интенсификаторами теплообмена типа «прогонка» и восьмью штатными дистанционирующими решетками можно увеличить запас по мощности на 15—20% по сравнению с эксплуатирующейся в настоящее время ТВСА-Т. Оптимизация размещения шести перемешивающих решеток в ТВС в сочетании с запасом по коэффициенту гидравлического сопротивления может быть применена для совершенствования термомеханических и функциональных характеристик сборки типа ТВСА-Т.

Комплекс экспериментальных исследований выполняли по договорам с АО «ТВЭЛ», а также в рамках реализации базовой части государственного задания № 12/17-01.10.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Самойлов О.Б., Лукьянов В.Е., Морозкин О.Н., Дмитриев С.М. Анализ эффективности применения перемешивающих решеток-интенсификаторов теплообмена в тепловыделяющих сборках альтернативной конструкции реакторов ВВЭР-1000. — Труды Нижего-

родского государственного технического ун-та им. Р.Е. Алексеева, 2010, т. 123, вып. 4, с. 120—131.

2. Баринов А.А., Дмитриев С.М., Хробостов А.Е., Самойлов О.Б. Методы обоснования теплотехнической надежности активной зоны тепловых водо-водяных реакторов. — Атомная энергия, 2016, т. 120, вып. 5, с. 270—275. // Barinov A.A., Dmitriev S.M., Khrobostov A.E., Samoilov O.B. Methods of thermomechanical reliability validation of thermal water-moderated and water-cooled reactor cores. — Atomic Energy, 2016, v. 120, № 5, p. 335—341.
3. Селиванов Ю.Ф., Лощинин В.М., Разживин И.В. Влияние на критическую мощность ТВС ВВЭР сотовых решеток, интенсификаторов теплообмена и перемешивания теплоносителя. — Там же, 2017, т. 123, вып. 6, с. 312—318. // Selivanov Yu.F., Loshchinin V.M., Razzhivin I.V. Effect of cellular lattices, heat-exchange intensifiers, and coolant mixing on the critical power of VVER FA. — Atomic Energy, 2018, v. 123, № 6, p. 376—383.
4. Дмитриев С.М., Варенцов А.В., Доронков Д.В. и др. Экспериментальные исследования гидродинамики потока теплоносителя за дистанционирующей и перемешивающей решетками ТВСА-12 PLUS реактора ВВЭР-1000. — Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика ядерных реакторов, 2017, № 1, с. 126—134.
5. Дмитриев С.М., Бородин С.С., Легчанов М.А. и др. Экспериментальные исследования гидродинамических и массообменных характеристик потока теплоносителя в ТВСА ВВЭР. — Атомная энергия, 2012, т. 113, вып. 5, с. 252—256. // Dmitriev S.M., Borodin S.S., Legchanov M.A. e.a. Experimental studies of hydrodynamic and mass-transfer properties of coolant flow in VVER fuel assemblies TVSA. — Atomic Energy, 2013, v. 113, № 5, p. 314—319.
6. Самойлов О.Б., Куприянов А.В., Фальков А.А. и др. Экспериментальные исследования теплотехнических характеристик ТВСА с перемешивающими решетками. — Там же, 2014, т. 116, вып. 1, с. 11—15. // Samoilov O.B., Kupriyanov A.V., Fal'kov A.A. e.a. Experimental investigation of the heat-engineering characteristics of TVSA fuel assemblies with mixing lattices. — Atomic Energy, 2014, v. 116, № 1, p. 14—19.

Поступила в Редакцию 05.07.19

УДК 536.422.1

ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКАЯ ДЕЗАКТИВАЦИЯ ОБЛУЧЕННОГО ЯДЕРНОГО ГРАФИТА УРАН-ГРАФИТОВЫХ ЯДЕРНЫХ РЕАКТОРОВ

Павлюк А.О., Беспала Е.В., Котляревский С.Г., Загуменнов В.С. (АО «ОДЦ УТР», г. Северск, Томская обл.), Захарова Е.В., Волкова А.Г., Родыгина Н.И. (ИФХЭ РАН, г. Москва)

e-mail: bespala90@yandex.ru

Активность облученного графита определяется активационными радионуклидами ^3H , ^{14}C , ^{55}Fe , ^{60}Co и др., продуктами деления ^{90}Sr , ^{106}Ru , ^{125}Sb , ^{133}Ba , ^{137}Cs , ^{154}Eu , ^{155}Eu и др. и трансурано-

выми элементами ^{241}Am , ^{243}Am , ^{244}Cm и др. [1, 2]. Стоимость его захоронения зависит от класса отходов, который определяется суммарной активностью входящих в его состав радио-