

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ФИЗИКА ЯДЕРНЫХ РЕАКТОРОВ

УДК 621.039.51

СОПРЯЖЕННЫЙ ТЕПЛОГИДРАВЛИЧЕСКИЙ И НЕЙТРОННО-ФИЗИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ТВС РЕАКТОРА ИР-8 С ПОМОЩЬЮ КОДОВ MSU-PTR/ATHLET

© 2020 г. К. И. Глыва^{а, б, *}, С. П. Никонов^а, Ю. Е. Песня^б, В. В. Трофимчук^б

^аНациональный исследовательский ядерный университет “МИФИ”, Каширское ш. 31, Москва, 115409 Россия

^бНИЦ “Курчатовский институт”, пл. Академика Курчатова 1, Москва, 123182 Россия

*E-mail: glyva_kostya@mail.ru

Поступила в редакцию 04.03.2021 г.

После доработки 11.05.2021 г.

Принята к публикации 12.05.2021 г.

В работе приведен анализ результатов моделирования одной из типов ТВС, используемых в исследовательском реакторе ИР-8. Статья является продолжением работ, в рамках которых был проведен анализ гидравлических испытаний восьми- и шеститрубной ТВС ИРТ-3М и выявлен характер изменения поля скоростей теплоносителя в поперечном сечении штатной шеститрубной ТВС, без учета энерговыделения в твэлах. Расчеты проводились с помощью программы для теплогидравлического расчета ATHLET. В данной работе приводятся результаты связанного теплогидравлического и нейтронно-физического расчета ТВС ИРТ-3М. Для нейтронно-физического расчета использовалась программа MSU-PTR. Мультифизичный подход позволяет учитывать влияние на результаты расчетов изменения физических свойств материалов активной зоны. Представлены результаты математического моделирования стационарной работы штатной ТВС ИРТ-3М мощностью 600 кВт. Отлажена совместная работа нейтронно-физического и теплогидравлического расчетных кодов. Получены основные теплофизические параметры ТВС: температуры теплоносителя, оболочек и топлива, определен запас до поверхностного кипения. Используя мультифизичный подход данные теплогидравлические параметры были уточнены. Полученные данные могут быть полезными для дальнейших расчетов подобных ТВС с использованием центрального канала ТВС для установки экспериментальных облучательных устройств. Кроме того, указанные распределения температур могут служить граничными условиями для расчетных моделей облучательных устройств, используемых в 3-х мерных CFD кодах. Результаты этой работы могут быть использованы при определении допустимой мощности исследовательских реакторов типа ИРТ: ИР-8 в НИЦ КИ (Москва), ИРТ-МИФИ в НИЯУ МИФИ (Москва), ИРТ-Т в ТПУ (Томск) и WWR-SM в ИЯФ (Ташкент).

Ключевые слова: мультифизичный подход, нейтронно-физический расчет, теплогидравлический расчет, исследовательский реактор, ИР-8, ТВС ИРТ-3М, ATHLET, MSU-PTR

DOI: 10.1134/S2079562920060251

ВВЕДЕНИЕ

Моделирование процессов в ядерных энергетических установках (ЯЭУ) и исследовательских ядерных реакторах (ИР) проводится в рамках связанного нейтронно-физического/теплогидравлического расчета. Мультифизичный подход необходим для учета влияния на результат моделирования изменений физических свойств материалов активной зоны (температур, плотностей, размеров, ядерных концентраций) происходящих как в режиме нормальной эксплуатации, так и при анализе переходных процессов и аварийных ситуаций.

Для повышения точности моделирования режимов нормальной эксплуатации ядерных реакторов может быть применен мультифизичный подход. Например, в легководных реакторах плотность

замедлителя влияет на размножающие свойства среды. Эффективные сечения взаимодействия нейтронов с материалами топлива и поглотителей нейтронов в резонансной области энергий зависят от температуры этих материалов (эффект Доплера). Следовательно, необходимо использовать реальные температурные и плотностные распределения при моделировании нейтронно-физических характеристик реактора (поля энерговыделения, коэффициентов и эффектов реактивности, коэффициентов неравномерности выгорания топлива, изотопного состава) [1].

В данной работе приведен анализ результатов сопряженного моделирования одного из типов каскадов, используемых в реакторе ИР-8. ИР-8 – исследовательский реактор бассейнового типа мощно-

стью до 8 МВт с легкой водой в качестве замедлителя, теплоносителя и верхней защиты. На данный момент расчетное сопровождение реактора производится с помощью программы ASTRA [2] и осуществляется только для одного сектора ТВС. Производимые вычисления не способны учесть все процессы, происходящие в активной зоне. Поэтому для проведения теплогидравлических расчетов использовался код улучшенной оценки ATHLET [3], который входит в программный комплекс AC², официально полученный Национальным Исследовательским Ядерным Университетом МИФИ на основе лицензионного соглашения с Gesellschaft für Anlagen-und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, Germany [4]. Код ATHLET аттестован в России для проведения стационарных и переходных режимов на реакторах с водным теплоносителем. Статья является продолжением работ по анализу гидравлических испытаний восьми- и шеститрубной ТВС ИРТ-3М [5], где с помощью программы ATHLET был выявлен характер изменения поля скоростей теплоносителя в поперечном сечении штатной шеститрубной ТВС [6]. Однако данные расчеты проводились только для гидравлических характеристик, без учета энерговыделения в твэлах.

Для проведения нейтронно-физических расчетов использовалась программа MCU-PTR, реализующая метод Монте-Карло. Начиная с 2009 г. с использованием программы MCU-PTR ведется расчетное сопровождение эксплуатации реактора ИР-8 и всех проводимых экспериментов. Программа MCU-PTR с базой данных MDBPT50 аттестована в Научно-техническом центре по ядерной и радиационной безопасности Федеральной службы РФ по экологическому, технологическому и атомному надзору для расчетов нейтронно-физических характеристик исследовательского реактора ИР-8 с учетом выгорания топлива, выгорания поглотителя в РО СУЗ и отравления бериллиевого отражателя [7].

Связный расчет с помощью программ ATHLET и MCU-PTR позволяет учесть взаимное влияние теплогидравлических (ТГ) и нейтронно-физических (НФ) параметров.

ОПИСАНИЕ МЕТОДИКИ РАСЧЕТА СВЯЗКИ КОДОВ ATHLET/MCU-PTR

При проведении связанных расчетов нейтронно-физические коды используются для вычисления распределения энерговыделения возникающего в топливе (Q), с помощью теплогидравлических кодов осуществляется моделирование теплопереноса и рассчитывается распределение температуры (T) и плотности (ρ). Основные механизмы обратной связи включают температурное изменение плотности теплоносителя и температурную зависимость эффективных микроскопических сечений. Корректность расчетов “НФ – ТГ” осно-

вывается на построении согласованной модели и обеспечении сходимости расчетов. На первом этапе применяется внешний алгоритм связывания, при котором не предполагается внесения изменений и модернизации расчетных кодов [8]. Обмен данными между кодами (рис. 1) осуществляется посредством вспомогательной программы, написанной на языке PYTHON.

За основу математической модели реактора ИР-8 в MCU-PTR была взята расчетная модель равновесной загрузки реактора ИР-8 [9], используемой для расчетного сопровождения. В настоящее время активная зона ИР-8 загружается 16 шеститрубными ТВС ИРТ-3М (рис. 2).

ТВС ИРТ-3М состоит из коаксиальных трубчатых твэлов квадратного сечения с закругленными углами, зафиксированных в верхней и нижней концевых деталях. Каждый твэл трехслойный, состоит из сердечника и оболочек. Длина сердечника 600 мм, твэла 630 мм. Толщина твэла 1.4 мм, зазора между твэлами – 2.05 мм. В качестве топлива используется диоксид урана с обогащением 90%, распределенный в алюминиевой матрице.

В каждой 6-ти трубной ТВС топливо в расчетных моделях разделено на 2160 зон (30 слоев по высоте, 12 секторов по азимуту в 6 твэлах) (рис. 3). Математическая модель ИР-8 содержит примерно 50 тысяч геометрических зон. Каждая из регистрационных зон топлива и теплоносителя характеризуется своим нуклидным составом и физическими параметрами (температуры и плотность), перерасчет которых происходит во время каждой итерации.

ОПИСАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ШЕСТИТРУБНОЙ ТВС ИРТ-3М В ПРОГРАММЕ ATHLET

Модель ТВС в программе ATHLET представляет собой семь гидравлических каналов (рис. 4) и два объекта типа “branch”, где шесть каналов – это межтвэльное пространство одной ТВС, один канал имитирует зазор между другими ТВС, а “branch” – головку и хвостовик ТВС (рис. 5). С помощью программы ATHLET была создана гидравлическая модель ТВС ИРТ-3М и проведена валидация программы на данных, полученных в ходе эксперимента на [5].

К гидравлической модели ТВС были добавлены тепловые структуры. Тепловая структура имитирует энерговыделение, полученное от каждой регистрационной зоны из НФ модели. Схема данной модели приведена на рис. 6. Однако для корректной настройки обратной связи ATHLET и MCU-PTR гидравлические структуры в каскаде в зазорах между твэлами следует разбить на сектора в соответствии с разбиением тепловых структур, используемым при анализе пространственного рас-



Рис. 1. Схема осуществления обратной связи между кодами описание математической модели шеститрубной ТВС ИРТ-3М в программе MCU-PTR.

пределения энерговыведений физическими программами на основе метода Монте-Карло. На рис. 7 представлена схема модели ТВС в программе ATHLET с азимутальным разбиением на сектора. Данная методика приведена в [10].

Рассчитанные скорости теплоносителя в зазорах ТВС ИРТ-3М с таким типом разбиения [6] приведены в табл. 1.

Полученные величины скоростей в плоских и угловых секторах позволяют получить более подробное распределение поле температур для оценки запаса до начала поверхностного кипения. Без нагрева жидкости, температура и плотность одинаковые на всех участках для каждого канала. Значимость модернизации становится явной только при учете энерговыведений (при совместном решении ATHLET-MCU).

РЕЗУЛЬТАТЫ СОПРЯЖЕННОГО РАСЧЁТА

Как было сказано ранее, итерации проводились в автоматическом режиме с помощью вспомогательной программы для связки кодов. Для стационарного режима перепад температур в активной зоне не существен, поэтому сходимость теплофизических параметров была достигнута на второй итерации.

В результате расчетов с помощью программы MCU-PTR было получено пространственное распределение энерговыведений по топливу в относительных единицах. Была определена максимально-напряженная ячейка (4–2). С учетом того, что средняя мощность “свежей” ТВС равна 600 кВт, рассчитаны величины абсолютных значений энерговыведений. На рис. 8 представлено распределение энерговыведений по высоте топлива для максимально-напряженного сектора (№ 9) твэла № 1 шеститрубной ТВС ИРТ-3М. Из рисунка

Таблица 1. Скорости воды в зазорах шеститрубной ТВС ИРТ-3М

Номер зазора	Без разбиения на сектора	С разбиением на сектора	
		плоский	угловой
1	2.58	2.57	2.56
2	2.84	2.84	2.83
3	2.82	2.82	2.81
4	2.80	2.80	2.80
5	2.80	2.80	2.79
6	2.78	2.78	

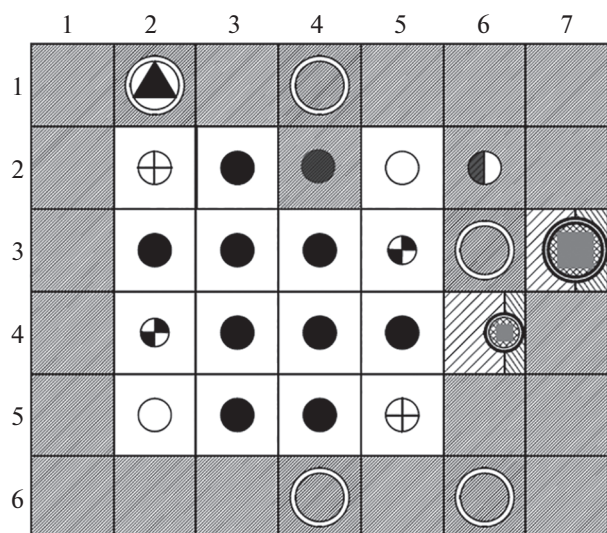


Рис. 2. Поперечное сечение активной зоны реактора ИР-8 для равновесной загрузки. Условные обозначения:

, , , , , — шеститрубная ТВС с вытеснителем, экспериментальным каналом, регулирующим стержнем со стержнем аварийной защиты и с максимальным энерговыделением, соответственно; , , , , — блок бериллиевый сплошной, с пробкой, экспериментальным каналом и со стержнем автоматического регулятора соответственно; , , — защитный блок-экран с ампульным устройством РИМ-1 и РИМ-2 соответственно.

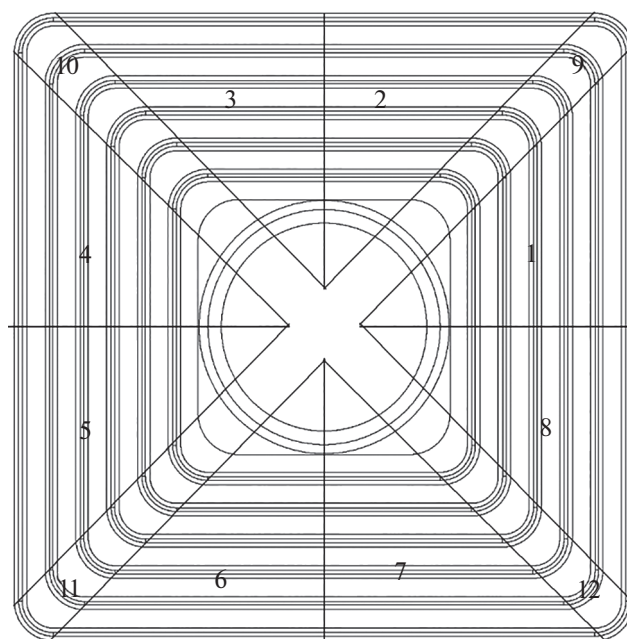


Рис. 3. Поперечное сечение шеститрубной ТВС ИРТ-3М с азимутальным разбиением.

следует, что максимальное энерговыделение ТВС находится на высоте 39 см от входа в активную зону.

На рис. 9 представлено распределение относительного энерговыделения по сечению шеститрубной ТВС ИРТ-3М на расстоянии 39 см движению потока.

Для полученных значений энерговыделений в программе ATHLET были получены температуры топлива, оболочки и теплоносителя (табл. 2). Наи-

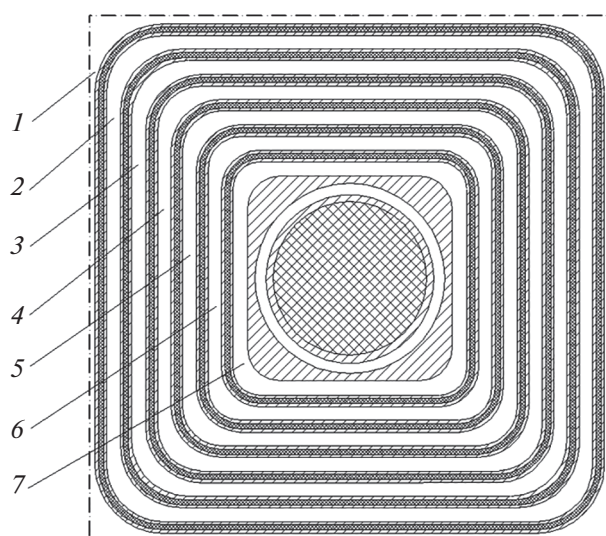


Рис. 4. Поперечное сечение математической модели шеститрубной ТВС ИРТ-3М в программе MCU-PTR.

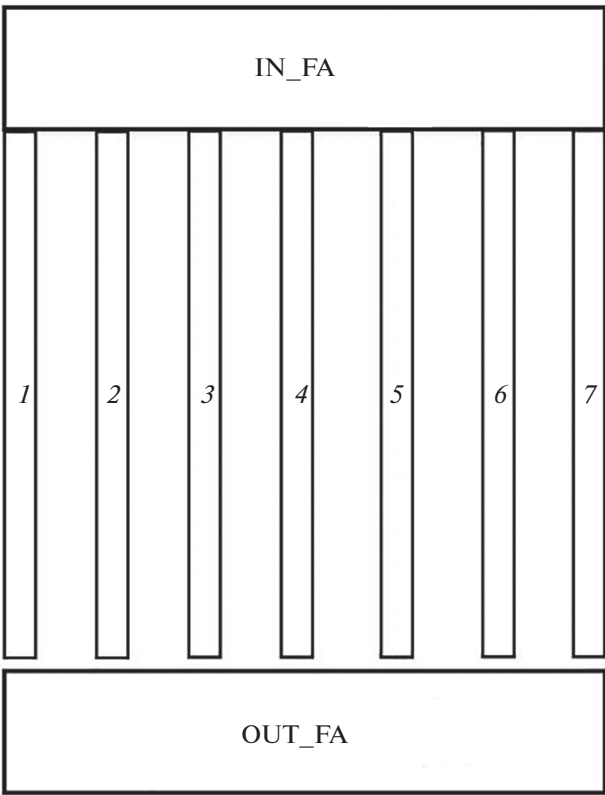


Рис. 5. Модель шеститрубной ТВС в коде ATHLET; IN_FA, OUT_FA — головка и хвостовик ТВС; 1–7 — номера гидравлических зазоров.

большие температуры имеют 9 сектор (угловой) и 2 сектор (плоский). На рис. 10 представлено поле температур для сектора № 2.

Используя подход совместного моделирования ТГ и НФ впервые были рассчитаны распределения температур во всей шеститрубной ТВС ИРТ-3М, что может быть полезным в случае использования центрального канала ТВС для установки экспериментальных облучательных устройств и выбора температурного режима облучения, поскольку температурная нагрузка твэлов влияет на теплоотдачу

от облучательного устройства к бассейну реактора. Указанные распределения температур могут служить граничными условиями для расчетных моделей облучательных устройств, используемых в 3-х мерных CFD кодах.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках данной работы была отлажена работа связки кодов для нейтронно-физического и теплогидравлического расчетов активных зон исследова-

Таблица 2. Значения расчетных параметров теплогидравлического режима работы ТВС

Параметр	Участок	
	плоский	угловой
Мощность ТВС, кВт	600	
Температура воды на входе в активную зону, °С	47.5	
Температура воды на выходе из активной зоны, °С	79	69
Максимальная температура поверхности твэла, °С	108	105
Максимальная температура топлива твэла, °С	112	109
Коэффициент запаса до поверхностного кипения по температуре	1.25	1.31

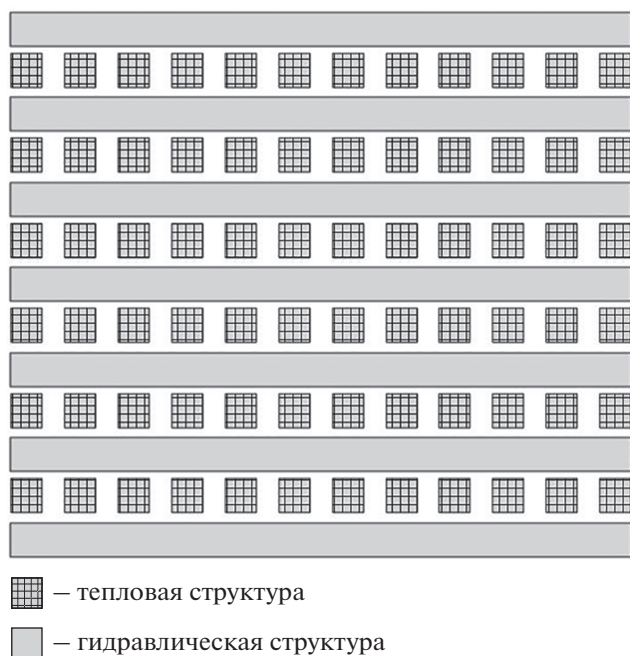


Рис. 6. Модель ТВС без азимутального разбиения гидравлических структур.

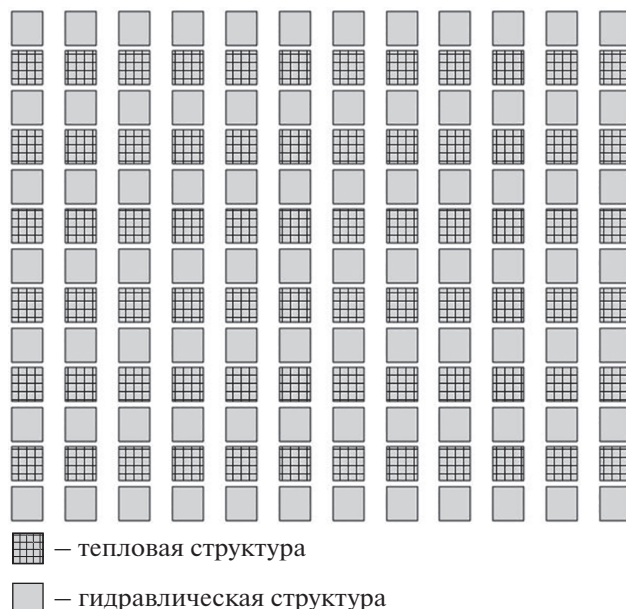


Рис. 7. Модель ТВС с азимутальным разбиением гидравлических структур.

тельных реакторов. Были определены наиболее значимые теплофизические параметры теплоносителя и твэлов. Впервые были рассчитаны распределения температур во всей шеститрубной ТВС ИРТ-3М, с учетом неравномерностей энерговыделения в твэлах по высоте и радиусу ТВС, что может быть полезным в случае использования центрального канала ТВС для установки экспериментальных облучательных устройств и выбора

температурного режима облучения, поскольку температурная нагрузка твэлов влияет на теплоотдачу от облучательного устройства к бассейну реактора. Указанные распределения температур могут служить граничными условиями для расчетных моделей облучательных устройств, используемых в 3-х мерных CFD кодах.

Результаты этой работы могут использоваться в НИЦ КИ при определении допустимой мощности реактора ИР-8. Указанные распределения тем-

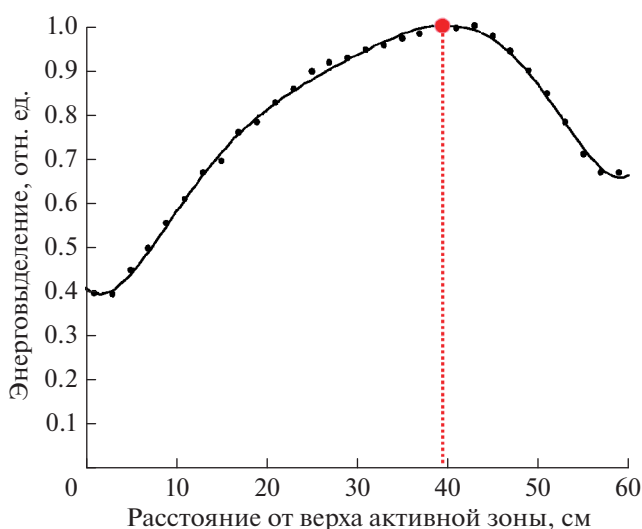


Рис. 8. Распределение энерговыделения по высоте топлива в секторе № 9 твэла № 1 шеститрубной ТВС ИРТ-3М ($K_z = 1.27$).

0.99		0.96				0.93				1					
0.8	0.88	0.84				0.82				0.87	0.81				
	0.74	0.78	0.76			0.74			0.77	0.75					
		0.7	0.73	0.72		0.72		0.72	0.7						
			0.69	0.73	0.73		0.71					0.71	0.68		
				0.70	0.7	0.71	0.71	0.7				0.69			
					0.7			0.69							
0.75	0.71	0.68	0.68	0.69	0.69			0.69	0.68	0.72	0.77				
				0.69	0.69			0.68							
						0.69	0.68								
						0.68	0.68						0.68		0.67
			0.68	0.66			0.65						0.67		
		0.69	0.66			0.65			0.69						
	0.73	0.67			0.67			0.74							
0.77	0.69				0.69				0.8						

Рис. 9. Распределение энерговыделения по сечению шеститрубной ТВС ИРТ-3М на расстоянии 39 см по движению потока.

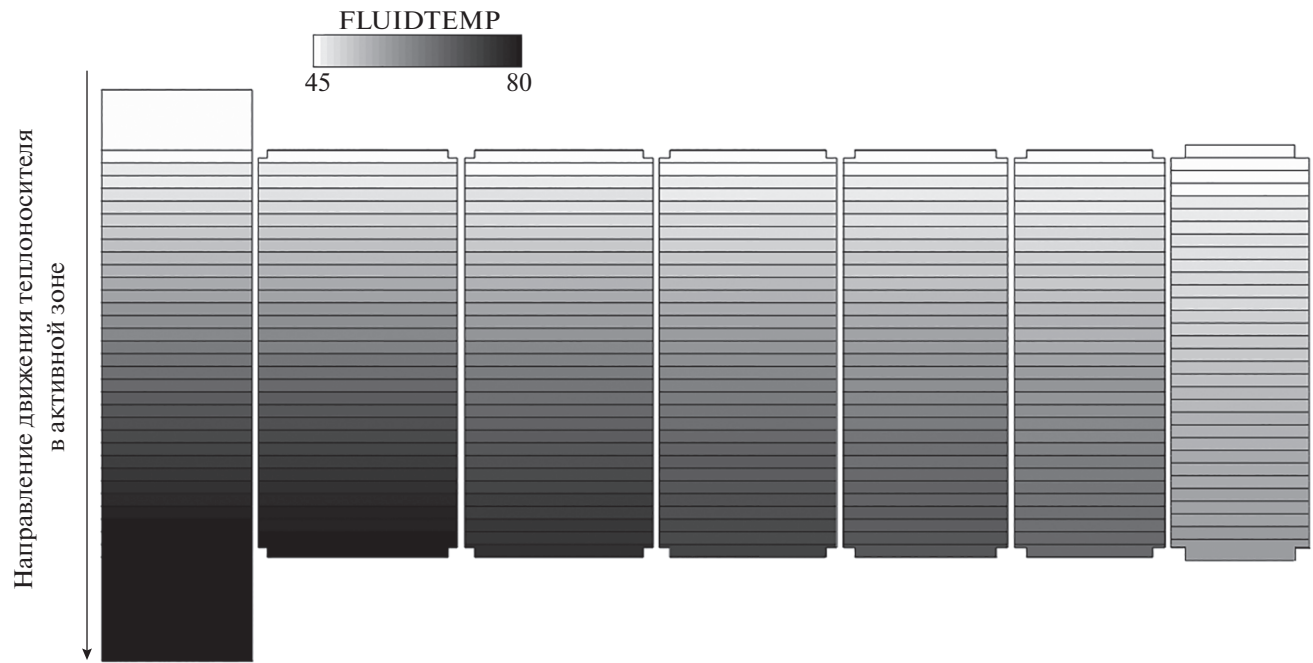


Рис. 10. Поле температур для максимально напряженного плоского участка.

ператур могут служить граничными условиями для расчетных моделей облучательных устройств, используемых в 3-х мерных CFD кодах. Результаты работы могут быть использованы для исследовательских реакторов ИРТ-Т (г. Томск) и WWR-SM (г. Ташкент).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ/REFERENCES

1. Generation IV International Forum Annual Report. OECD Nuclear Energy Agency. 2015. P. 141.
2. Taliev A.V. // The Modernized ASTRA Program for Calculating the Thermal Regimes of Fuel Assemblies in Research Reactors with Tubular Coaxial Fuel Rods. Preprint: IAE-6405/5. 2006.
3. Austregesilo H., Deitenbeck H., Langenfeld A., Scheuer J., Schöffel P. // ATHLET 3.1A Programmer's Manual. 2017.
4. Computer Code AC². Code Certificate No. 17-01. Software Licence Agreement No. L/M-03. 2017.
5. Glyva K.I., Nikonov S.P., Nasonov V.A., Pesnya Y.E. // J. Phys.: Conf. Ser. 2018. V. 1133. P. 012030.
6. Glyva K.I., Nikonov S.P. // J. Phys.: Conf. Ser. 2020. V. 1689. P. 012045.
7. Alexeyev N.I., Gomin E.A., Marin S.V., Nasonov V.A., Shkarovsky D.A., Yudkevich M.S. // Atom. Energiya. 2010. V. 109. No. 3. P. 123–129 (in Russian).
8. Koltashev D.A., Mitenkova E.F. // Izv. Ros. Akad. Nauk. Energetika. 2017. No. 1. P. 149–163 (in Russian).
9. Nasonov V.A., Pesnya Y.E., Kruglikov A.E., Glyva K.I., Trofimchuk V.V. // At. Energy. 2019. V. 126. No. 1. P. 7–11.
10. Chudinova V.A., Nikonov S.P. // J. Phys.: Conf. Ser. 2018. V. 1133. P. 012013.

Coupled Thermal-Hydraulic and Neutron-Physical Calculation of IR-8 Reactor's Fuel Assembly Using MCU-PTR/ATHLET Codes

K. I. Glyva^{1, 2, *}, S. P. Nikonov¹, Y. E. Pesnya², and V. V. Trofimchuk²

¹National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Kashirskoe sh. 31, Moscow, 115409 Russia

²National Research Center "Kurchatov Institute", pl. Akademika Kurchatova 1, Moscow, 123182 Russia

*e-mail: glyva_kostya@mail.ru

Received March 4, 2021; revised May 11, 2021; accepted May 12, 2021

The paper analyzes the results of modeling one of the types of fuel assemblies used in the IR-8 research reactor. The article is a continuation of the work in which the analysis of hydraulic tests of the eight- and six-tube fuel assemblies IRT-3M was carried out and the nature of the change in the velocity field of the coolant in the cross-section of a standard six-tube fuel assembly, without taking into account the energy release in the fuel elements, was revealed. The calculation was carried out using the program for thermohydraulic calculation ATHLET. This paper presents the results of a connected thermohydraulic and neutron-physical calculation of IRT-3M fuel assemblies. For neutron-physical calculations, the MCU-PTR program was used. The multiphysics approach makes it possible to take into account the effect on the calculation results of changes in the physical properties of the core materials. The paper presents the results of mathematical modeling of stationary operation of a standard IRT-3M fuel assembly with power rate of 600 kW. The coupled work of the neutron-physical and thermal-hydraulic calculation codes has been debugged. The main thermophysical parameters of fuel assemblies are obtained: temperatures of the coolant, cladding, and fuel, and the margin to surface boiling are determined. Using a multiphysics approach, these thermohydraulic parameters were refined. The data obtained can be useful for further calculations of such fuel assemblies using the central channel of the fuel assembly for installing experimental irradiation devices. In addition, the indicated temperature distributions can serve as boundary conditions for design models of irradiation devices used in 3-D CFD codes. The results of this work can be used to determine the permissible power of research reactors of the IRT type: IR-8 at NRC KI (Moscow), IRT-MEPhI at NRNU MEPhI (Moscow), IRT-T at TPU (Tomsk) and WWR-SM at INP (Tashkent).

Keywords: multiphysics approach, neutron-physical calculation, thermohydraulic calculation, research reactor, IR-8, IRT-3M fuel assemblies, ATHLET, MCU-PTR