

Гидродинамика теплоносителя в активной зоне реактора PWR с ТВС-Квадрат разных конструкций

Докт. техн. наук, проф. С. М. Дмитриев¹, инж. А. Л. Буров², асп. Т. Д. Демкина¹,
инж. А. А. Добров¹, канд. техн. наук Д. В. Доронков¹, асп. Д. С. Доронкова¹,
магистр Д. Д. Курицин¹, инж. А. Н. Пронин¹, асп. А. В. Рязанов¹,
канд. техн. наук Д. Н. Солнцев¹

¹Нижегородский государственный технический университет имени Р. Е. Алексеева
(г. Нижний Новгород, Российская Федерация),

¹Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2023
Belarusian National Technical University, 2023

Реферат. В статье приведены результаты экспериментальных исследований гидродинамики теплоносителя в активной зоне реактора PWR с ТВС-Квадрат разных конструкций. Экспериментальные исследования гидродинамики заключались в изучении полей скоростей и процесса поперечного перетекания теплоносителя между соседними ТВС-Квадрат разных конструкций в однородной и смешанной активных зонах на масштабных экспериментальных моделях, включающих в себя фрагменты двух соседних ТВС-Квадрат и зазор между ними. Экспериментальные модели отличаются количеством установленных решеток. Это обусловлено тем, что в однородной активной зоне гидравлическая нагрузка по высоте ТВС идентична, а в смешанной – неравномерна из-за разного количества установленных решеток. Гидродинамика теплоносителя изучалась на аэродинамическом исследовательском стенде с учетом теории гидродинамического подобия с использованием пневмометрических датчиков с индивидуальной тарировкой. На основании полученных данных построены поля локальных осевых и поперечных скоростей в различных сечениях по длине исследуемого участка экспериментальных моделей. Изучены поля локальных безразмерных поперечных и аксиальных скоростей потока в твэльных пучках и зазоре между ТВС-Квадрат активной зоны реактора PWR. Выявлены особенности процесса поперечного перетекания потока между соседними ТВС-Квадрат однородной и смешанной активной зон реактора PWR. Результаты экспериментальных исследований переданы разработчику ТВС-Квадрат АО «ОКБМ Африкантов» для дальнейшего использования при обосновании конструкции и режимов работы ядерной энергетической установки.

Ключевые слова: ядерный реактор, активная зона, ТВС-Квадрат, перемешивающая и дистанционирующая решетка, стабилизирующая решетка, гидродинамика теплоносителя, поперечное перетекание потока

Для цитирования: Гидродинамика теплоносителя в активной зоне реактора PWR с ТВС-Квадрат разных конструкций / С. М. Дмитриев [и др.] // *Наука и техника*. 2023. Т. 22, № 4. С. 326–332. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-22-4-326-332>

Coolant Hydrodynamics in the PWR Reactor Core with TVS-Kvadrat of Various Designs

S. M. Dmitriev¹, A. L. Burov², T. D. Demkina¹, A. A. Dobrov¹, D. V. Doronkov¹, D. S. Doronkova¹,
D. D. Kuritsin¹, A. N. Pronin¹, A. V. Ryazanov¹, D. N. Solntsev¹

¹Nizhniy Novgorod State Technical University named after R. E. Alekseev (Nizhniy Novgorod, Russian Federation),

²Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. The paper presents the results of experimental studies of the hydrodynamics of the coolant in the core of the PWR reactor with fuel assemblies “TVS-Kvadrat” of various designs. Experimental studies of hydrodynamics consisted in studying

Адрес для переписки

Дмитриев Сергей Михайлович
Нижегородский государственный технический университет
имени Р. Е. Алексеева
ул. Минина, 24,
603950, г. Нижний Новгород,
Российская Федерация
Тел.: +7 831 436-23-25
dmitriev@nntu.ru

Address for correspondence

Dmitriev Sergei M.
Nizhny Novgorod State Technical University
named after R. E. Alekseev
24, Minina str.,
603950, Nizhny Novgorod,
Russian Federation
Tel.: +7 831 436-23-25
dmitriev@nntu.ru

the velocity fields and the process of cross-flow of coolant between adjacent fuel assemblies “TVS-Kvadrat” of various designs in homogeneous and mixed cores on large-scale experimental models, including fragments of two adjacent fuel assemblies “TVS-Kvadrat” and a gap between them. The test models differ in the number of installed grids, this is due to the fact that in a homogeneous core the hydraulic load along the height of the fuel assemblies is identical, and in a mixed core the hydraulic load is uneven due to the different number of installed grids. The hydrodynamics of the coolant has been studied on an aerodynamic open-loop based on the theory of hydrodynamic similarity, using individually calibrated pneumometric sensors. Based on the data obtained, the fields of local axial and transverse velocities in various sections along the length of the studied section of the test models have been constructed. The fields of local dimensionless transverse and axial flow velocities in the fuel bundles and the gap between the fuel assemblies “TVS-Kvadrat” of the PWR reactor core have been studied. Peculiarities of the process of transverse flow between adjacent “TVS-Kvadrat” of a homogeneous and the mixed core of the PWR reactor have been revealed. The results of experimental studies have been transferred to the developer of “TVS-Kvadrat”, that is JSC “Experimental Design Bureau of Mechanical Engineering named after I. I. Afrikantov”, for further use in justifying the design and operating modes of a nuclear power plant.

Keywords: nuclear reactor, core, TVS-Kvadrat, mixing and spacer grid, stabilizing spacer grid, coolant hydrodynamics, coolant cross flow

For citation: Dmitriev S. M., Burov A. L., Demkina T. D., Dobrov A. A., Doronkov D. V., Doronkova D. S., Kuritsin D. D., Pronin A. N., Ryazanov A. V., Solntsev D. N. (2023) Coolant Hydrodynamics in the PWR Reactor Core with TVS-Kvadrat of Various Designs. *Science and Technique*. 22 (4), 326–332. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-22-4-326-332> (in Russian)

Введение

Для реакторов PWR в АО «ОКБМ Африкантов» разработана бесчехловая ТВС-Квадрат [1, 2], в конструкцию которой помимо дистанционирующих решеток (ДР) включены перемешивающие дистанционирующие решетки (ПДР) и стабилизирующие решетки (СР). Применение данных решеток позволяет интенсифицировать процессы перемешивания теплоносителя в активной зоне и обеспечить необходимую жесткость конструкции. На ПДР установлены турбулизирующие лопатки в регулярных ячейках и в области направляющего канала (НК). В области направляющего канала из-за меньшего проходного сечения площадь лопаток на 14,6 % меньше площади лопаток в регулярных ячейках. Угол наклона всех лопаток на ПДР постоянный. Стабилизирующая решетка состоит из взаимно перпендикулярных пластин, расстояние между которыми соответствует шагу между твэлами.

При эксплуатации реакторов PWR возможны ситуации, когда в активной зоне реактора одновременно будут установлены ТВС-Квадрат без стабилизирующих решеток и со стабилизирующими решетками. В данном случае по высоте активной зоны будет неравномерная гидравлическая нагрузка, что в условиях применения бесчехловых ТВС-Квадрат приведет к перераспределению расходов между соседними ТВС и возникновению поперечных течений

теплоносителя в периферийных рядах твэлов и зазоре между сборками. Таким образом, в смешанной активной зоне формирование полей поперечных скоростей будет происходить под влиянием двух факторов – турбулизирующих лопаток ПДР и неравномерной гидравлической нагрузки по высоте смешанной активной зоны. Особенности течения теплоносителя в смешанной активной зоне необходимо учитывать при обосновании различных режимов эксплуатации и оценки запасов до кризиса теплоотдачи [3–7].

Описание экспериментальной модели и методики исследований

Исследование процесса поперечного перетекания теплоносителя в активной зоне реактора PWR заключалось в изучении распределения безразмерных локальных поперечных $W_{XY}/W_{СР.Р}$ и аксиальных $W_Z/W_{СР.Р}$ скоростей (W_{XY} и W_Z – значения поперечных и аксиальных скоростей в точке измерения соответственно; $W_{СР.Р}$ – среднерасходная скорость рабочей среды через ЭМ) в области зазора и периферийных рядах твэлов ТВС-Квадрат. Безразмерная скорость определялась отношением скорости рабочей среды в точке измерения к среднерасходной скорости в модели. Экспериментальные исследования проводились на аэродинамическом стенде на основе теории гидродинамического подобия, согласно которой профиль безразмерной ско-

рости в области автомодельного течения остается постоянным [8]. Оборудование стенда позволяет проводить исследования при числах Рейнольдса $Re \sim 100000$ в области автомодельного течения. В работах [9–11] ранее было показано, что на моделях фрагментов ТВС-Квадрат область автомодельного течения начинается при числах Рейнольдса 55000–70000.

Для исследования распределения поперечных и аксиальных скоростей были созданы масштабные экспериментальные модели области активной зоны реактора PWR, включающей в себя фрагменты двух соседних ТВС-Квадрат и зазор между ними. Твэльный пучок каждой ТВС состоит из 35 имитаторов твэлов и одного имитатора направляющего канала. Первая экспериментальная модель представляет собой гладкий твэльный пучок, расположенный между ДР (рис. 1а), вторая – фрагмент однородной активной зоны с симметрично расположенными ПДР и СР (рис. 1б), третья – фрагмент смешанной активной зоны с несимметрично расположенными решетками, а именно, в одной из ТВС отсутствует СР (рис. 1с).

Область измерения включает регулярные, периферийные ячейки и ячейки области направляющего канала. Поперечное сечение экспериментальных моделей и область исследований показаны на рис. 2. В пределах каждой ячейки аксиальная и поперечная скорости из-

мерялись в 80–100 точках, что позволило построить подробную картину течения.

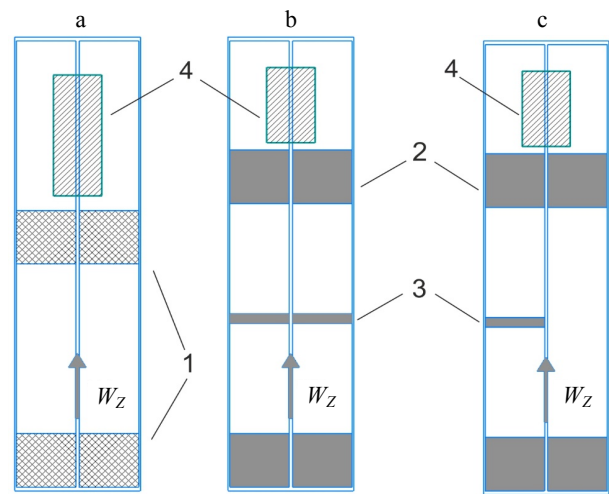


Рис. 1. Экспериментальные модели:
1 – дистанционирующие решетки, 2 – перемешивающие дистанционирующие решетки, 3 – стабилизирующие решетки, 4 – область исследований

Fig. 1. Test models:
1 – spacer grids, 2 – mixing spacer grids, 3 – stabilizing grids, 4 – research area

Для измерения скорости потока использовался пятиканальный пневмометрический зонд с индивидуальной тарировочной характеристикой [12]. Измерительный зонд устанавливался в автоматизированное координатное устройство, позволяющее позиционировать средство измерения с точностью 0,05 мм.

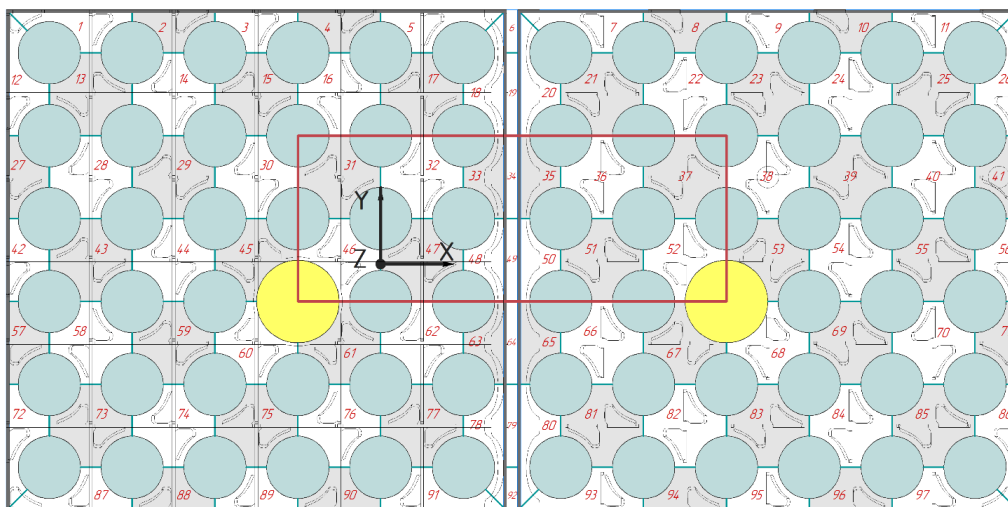


Рис. 2. Поперечное сечение экспериментальных моделей и область исследований

Fig. 2. Cross section of test models and research area

Результаты исследований

На первом этапе исследований была изучена картина течения в гладком твэльном пучке ТВС-Квадрат, расположенном между двумя соседними ДР (рис. 1а). Наиболее интенсивные поперечные течения возникают в межтвэльных зазорах, величина безразмерной поперечной скорости в них лежит в диапазоне 0,05–0,08. Поперечные течения через выделенные зазоры преимущественно обусловлены перераспределением аксиального потока из зазора между ТВС в твэльный пучок. В регулярных ячейках и ячейках области НК величина поперечной скорости потока мала и составляет 0,01–0,03 (рис. 3). В периферийных ячейках и зазоре между ТВС величина поперечной скорости потока составила 0,04–0,05.

Максимумы безразмерной аксиальной скорости наблюдаются в центрах регулярных ячеек и составляют 1,2. Наименьшие значения безразмерной аксиальной скорости по длине экспериментального участка наблюдались в межтвэльных зазорах и составляют 0,80–0,85. При удалении от ДР происходит выравнивание аксиальных скоростей по сечению твэльного пучка, которое обусловлено поперечным перетеканием теплоносителя между ячейками, отличающимися площадью проходного сечения. При изменении относительной координаты L/d_r (L – расстояние от решетки до сечения

измерения; d_r – гидравлический диаметр) от 3,1 до 12,5 в регулярных ячейках происходит снижение аксиальной скорости в центре на 10–15 % (рис. 4).

Таким образом, гидродинамическая картина движения потока в гладком пучке твэлов преимущественно обусловлена процессом перераспределения части потока из зазора между ТВС-Квадрат в сами сборки, а также геометрическими особенностями твэльного пучка.

На следующем этапе исследований изучалась гидродинамика в однородной активной зоне с симметрично расположенными ПДР и СР (рис. 1б).

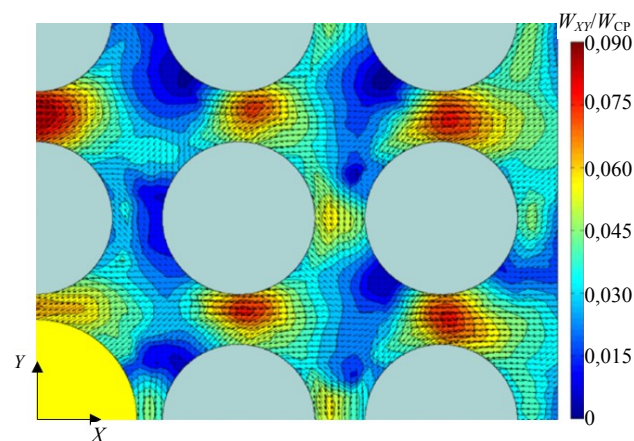


Рис. 3. Поперечная скорость потока в гладком твэльном пучке

Fig. 3. Transverse flow velocity in a fuel bundle

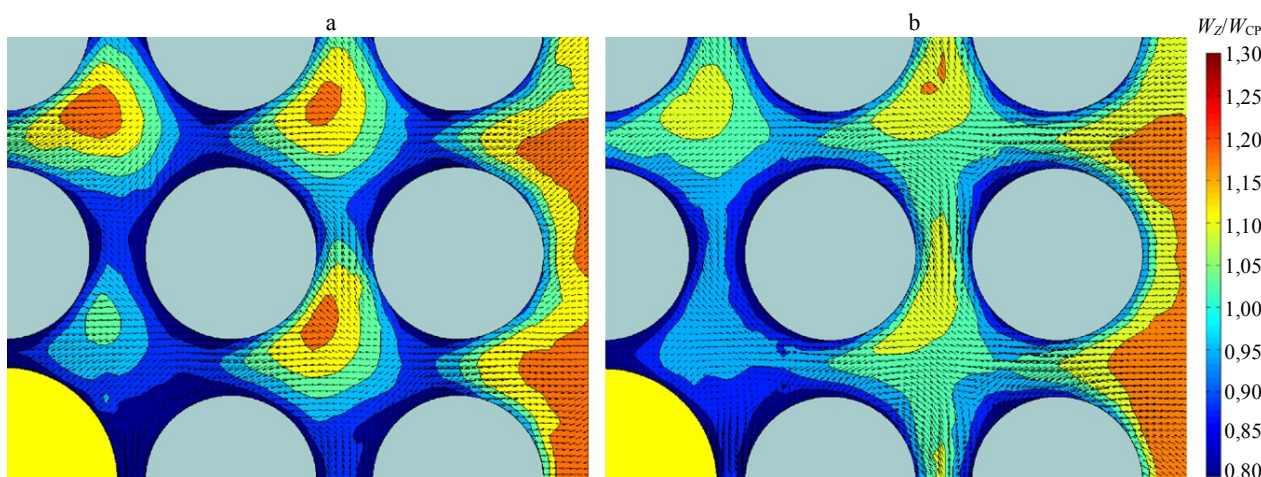


Рис. 4. Аксиальная скорость потока в активной зоне с ТВС-Квадрат: а – при относительной координате $L/d_r = 3,5$; б – 12,5

Fig. 4. Axial flow velocity in the core with fuel assembly “TVS-Kvadrat”: а – at relative coordinate $L/d_r = 3,5$; б – 12,5

Формирование поперечных течений происходит под действием смесительных лопаток ПДР. В твэльном пучке величина безразмерной поперечной скорости изменяется от 0,25 до 0,60, а в области зазора лежит в диапазоне 0,1–0,3 (рис. 5). Максимумы поперечной скорости в твэльном пучке локализованы непосредственно за ПДР в областях регулярных ячеек, занятых дефлекторами. По мере удаления от ПДР поперечные скорости убывают. При изменении относительной координаты L/d_r от 1,8 до 3,3 безразмерная поперечная скорость снижается с 0,6 до 0,45. При удалении от ПДР происходит смещение максимумов безразмерной поперечной скорости из центров ячеек в направлении зазоров между твэлами. На расстоянии $L/d_r \sim 5,1$ в твэльном пучке и зазоре между ТВС-Квадрат по направлению ориентации лопаток формируются устойчивые макротечения, которые интенсифицируют процесс перемешивания потока между соседними ТВС. Величина относительных поперечных скоростей в макротечениях на участке L/d_r от 5,1 до 12,7 снижается с 0,3–0,5 до 0,15–0,35.

Поперечные потоки между соседними ТВС формируются согласно схеме расположения лопаток. Поперечное перетекание потока происходит не фронтально через соседние зазоры между твэлами, а в шахматном порядке, последовательно через один зазор (рис. 5). Величина безразмерной поперечной скорости потока в макротечениях между соседними ТВС-Квадрат лежит в диапазоне 0,15–0,30.

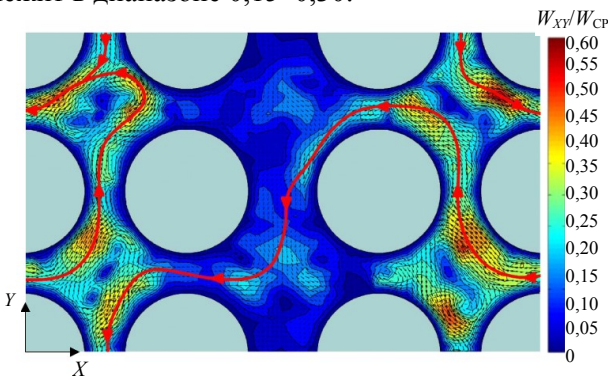


Рис. 5. Поперечные потоки и вихревые структуры в однородной активной зоне на расстоянии $L/d_r = 1,8$ от ПДР

Fig. 5. Cross flows and vortex structures in a homogeneous core at a distance $L/d_r = 1.8$ from the mixing and spacer grid

В регулярных ячейках за лопатками образуется пара диагонально расположенных вихрей. На расстоянии $L/d_r = 3,3$ от ПДР происходит слияние двух малых вихрей в один большой, расположенный в центре. Образовавшийся вихрь взаимодействует с поперечными макротечениями, изменяя их структуру, и постепенно рассеивается, при этом перемещаясь в поперечном сечении ячеек. Рассеяние вихрей наблюдается на расстоянии $L/d_r = 7,6$ от ПДР.

В смешанной активной зоне (рис. 1с) из-за различного количества решеток в соседних ТВС-Квадрат возникает неравномерное поле аксиальной скорости потока. Локальные максимумы лежат в областях поперечного сечения ячеек, занятых дефлекторами.

По мере удаления от ПДР наблюдается смещение локальных пиков в направлении зазоров между твэлами и постепенное выравнивание поля аксиальной скорости по сечению ячеек. Локальные минимумы аксиальной скорости расположены в области зазора между ТВС и у поверхности твэлов. Величина безразмерной аксиальной скорости в локальных минимумах лежит в диапазоне 0,55–0,75. В твэльном пучке с СР безразмерные аксиальные скорости на расстоянии $L/d_r \sim 1,86$ от решетки лежат в диапазоне 0,8–1,1, а в ТВС без СР в диапазоне 0,90–1,25 (рис. 6). На расстоянии $L/d_r \sim 10,2$ профиль безразмерной аксиальной скорости выравнивается. Наиболее интенсивно процесс выравнивания аксиальной скорости по сечению твэльного пучка протекает в областях, соответствующих траекториям образовавшихся поперечных макротечений.

За пластинами СР образуются ярко выраженные локальные минимумы аксиальной скорости потока, которая принимает значения 0,5–0,8 (рис. 7). В областях ячеек, не занятых пластинами СР, величина безразмерной аксиальной скорости составляет 0,7–1,0. В соседней ТВС без СР аксиальная скорость во всем поперечном сечении исследуемой области составляет 1,0–1,2. На расстоянии $L/d_e = 2,5$ от СР наблюдается начало процесса выравнивания поля аксиальной скорости, а ее величина лежит в диапазоне 0,90–1,05.

Исследования гидродинамики в однородной и смешанной активных зонах показали, что СР не оказывают существенного влияния на формирование поперечных течений и вихревых структур за смесительными лопатками ПДР.

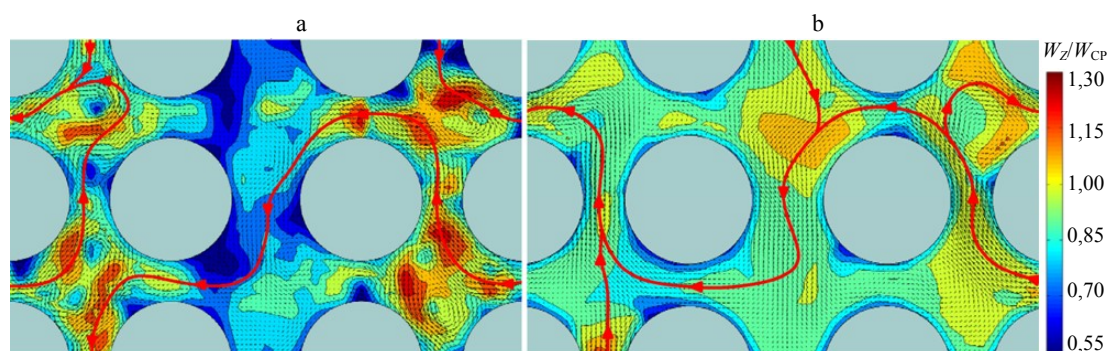


Рис. 6. Распределение аксиальной скорости потока в смешанной активной зоне:
а – при относительной координате $L/d_r = 1,8$; б – $10,2$

Fig. 6. Distribution of axial flow velocity in the mixed core:
а – at relative coordinate $L/d_r = 1.8$; б – 10.2

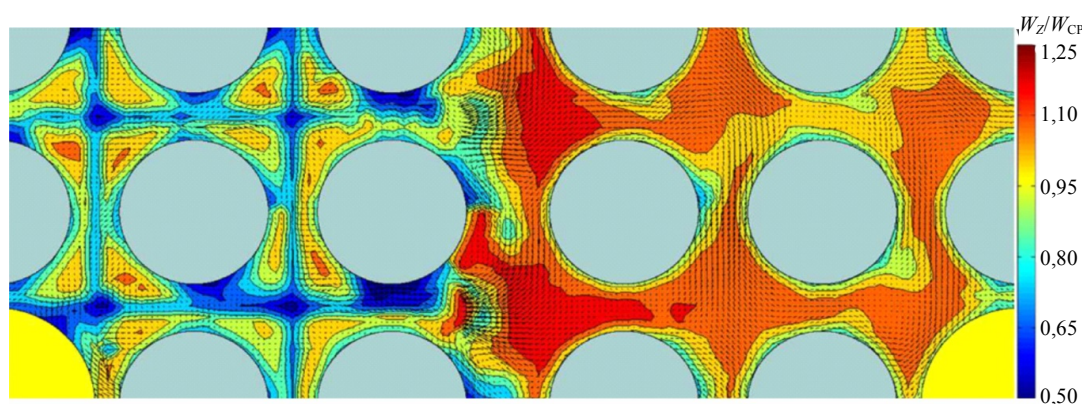


Рис. 7. Поле аксиальной скорости в смешанной активной зоне

Fig. 7. Axial velocity field in a mixed core

Поперечные потоки и вихревые структуры, а также длины их затухания и рассеяния за лопатками ПДР одинаковы для смешанной и однородной активных зон.

ВЫВОДЫ

Исследования гидродинамики теплоносителя в однородной и смешанной активных зонах реакторов PWR с ТВС-Квадрат позволили заключить следующее:

1. В гладком пучке твэлов формирование поперечных течений обусловлено процессом перераспределения части потока из зазора между ТВС-Квадрат в сами сборки, а также геометрическими особенностями твэльного пучка. В периферийных ячейках и зазорах между ТВС величина относительной поперечной скорости составляет $0,04-0,05$, а максимальная поперечная скорость возникает в межтвэльных зазорах и составляет $0,05-0,08$.

2. В однородной активной зоне стабилизирующие решетки не оказывают влияния на формирование поперечных потоков за перемешивающими дистанционирующими решетками.

Поперечные течения, возникающие при обтекании стабилизирующих решеток, нивелируются воздействием лопаток ПДР на поток теплоносителя.

3. Процесс образования поперечных потоков между соседними ТВС-Квадрат протекает за счет макротечений, возникающих за перемешивающими дистанционирующими решетками и ориентированных согласно расположению смесительных лопаток. Величина относительной поперечной скорости в макротечениях составляет $0,15-0,30$.

4. В смешанной активной зоне стабилизирующие решетки влияют на формирование поля аксиальных скоростей. Обтекание потоком стабилизирующих решеток характеризуется неоднородностью аксиальной скорости, которая выражается в появлении зон с более низкой аксиальной скоростью за пластинами решетки. Относительная аксиальная скорость в данных областях лежит в диапазоне $0,5-0,8$. При удалении от стабилизирующих решеток наблюдается интенсивный процесс выравнивания аксиальных скоростей между всеми типами ячеек

и на расстоянии $L/d_f = 2,5$ от СР ее значения составляют 0,90–1,05.

Полученные результаты могут быть использованы для обоснования конструкции и режимов работы активной зоны реактора PWR с ТВС-Квадрат, а также верификации CFD-кодов и программ детального поячеечного расчета активных зон ядерных реакторов.

Работа выполнена в рамках государственного задания в сфере научной деятельности (тема № FSWE–2021–0008).

ЛИТЕРАТУРА

1. Топливо для ВВЭР и PWR. Современное состояние и перспективы / Д. Л. Зверев [и др.] // Атомная энергия. 2020. Т. 129, № 2. С. 63–64.
2. Основное оборудование АЭС с корпусными реакторами на тепловых нейтронах / С. М. Дмитриев [и др.]. М.: Машиностроение. 2013. 413 с.
3. Hydrodynamic Analysis of a Flow in a Mixed Core / A. S. Noskov [et al.] // Journal of Physics: Conference Series. 2019. Vol. 1359, Is. 1. P. 012084. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1359/1/012084>.
4. Bieder, U. CFD analysis of Intra and Inter Fuel Assembly Mixing / U. Bieder, C. Genrault // Annals of Nuclear Energy. 2020. Vol. 135. P. 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2019.106977>.
5. Bieder, U. Hydraulic Forces Acting on Full Cross Section Fuel Assemblies with 17×17 Fuel Rods / U. Bieder, C. Genrault, P. Ledac // Progress in Nuclear Energy. 2020. Vol. 130. P. 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2020.103515>.
6. Influence of Spacer Grid Outer Strap on Fuel Assembly Thermal Hydraulic Performance / W. Li [et al.] // Science and Technology of Nuclear Installations. 2014. Vol. 2014. P. 1–10. <https://doi.org/10.1155/2014/602062>.
7. Semi-Analytical Modeling of the Flow Redistribution Upstream From the Mixing Grids in a Context of Nuclear Fuel Assembly Bow / G. Campioni [et al.] // Nuclear Engineering and Design. 2021. Vol. 371. P. 1–16. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2020.110940>.
8. Гухман, А. А. Введение в теорию подобия / А. А. Гухман. Изд. 2-е доп. и перераб. М.: Высшая школа, 1973. 296 с.
9. Гидродинамические особенности течения теплоносителя за перемешивающей дистанционирующей решеткой ТВС-Квадрат реактора PWR / О. Б. Самойлов [и др.] // Теплоэнергетика. 2019. № 4. С. 32–38. <https://doi.org/10.1134/S0040363619040076>.
10. Изучение гидродинамических процессов течения теплоносителя в ТВС-Квадрат реактора PWR с различными перемешивающими дистанционирующими решетками / С. М. Дмитриев [и др.] // Теплофизика и аэромеханика. 2018. Т. 25, № 5. С. 725–734.
11. Закономерности формирования потока теплоносителя за перемешивающей дистанционирующей решеткой ТВС-Квадрат реактора PWR / С. М. Дмитриев [и др.] // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. 2018. Т. 61, № 3. С. 258–268.
12. Применение многоканального пневмометрического зонда для исследования профиля скорости теплоносителя в моделях топливных кассет ядерных реакторов / С. М. Дмитриев [и др.] // Приборы и методы измерений. 2015. Т. 6. № 2. С. 188–195.

Поступила 30.03.2023

Подписана к печати 25.04.2023

Опубликована онлайн 31.07.2023

REFERENCES

1. Zverev D. L., Samoilov O. B., Romanov A. I., Panov V. A., Fal'kov A. A., Sholin E. V., Zotov S. A. (2020) Fuel for Vver and PWR: Current Status and Prospects. *Atomic Energy*, 129 (2), 51–53. <https://doi.org/10.1007/s10512-021-00720-z>.
2. Dmitriev S. M., Zverev D. L., Bykh O. A., Panov Yu. K., Sorokin N. M., Farafonov V. A. (2023) *The Main Equipment of Nuclear Power Plants with Thermal Reactors*. Moscow, Mashinostroenie Publ. 413 (in Russian).
3. Noskov A. S., Falkov A. A., Shipov D. L., Lukyanov V. E., Morozkin O. N. (2019) Hydrodynamic Analysis of a Flow in a Mixed Core. *Journal of Physics: Conference Series*, 1359, 012084. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1359/1/012084>.
4. Bieder U., Genrault C. (2020) CFD Analysis of Intra and Inter Fuel Assembly Mixing. *Annals of Nuclear Energy*, 135, 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2019.106977>.
5. Bieder U., Genrault C., Ledac P. (2020) Hydraulic Forces Acting on Full Cross Section Fuel Assemblies with 17×17 Fuel Rods. *Progress in Nuclear Energy*, 130, 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2020.103515>.
6. Yan J., Zhang Y., Yang B., Li W., Zhou Y. Influence of Spacer Grid Outer Strap on Fuel Assembly Thermal Hydraulic Performance. *Science and Technology of Nuclear Installations*, 2014, 1–10. <https://doi.org/10.1155/2014/602062>.
7. de Lambert S., Cardolaccia J., Faucher V., Thomine O., Leturcq B., Campioni G. (2021) Semi-analytical modeling of the Flow Redistribution Upstream From the Mixing Grids in a Context of Nuclear Fuel Assembly Bow. *Nuclear Engineering and Design*, 371, 1–16. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2020.110940>.
8. Gukhman A. A. (1973) *Introduction to Similarity Theory*. 2nd ed. Moscow, Vysshaya Shkola Publ. 296 (in Russian).
9. Samoilov O. B., Noskov A. S., Shipov D. L., Dmitriev S. M., Dobrov A. A., Doronkov D. V., Legchanov M. A., Pronin A. N., Solntsev D. N., Sorokin V. D., Khrobostov A. E. (2019) Hydrodynamic Features of the Flow Downstream from the Mixing Spacer Grid in a Kvadrat Fuel Assembly in PWRs. *Thermal Engineering*, 66 (4), 243–248. <https://doi.org/10.1134/S0040601519040074>.
10. Dmitriev S. M., Dobrov A. A., Doronkov D. V., Pronin A. N., Solntsev D. N., Sorokin V. D., Khrobostov A. E. (2018) The Study of Hydrodynamic Processes of a Coolant Flow in FA-Kvadrat PWR with Various Mixing Spacer Grids. *Thermophysics and Aeromechanics*, 25 (5), 695–703. <https://doi.org/10.1134/S0869864318050062>.
11. Dmitriev S. M., Dobrov A. A., Doronkov D. V., Khrobostov A. E., Pronin A. N., Ryazanov A. V., Sorokin V. D., Yudin A. V. (2018) Regularities of the Coolant Flow Formation Behind the Mixing Grid TVS-Kvadrat for PWR. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 61 (3), 258–268. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-61-3-258-268> (in Russian).
12. Dmitriev S. M., Dobrov A. A., Legchanov M. A., Khrobostov A. E. (2015) Application of Multihole Pressure Probe for Research of Coolant Velocity Profile in Nuclear Reactor Fuel Assemblies. *Pribory i Metody Izmereniy = Devices and Methods of Measurements*, 6 (2), 188–195 (in Russian).

Received: 30.03.2023

Accepted: 25.04.2023

Published online: 31.07.2023