

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-2-151-162>

УДК 621.039

Исследование локальной гидродинамики теплоносителя в смешанной активной зоне реактора ВВЭР

С. М. Дмитриев¹⁾, А. В. Герасимов¹⁾, А. А. Добров¹⁾, Д. В. Доронков¹⁾,
А. Н. Пронин¹⁾, А. В. Рязанов¹⁾, Д. Н. Солнцев¹⁾, А. Е. Хробостов¹⁾

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

© Белорусский национальный технический университет, 2020
Belarusian National Technical University, 2020

Реферат. В статье представлены результаты экспериментальных исследований локальной гидродинамики потока теплоносителя в смешанной активной зоне реактора ВВЭР, состоящей из ТВСА-Т и ТВСА-Т.mod.2. Моделирование процессов течения потока теплоносителя в пучке твэлов проводилось на аэродинамическом стенде. Исследования осуществлялись на модели фрагмента смешанной активной зоны реактора ВВЭР, состоящей из одного сегмента ТВСА-Т и двух ТВСА-Т.mod.2. Поля давлений потока измеряли пятиканальным пневмометрическим зондом. Поле давлений потока согласно зависимостям, полученным при тарировке, пересчитывалось в направление и величину вектора скорости теплоносителя. Для создания детальной картины течения потока была выделена характерная область поперечного сечения модели, включающая межкассетное пространство и четыре ряда твэлов каждой из топливныхборок ТВСА. В рамках реализации данного исследования проведен анализ пространственного распределения проекций скорости потока теплоносителя, который позволил выявить закономерности обтекания теплоносителем дистанционирующих, перемешивающих и комбинированных дистанционирующих решеток ТВСА, определены величины поперечных потоков теплоносителя, вызванных обтеканием гидравлически неидентичных решеток, установлена их локализация в продольном и поперечном сечениях экспериментальной модели. Кроме того, выявлен эффект накопления гидродинамических возмущений потока в продольном и поперечном сечениях модели, вызванный шахматным расположением гидравлически неидентичных решеток. Результаты исследования межкассетного взаимодействия теплоносителя между соседними ТВСА-Т и ТВСА-Т.mod.2 приняты для практического использования в АО «ОКБМ Африкантов» при оценке теплотехнической надежности активных зон реакторов ВВЭР и включены в базу данных для верификации программ вычислительной гидродинамики (CFD-кодов) и детального поячеечного расчета активной зоны реакторов.

Ключевые слова: активная зона, тепловыделяющая сборка, дистанционирующие и комбинированные дистанционирующие решетки, гидродинамика теплоносителя, межкассетное взаимодействие

Для цитирования: Исследование локальной гидродинамики теплоносителя в смешанной активной зоне реактора ВВЭР / С. М. Дмитриев [и др.] // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2020. Т. 63, № 2. С. 151–162. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-2-151-162>

Адрес для переписки

Дмитриев Сергей Михайлович
Нижегородский государственный
технический университет имени Р. Е. Алексева
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

Investigation of Coolant Local Hydrodynamics in the Mixed Core of the VVER Reactor

S. M. Dmitriev¹⁾, A. V. Gerasimov¹⁾, A. A. Dobrov¹⁾, D. V. Doronkov¹⁾,
A. N. Pronin¹⁾, A. V. Ryazanov¹⁾, D. N. Solntsev¹⁾, A. E. Khrobostov¹⁾

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

Abstract. The article presents the results of experimental studies of the local hydrodynamics of the coolant flow in the mixed core of the VVER reactor, consisting of the TVSA-T and TVSA-T mod.2 fuel assemblies. Modeling of the flow of the coolant flow in the fuel rod bundle was carried out on an aerodynamic test stand. The research was carried out on a model of a fragment of a mixed core of a VVER reactor consisting of one TVSA-T segment and two segments of the TVSA-T.mod2. The flow pressure fields were measured with a five-channel pneumatic probe. The flow pressure field was converted to the direction and value of the coolant velocity vector according to the dependencies obtained during calibration. To obtain a detailed data of the flow, a characteristic cross-section area of the model was selected, including the space cross flow between fuel assemblies and four rows of fuel rods of each of the TVSA fuel assemblies. In the framework of this study the analysis of the spatial distribution of the projections of the velocity of the coolant flow was fulfilled that has made it possible to pinpoint regularities that are intrinsic to the coolant flowing around spacing, mixing and combined spacing grates of the TVSA. Also, the values of the transverse flow of the coolant caused by the flow along hydraulically non-identical grates were determined and their localization in the longitudinal and cross sections of the experimental model was revealed. Besides, the effect of accumulation of hydrodynamic flow disturbances in the longitudinal and cross sections of the model caused by the staggered arrangement of hydraulically non-identical grates was determined. The results of the study of the coolant cross flow between fuel assemblies interaction, i.e. between the adjacent TVSA-T and TVSA-T mod.2 fuel assemblies were adopted for practical use in the JSC of “Afrikantov OKB Mechanical Engineering” for assessing the heat engineering reliability of VVER reactor cores; also, they were included in the database for verification of computational hydrodynamics programs (CFD codes) and for detailed cell-based calculation of the reactor core.

Keywords: core, fuel assembly, spacing and combined spacing grates, coolant hydrodynamics, coolant cross flow between fuel assemblies' interaction

For citation: Dmitriev S. M., Gerasimov A. V., Dobrov A. A., Doronkov D. V., Pronin A. N., Ryazanov A. V., Solntsev D. N., Khrobostov A. E. (2020) Investigation of Coolant Local Hydrodynamics in the Mixed Core of the VVER Reactor. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 63 (2), 151–162. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-2-151-162> (in Russian)

Введение

В настоящее время проведена частичная перегрузка активной зоны реактора ВВЭР второго энергоблока АЭС «Темелин», в рамках которой загружены тепловыделяющие сборки новой модификации ТВСА-Т.mod.2, пришедшие на замену штатным ТВСА-Т [1]. Разработку конструкции обеих топливныхборок производило АО «ОКБМ Африкантов» (г. Нижний Новгород, Россия).

По сравнению с тепловыделяющими сборками ТВСА-Т, основным отличием конструкции усовершенствованной ТВСА является применение отдельно стоящих перемешивающих решеток (ПР), которые обеспечивают более интенсивное перемешивание теплоносителя в поперечном сечении сборки и повышение критических тепловых потоков, что позволило улучшить эксплуатационные характеристики новой кассеты.

Поскольку оба типа ТВСА – бесчехловые, перемешивание теплоносителя происходит не только в пределах одной кассеты, но и между соседними сборками. Данное явление необходимо учитывать в процессе обоснования теплотехнической надежности активной зоны [2]. Это обусловило необходимость проведения комплексных исследований процесса межкассетного взаимодействия теплоносителя между соседними ТВСА различных конструкций в смешанной активной зоне реактора ВВЭР.

Экспериментальный стенд

Моделирование течения теплоносителя в активной зоне производилось на аэродинамическом стенде в лаборатории «Реакторная гидродинамика» НГТУ имени Р. Е. Алексеева [3–6].

Для проведения исследований были изготовлены экспериментальные модели (ЭМ), геометрически соответствующие конструкции различных высотных участков твэльного пучка активной зоны реактора ВВЭР. Все компоненты ЭМ пропорционально увеличены на коэффициент геометрического подобия $K_r = 4,4$.

Экспериментальные модели включали в себя сегменты сборок ТВСА-T.mod.2, ТВСА-T и межкассетное пространство (рис. 1a). Пояс дистанционирующей решетки (ДР), представленный на рис. 1b, состоит из пружинистых элементов, расположенных по треугольной решетке и объединенных стальным ободом [7]. Комбинированная дистанционирующая решетка (КДР) ТВСА-T (рис. 1c) снабжена турбулизирующими дефлекторами, размещенными согласно схеме «закрутка вокруг твэла», угол отгиба дефлекторов составляет 38° . Пояс перемешивающей решетки (рис. 1d) снабжен турбулизирующими дефлекторами с углом отгиба 30° , размещенными согласно схеме «порядная прогонка». Все пояса решеток снабжены имитаторами зубчатого края обода.

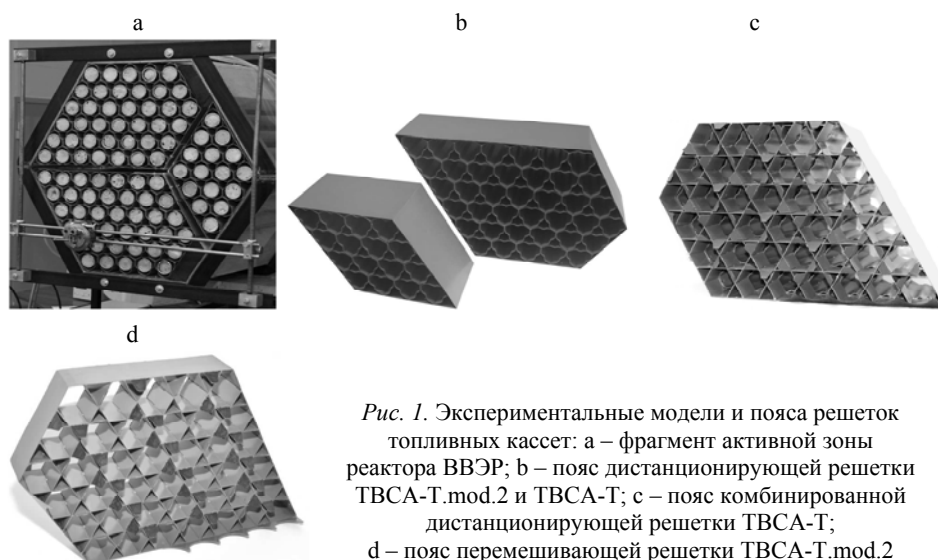


Рис. 1. Экспериментальные модели и пояса решеток топливных кассет: а – фрагмент активной зоны реактора ВВЭР; б – пояс дистанционирующей решетки ТВСА-T.mod.2 и ТВСА-T; в – пояс комбинированной дистанционирующей решетки ТВСА-T; д – пояс перемешивающей решетки ТВСА-T.mod.2

Fig. 1. Test models and spacing grates of fuel assemblies: а – fragment of the VVER core; б – spacing grate of the TVSA-T.mod2 and TVSA-T; в – spacing mixing grate of the TVSA-T; д – mixing grate of the TVSA-T.mod2

Измерительный комплекс

Измерение поля давлений потока теплоносителя производилось пневмометрическим зондом. Датчик выполнен в виде пяти стальных капилляров, расположенных в двух перпендикулярных друг к другу диаметральных плоскостях. Поле давлений потока в окрестности чувствительной части зонда согласно зависимостям, полученным при тарировке, пересчитывалось в направление и величину вектора скорости теплоносителя в месте его позиционирования [8]. Зонд выполнен таким образом, чтобы не вносить возмущения в поток и не искажать направление течения теплоносителя. Погрешность определения составляющих вектора скорости не превышала 7 %. Снятие показаний с зонда осуществлялось преобразователем давления САПФИР-22Р. Данный прибор имеет допустимый предел основной погрешности $\pm 0,25$ %.

Методика проведения исследований

Процесс межкассетного взаимодействия теплоносителя изучали на трех фрагментах твэльного пучка смешанной активной зоны (рис. 2).

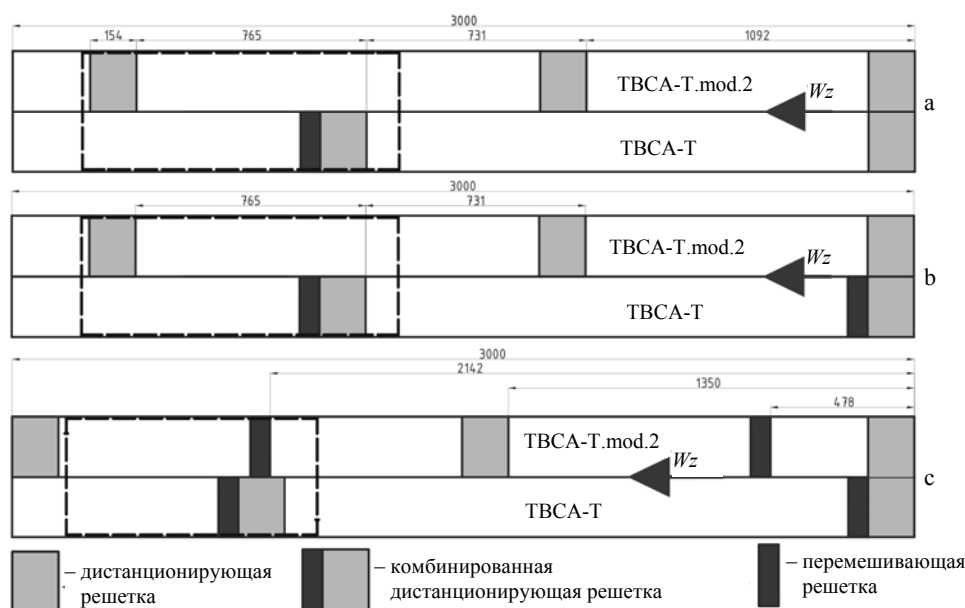


Рис. 2. Схема расположения решеток в различных фрагментах твэльного пучка ТВСА: а, б, в – нижний, средний и верхний фрагменты соответственно

Fig. 2. The arrangement of grates in various parts of the fuel rod bundle of the TVSA: a, b, c – bottom, middle and upper parts, respectively

Характерной особенностью ЭМ нижнего фрагмента твэльного пучка является симметричность входных условий течения потока, т. е. на входе в ЭМ установлены ячейковые ДР единой конструкции для обеих ТВСА (рис. 2а). Особенность ЭМ среднего фрагмента твэльного пучка – несимметричность входных условий течения потока, т. е. на входе в ЭМ установлены ячейковая ДР и КДР (рис. 2б). Для ЭМ верхнего фрагмента твэльного пучка,

помимо несимметричности входных условий течения потока, характерно наличие отдельно стоящих ПР (рис. 2с).

Методика проведения исследований заключалась в следующем.

1. Для изучения процесса межкассетного взаимодействия потока были выбраны характерные области в поперечном сечении ЭМ, представленном на рис. 3.

2. Далее характерные области разбивались на определенное количество зон измерения, в каждой из которых с помощью пневмометрического зонда проводились замеры поля давлений потока в характерных сечениях по длине ЭМ (рис. 2). Полученное распределение давлений затем пересчитывалось в проекции скорости на координатные оси X , Y , Z и осреднялось по зазорам между твэлами и межкассетному пространству (рис. 3).

3. По полученным данным строились графики распределения составляющих вектора скорости от относительной координаты l/d_r (где l – расстояния за решетками, в которых проводились замеры поля давлений потока; d_r – гидравлический диаметр модели) и картограммы распределения осевой скорости в поперечном сечении ЭМ.

Обоснование представительности проведения экспериментального изучения течения потока теплоносителя за решетками-интенсификаторами на исследовательском стенде представлено в [9, 10].

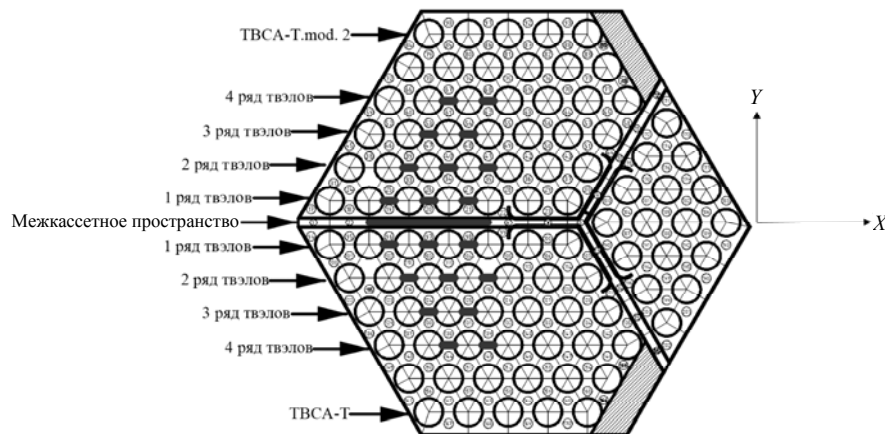


Рис. 3. Схема расположения характерных зазоров в поперечном сечении экспериментальной модели

Fig. 3. The arrangement of the characteristic gaps of the test model cross section

Результаты исследований межкассетного взаимодействия потока теплоносителя

Анализ результатов экспериментальных исследований позволил выявить общие закономерности течения потока и заключить следующее.

1. В процессе обтекания теплоносителем гидравлически неидентичных, расположенных на разных уровнях дистанционирующих, комбинированных дистанционирующих и перемешивающих решеток (рис. 2) в смежных ТВСА различных конструкций возникают поперечные потоки высокой интенсивности, оказывающие значительное влияние на течение теплоносителя.

ля в соседних топливных кассетах. Движение теплоносителя на исследуемых участках носит следующий характер: при обтекании потоком КДР, расположенной в ТВСА-Т, поперечный поток движется в ТВСА-Т.mod.2, а перед ДР и ПР, расположенными в ТВСА-Т.mod.2, поперечный поток направлен в ТВСА-Т.

2. В области межкассетного пространства отмечено, что величина поперечной скорости при обтекании потоком КДР и ДР на каждом из фрагментов твэльного пучка имеет близкие значения и составляет: $W_y/\bar{W} = 0,3$ – для среднего фрагмента; $W_y/\bar{W} = 0,25$ – для нижнего; $W_y/\bar{W} = 0,2$ – для верхнего фрагмента (рис. 4). Данные величины поперечной скорости потока примерно в два раза меньше, чем в твэльном пучке смежных ТВСА, что обусловлено наличием в межкассетном зазоре потока теплоносителя с высокими аксиальными скоростями, который оказывает демпфирующее воздействие на поперечный поток теплоносителя между соседними ТВСА, заключающееся в уносе части поперечного потока массы в продольном направлении.

3. При обтекании теплоносителем ПР, расположенной в верхнем фрагменте твэльного пучка в ТВСА-Т.mod.2, в межкассетном пространстве образуется поперечный поток, направленный в ТВСА-Т, значение поперечной скорости составляет $W_y/\bar{W} = 0,25$ (рис. 4). Данное явление характерно только для области межкассетного пространства и не наблюдается в твэльном пучке кассет, поскольку ПР находится на одном уровне с КДР, обод которой блокирует поперечный поток.

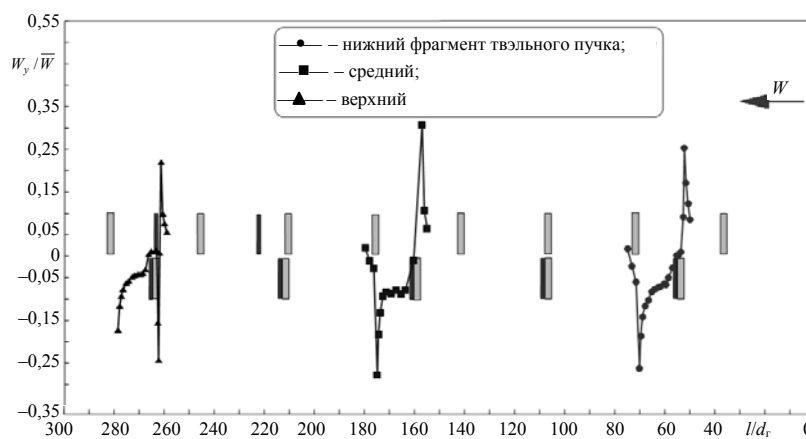


Рис. 4. Распределение поперечной скорости в межкассетном пространстве:

$$\bar{W} = 27,5 \text{ м/с}; \text{ Re} = 78000$$

Fig. 4. The distribution of the flow velocity in cross flow between fuel assemblies

$$\bar{W} = 27.5 \text{ m/s}; \text{ Re} = 78000$$

4. В ряду твэлов, прилегающем к межкассетному пространству, отмечено:

а) при обтекании потоком КДР и ДР, расположенных в нижнем фрагменте твэльного пучка, значения поперечной скорости одинаковы и составляют $W_y/\bar{W} = 0,4$ (рис. 5);

б) наибольшая интенсивность поперечного потока теплоносителя наблюдается при обтекании потоком КДР, расположенной в среднем фрагменте твэльного пучка, значение поперечной скорости $W_y/\bar{W} = 0,5$, а при обтекании теплоносителем ДР, расположенной на том же фрагменте, поперечная скорость имеет близкое значение $W_y/\bar{W} = 0,45$ (рис. 5);

в) в верхнем фрагменте твэльного пучка при обтекании потоком КДР и ДР значения поперечной скорости составляют: $W_y/\bar{W} = 0,47$ и $W_y/\bar{W} = 0,40$ соответственно (рис. 5). Данные величины поперечных скоростей близки к результатам, полученным на среднем фрагменте твэльного пучка, что может быть обусловлено наличием перемешивающих решеток;

г) при движении теплоносителя через нижний и средний фрагменты твэльного пучка отмечен процесс накопления гидродинамических возмущений потока, который выражается ростом величины поперечной скорости, а именно – при обтекании потоком КДР и ДР среднего фрагмента твэльного пучка значения поперечной скорости W_y/\bar{W} соответственно на 20 и 10 % больше, чем при обтекании потоком решеток тех же конструкций на нижнем фрагменте (рис. 5). В свою очередь, в верхнем фрагменте твэльного пучка эффект накопления гидродинамических возмущений потока не наблюдается, величина поперечной скорости W_y/\bar{W} близка к значениям скорости на среднем фрагменте, что может быть обусловлено наличием перемешивающих решеток (рис. 5).

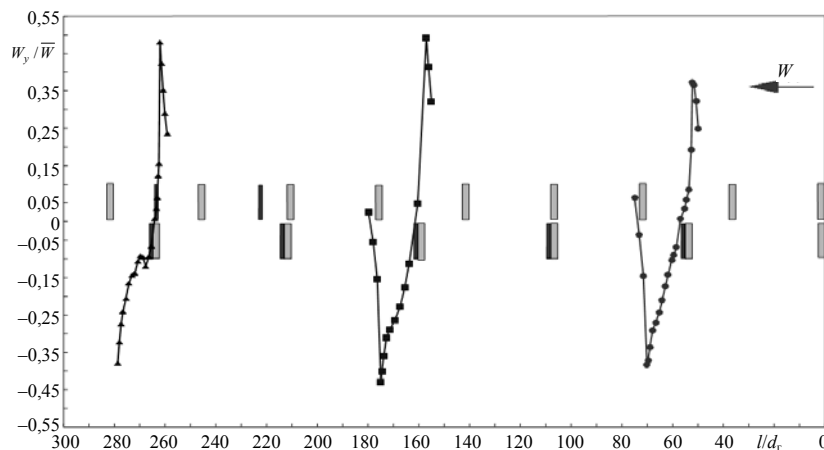


Рис. 5. Распределение поперечной скорости в рядах твэлов ТВСА, прилегающих к межкассетному пространству: $\bar{W} = 27,5$ м/с; $Re = 78000$;
 —●— нижний; —■— средний; —▲— верхний фрагменты твэльного пучка

Fig. 5. The distribution of the cross flow velocity in the fuel rod bundles of the TVSA adjusting to the space between fuel assemblies: $\bar{W} = 27,5$ m/s; $Re = 78000$;
 —●— bottom; —■— middle; —▲— upper fragments of the fuel rod bundle

5. Анализ распространения гидродинамических возмущений теплоносителя в поперечном сечении топливных сборок показал следующее:

а) начиная со второго ряда твэлов величина поперечной скорости W_y / \bar{W} при обтекании решеток различных конструкций для всех исследуемых фрагментов уменьшается в два раза (рис. 6);

б) закономерности накопления возмущений потока теплоносителя по длине исследуемых фрагментов твэльного пучка, характерные для ряда твэлов, прилегающего к межкассетному пространству, распространяются и на последующие ряды твэлов;

в) распространение гидродинамических возмущений потока в поперечном сечении сборок изменяется в зависимости от исследуемого фрагмента твэльного пучка, а именно: в нижнем фрагменте распространение возмущений потока ограничивается третьим рядом твэлов, в среднем – четвертым, в верхнем – пятым рядами;

г) начиная с шестого ряда твэлов на всех исследуемых участках твэльного пучка наблюдается турбулентное движение теплоносителя, поперечная скорость имеет значение $W_y / \bar{W} \approx 0,05$.

Таким образом, процесс накопления гидродинамических возмущений потока теплоносителя происходит как по длине твэльного пучка исследуемого фрагмента активной зоны, так и в поперечном сечении топливных кассет ТВСА.

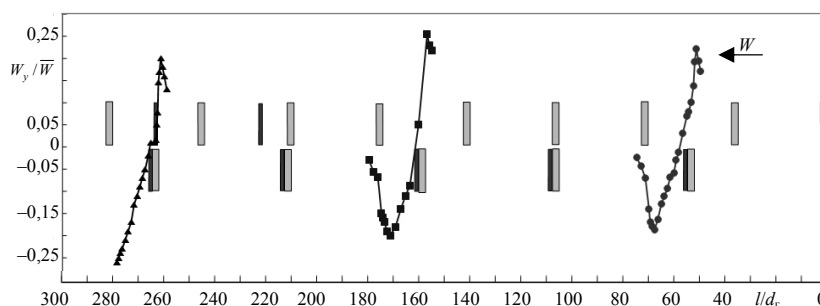


Рис. 6. Распределение поперечной скорости во вторых рядах твэлов ТВСА:

$$\bar{W} = 27,5 \text{ м/с}; \text{ Re} = 78000;$$

—●— — нижний; —■— — средний; —▲— — верхний фрагменты твэльного пучка

Fig. 6. The distribution of the cross flow velocity in the second fuel rod bundles of the TVSA:

$$\bar{W} = 27.5 \text{ m/s}; \text{ Re} = 78000;$$

—●— — bottom; —■— — middle; —▲— — upper fragments of the fuel rod bundle

6. На нижнем и среднем фрагментах твэльного пучка в области поясов исследуемых решеток наблюдается интенсивное перераспределение осевого потока в рядах твэлов, расположенных около межкассетного пространства. Данное перераспределение потока характеризуется локальным ростом величины осевой скорости теплоносителя в одном из сегментов кассет ТВСА, в сторону которого направлен поперечный поток, формиру-

ющийся в процессе обтекания решеток с различным гидравлическим сопротивлением (рис. 7 а, b). Величина осевой скорости в этих областях находится в диапазоне $W_z / \overline{W} \approx 1,3-1,5$. Наименьшее значение осевой скорости $W_z / \overline{W} \approx 0,6-0,9$ на всех исследуемых участках отмечено непосредственно за поясами КДР.

7. Распределение локальных максимумов осевой скорости в поперечном сечении исследуемых ТВСА совпадает с глубиной распространения гидродинамических возмущений потока теплоносителя, т. е. на нижнем фрагменте твэльного пучка локальный максимум осевой скорости потока распространяется на три ряда твэлов, а на среднем фрагменте – на четыре ряда (рис. 7 а, b).

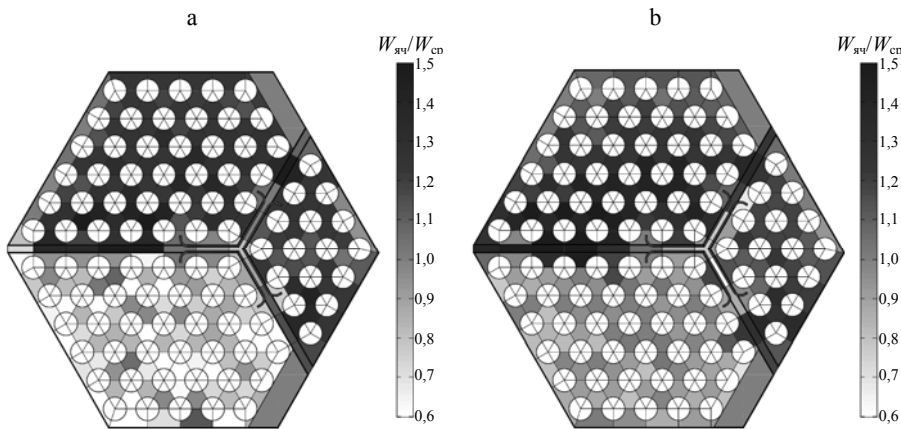


Рис. 7. Картограмма распределения осевой скорости по ячейкам экспериментальной модели: а, b – непосредственно за комбинированной дистанционирующей решеткой на нижнем и среднем фрагментах твэльного пучка соответственно; $\overline{W} = 27,5$ м/с; $Re = 78000$

Fig. 7. The cartogram of the axial speed distribution in the cells of the test model: а, b – immediately behind the combined spacing grate on the bottom and on the middle fragments of the fuel rod bundle, respectively; $\overline{W} = 27.5$ m/s; $Re = 78000$

8. Вследствие наличия гидравлически неидентичных решеток распределение расхода теплоносителя между соседними топливными кассетами приобретает сильную неравномерность. Максимальное различие осевого расхода теплоносителя между смежными кассетами (38 %) наблюдается на среднем фрагменте твэльного пучка и обусловлено наибольшей интенсивностью поперечного потока в данной области. Выравнивание расхода теплоносителя между смежными топливными кассетами отмечено непосредственно перед ДР. Различие расхода теплоносителя между кассетами составляет не более 10 %. Схожая картина распределения осевого расхода потока теплоносителя выявлена и на нижнем фрагменте твэльного пучка (рис. 8).

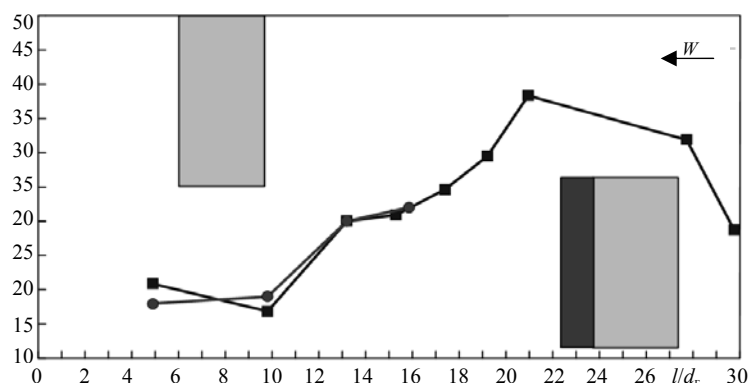


Рис. 8. Соотношение расходов теплоносителя между ТВСА-Т и ТВСА-Т.mod.2:

$$\bar{W} = 27,5 \text{ м/с}; \text{ Re} = 78000;$$

—■— — средний; —●— — нижний фрагменты твэльного пучка

Fig. 8. The ratio of the coolant flow rate between TVSA-T and TVSA-T.mod.2:

$$\bar{W} = 27.5 \text{ m/s}; \text{ Re} = 78000;$$

—■— — middle; —●— — bottom fragments of the fuel rod bundle

ВЫВОДЫ

1. На движение теплоносителя в твэльном пучке смешанной активной зоны реактора ВВЭР значительное влияние оказывают поперечные потоки, сформированные при обтекании гидравлически неидентичных решеток.

2. В области межкассетного пространства величина поперечной скорости при обтекании потоком комбинированной дистанционирующей и дистанционирующей решеток на всех исследуемых фрагментах твэльного пучка кассет имеет близкие значения и составляет: $W_y / \bar{W} = 0,3$ – для среднего фрагмента; $W_y / \bar{W} = 0,25$ – для нижнего; $W_y / \bar{W} = 0,2$ – для верхнего фрагмента.

3. Максимальная величина поперечной скорости отмечена при обтекании потоком комбинированной дистанционирующей решетки, расположенной в среднем фрагменте твэльного пучка, значение поперечной скорости $W_y / \bar{W} = 0,5$.

4. При движении теплоносителя через нижний и средний фрагменты твэльного пучка наблюдается процесс накопления возмущений потока, который выражается ростом величины поперечной скорости, а именно: при обтекании потоком комбинированной дистанционирующей и дистанционирующей решеток среднего фрагмента твэльного пучка значения поперечной скорости W_y / \bar{W} соответственно на 20 и 10 % больше, чем при обтекании потоком решеток тех же конструкций на нижнем фрагменте. В свою очередь, в верхнем фрагменте твэльного пучка эффект накопления возмущений потока отсутствует.

5. Распространение возмущений потока в поперечном сечении сборок изменяется в зависимости от исследуемого фрагмента твэльного пучка, а именно: в нижнем фрагменте твэльного пучка распространение возмущений потока ограничивается третьим рядом твэлов, в среднем – четвертым, в верхнем – пятым рядами твэлов.

6. Процесс накопления гидродинамических возмущений потока теплоносителя наблюдается как по длине твэльного пучка исследуемого фрагмента активной зоны, так и в поперечном сечении топливных кассет.

7. Распределение локальных максимумов осевой скорости в поперечном сечении исследуемых ТВСА совпадает с глубиной распространения гидродинамических возмущений потока теплоносителя.

8. Максимальное различие осевого расхода теплоносителя между смежными кассетами составляет 38 %, наблюдается на среднем фрагменте твэльного пучка и обусловлено наибольшей интенсивностью поперечного потока в данной области.

Работа выполнена в рамках базовой части Государственного задания № 13.8823.2017/8.9 и при финансовой поддержке гранта Президента Российской Федерации в рамках научного проекта МК-2398.2018.8.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дмитриев, С. М. Основное оборудование АЭС с корпусными реакторами на тепловых нейтронах / С. М. Дмитриев [и др.]. М.: Машиностроение, 2013. 415 с.
2. К вопросу о методологии обоснования теплотехнической надежности активных зон водяных энергетических реакторов / А. А. Баринов [и др.] // Атомная энергия. 2016. Т. 120, вып. 5. С. 270–275.
3. Экспериментальные исследования локальной гидродинамики и массообмена теплоносителя в тепловыделяющих сборках реакторных установок с водой под давлением / С. М. Дмитриев [и др.] // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2016. Т. 59, № 6. С. 591–603. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2016-59-6-591-603>.
4. Закономерности формирования потока теплоносителя за перемешивающей дистанционирующей решеткой ТВС-Квадрат реактора PWR / С. М. Дмитриев [и др.] // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2018. Т. 61, № 3. С. 258–268. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2018-61-3-258-268>.
5. 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. 695–703.
6. Экспериментальные исследования гидродинамики потока теплоносителя за дистанционирующей и перемешивающей решетками ТВСА-12PLUS реактора ВВЭР-1000 / С. М. Дмитриев [и др.] // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика ядерных реакторов. 2017. № 1. С. 126–134.
7. Экспериментальные исследования локальной гидродинамики потока теплоносителя в активной зоне реактора ВВЭР с ТВСА-12PLUS / С. М. Дмитриев [и др.] // Вестник Московского энергетического института. 2016. № 2. С. 15–21.
8. 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, вып. 2. С. 188–195.

9. Гухман, А. А. Введение в теорию подобия / А. А. Гухман. М.: Высш. шк., 1973. 296 с.
10. Гидродинамические особенности течения теплоносителя за перемешивающей дистанционирующей решеткой ТВС-Квадрат реактора PWR / О. Б. Самойлов [и др.] // Теплоэнергетика. 2019. № 4. С. 32–38.

Поступила 20.09.2019 Подписана в печать 16.12.2019 Опубликована онлайн 31.03.2020

REFERENCES

1. Dmitriev S. M., Zverev D. L., Bykh O. A., Panov Yu. K., Sorokin N. M., Farafonov V. A. (2013) *Main Equipment of Nuclear Power Plants with Thermal Neutron Hull Reactors*. Moscow, Mashinostroenie Publ. 415 (in Russian).
2. Barinov A. A., Dmitriev S. M., Khrobostov A. E., Samoilov O. B. (2016) Methods of Thermo-mechanical Reliability Validation of Thermal Water-Moderated and Water-Cooled Reactor Cores. *Atomic Energy*, 120 (5), 335–341. <https://doi.org/10.1007/s10512-016-0140-9>.
3. Dmitriev S. M., Barinov A. A., Pronin A. N., Sorokin V. D., Khrobostov A. E. (2016) Experimental Study of Local Hydrodynamics and Mass Exchange Processes of Coolant in Fuel Assemblies of Pressurized Water Reactors. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of the CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 59 (6), 591–603 (in Russian). <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2016-59-6-591-603>.
4. Dmitriev S. M., Doronkov D. V., Legchanov M. A., Sorokin V. D., Khrobostov A. E. (2018) Regularities of Formation of Flow of Coolant Behind the Tvs-Kvadrat Mixing Spacing Grid of the Pwr-Type Reactor. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of the CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 61 (3), 258–268 (in Russian). <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-61-3-258-268>.
5. 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>.
6. Dmitriev S. M., Varentsov A. V., Doronkov D. V., Pronin A. N., Solntsev D. N., Khrobostov A. E., Sukharev Yu. P. (2017) Experimental Studies of the Fluid Dynamics of the Coolant Flow Behind the TVSA-12PLUS Spacing and Mixing Grids of the VVER-1000 Reactor. *Voprosy Atomnoi Nauki i Tekhniki. Seriya: Fizika Yadernykh Reaktorov* [Issues of Nuclear Science and Technology. Series: Physics of Nuclear Reactors], (1), 126–134 (in Russian).
7. Dmitriev S. M., Doronkov D. V., Legchanov M. A., Pronin A. N., Khrobostov A. E. (2016) Experimental Studies of Local Hydrodynamics of the Coolant Flow in the Core of the VVER Reactor with TVSA-12PLUS. *Vestnik MEI. Bulletin of Moscow Power Engineering Institute*, (2), 15–21 (in Russian).
8. 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 Izmerenii = Devices and Methods of Measurements*, 6 (2), 188–195 (in Russian).
9. Gukhman A. A. (1973) *Introduction to the Theory of Similarity*. Moscow, Vysshaya Shkola Publ. 296 (in Russian).
10. 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>.

Received: 20 September 2019 Accepted: 16 December 2019 Published online: 31 March 2020