

УДК 621.039

## Гидродинамика и перемешивание теплоносителя в активной зоне реактора ВВЭР с тепловыделяющими сборками различных конструкций\*

С.М. Дмитриев<sup>1</sup>, А.В. Герасимов<sup>1</sup>, А.А. Добров<sup>1</sup>, Д.В. Доронков<sup>1</sup>,  
А.Н. Пронин<sup>1</sup>, Д.Н. Солнцев<sup>1</sup>, А.Е. Хробостов<sup>1</sup>, Ю.К. Швецов<sup>2</sup>,  
Д.Л. Шипов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Нижегородский государственный технический университет  
им. Р.Е. Алексеева

<sup>2</sup>ОКБМ Африкантов, Нижний Новгород

E-mail: nevid000@mail.ru

Представлены результаты экспериментальных исследований межкассетного взаимодействия потоков теплоносителя в активной зоне реактора ВВЭР, состоящей из тепловыделяющих сборок ТВСА-Т.mod.2 и ТВСА-Т. Моделирование процессов течения потока теплоносителя в тепловыделяющих сборках проводилось на аэродинамическом стенде. Исследования осуществлялись на модели фрагмента активной зоны реактора ВВЭР и заключались в измерении модуля вектора скорости в характерных зонах как ТВСА, так и межкассетного пространства активной зоны реактора ВВЭР. Измерения проводились пятиканальным пневмометрическим зондом. Анализ пространственного распределения проекций абсолютной скорости потока позволил детализировать картину обтекания потоком теплоносителя дистанционирующих, перемешивающих и комбинированных дистанционирующих решеток ТВСА. Результаты исследования межкассетного взаимодействия теплоносителя между соседними тепловыделяющими сборками 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 поэлементного расчета активной зоны реакторов ВВЭР.

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

### Введение

АО «ОКБМ Африкантов» осуществляет разработку конструкций тепловыделяющих сборок (ТВС) для водо-водяных энергетических реакторов (ВВЭР), расположенных как в России, так и за ее пределами. Одним из важнейших партнеров ГК «Росатом» является чешская АЭС «Темелин», на которой в рамках плановых работ в активную зону реактора ВВЭР второго энергоблока были загружены 48 тепловыделяющих сборок новой модификации ТВСА-Т.mod.2, пришедшие на замену штатным ТВСА-Т [1–3].

---

\* Работа проведена в рамках выполнения базовой части государственного задания № 13.8823.2017/8.9, а также при финансовой поддержке гранта Президента РФ в рамках научного проекта МК-2398.2018.8.

© Дмитриев С.М., Герасимов А.В., Добров А.А., Доронков Д.В., Пронин А.Н., Солнцев Д.Н., Хробостов А.Е., Швецов Ю.К., Шипов Д.Л., 2019

Основное отличие конструкции ТВСА-Т.mod.2 по сравнению с тепловыделяющими сборками ТВСА-Т, ранее поставлявшимися на АЭС «Темелин», заключается в применении перемешивающих решеток (ПР), которые обеспечивают более интенсивное перемешивание теплоносителя в поперечном сечении сборки и способствуют повышению критических тепловых потоков, что в свою очередь позволило улучшить эксплуатационные характеристики новой кассеты.

Поскольку оба типа ТВС являются бесчехловыми, перемешивание теплоносителя происходит не только в пределах одной кассеты, но и между соседними сборками. Соответственно возникла необходимость учитывать данное обстоятельство в процессе обоснования теплотехнической надежности активной зоны [4]. В связи с этим потребовалось проведение комплексных исследований межкассетного взаимодействия теплоносителя.

### Экспериментальный стенд

Моделирование течения теплоносителя в активной зоне реактора ВВЭР выполнялось на аэродинамическом стенде, расположенном в лаборатории «Реакторная гидродинамика» НГТУ им. Р.Е. Алексеева [5]. Для проведения исследований были изготовлены экспериментальные модели (ЭМ), геометрически соответствующие конструкции различных высотных участков твэльного пучка фрагмента активной зоны реактора ВВЭР. Все компоненты ЭМ были пропорционально увеличены на коэффициент геометрического подобия  $K_r = 4,4$ .

Экспериментальные модели включали в себя сегменты топливныхборок ТВСА-Т, ТВСА-Т.mod.2 и межкассетное пространство (рис. 1а). Пояс дистанционирующей решетки (ДР), представленный на рис. 1б, состоит из пружинистых элементов, расположенных согласно треугольной упаковке тепловыделяющих элементов и объединённых стальным ободом. Комбинированная дистанционирующая решетка (КДР) ТВСА-Т, представленная на рис. 1с, снабжена турбулизирующими дефлекторами, размещенными согласно схеме «закрутка вокруг твэла», угол отгиба дефлекторов составляет  $38^\circ$ .

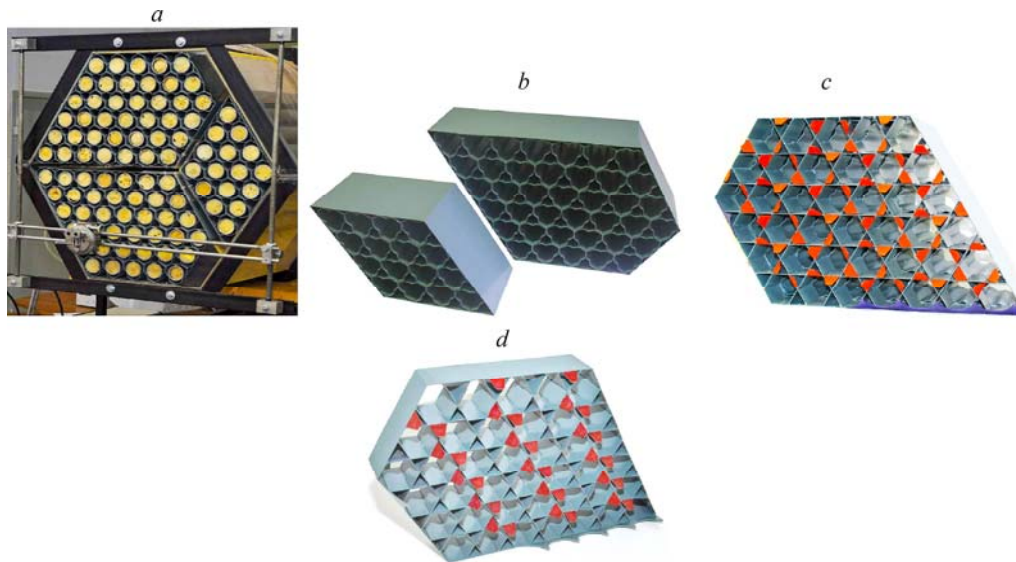


Рис. 1. Экспериментальная модель и пояса решеток топливных кассет.

*a* — ЭМ фрагмента активной зоны реактора ВВЭР, *b* — пояс ДР ТВСА-Т.mod.2 и ТВСА-Т, *c* — пояс КДР ТВСА-Т, *d* — пояс ПР ТВСА-Т.mod.2.

Пояс ПР, представленный на рис. 1*d*, снабжен турбулизирующими дефлекторами с углом отгиба в  $30^\circ$ , размещенными согласно схеме «порядная прогонка». Все пояса решеток снабжены имитаторами зубчатого края обода.

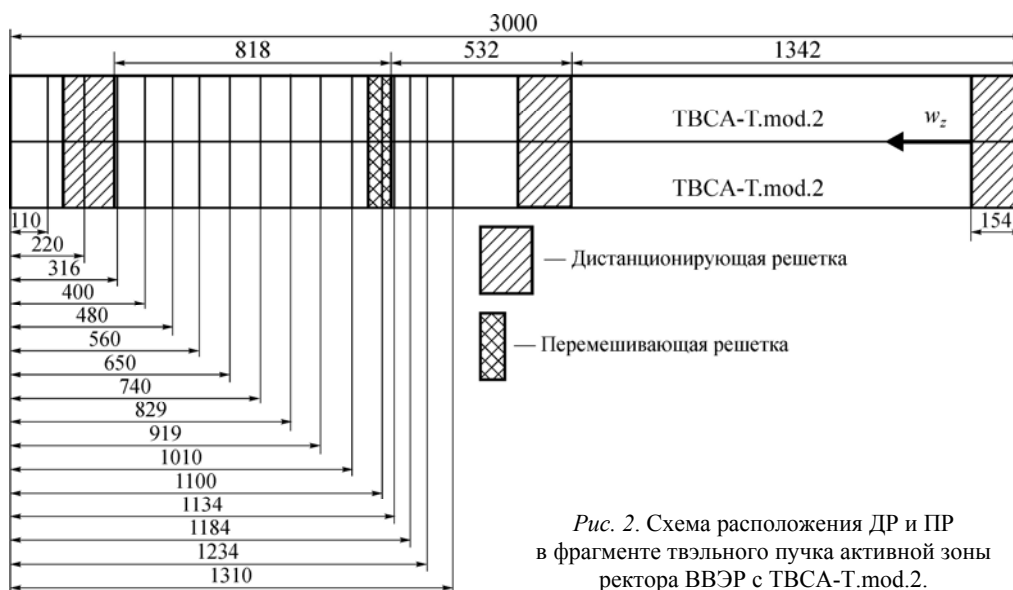
### Измерительный комплекс

Измерение локальных гидродинамических характеристик потока теплоносителя проводилось пятиканальным пневмометрическим зондом, в состав которого входят соответственно пять стальных капилляров, расположенных в двух перпендикулярных друг другу диаметральных плоскостях, срезанных под углом  $30^\circ$  и заключенных в стальную трубку диаметром 6 мм. С помощью полученного поля давлений потока в окрестности чувствительной части зонда согласно зависимостям, полученным при тарировке, рассчитывалось направление и величина абсолютной скорости теплоносителя в месте его позиционирования [6]. Зонд был 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 пятиканального зонда осуществлялось преобразователем давления САПФИР-22Р с допуском основной погрешности  $\pm 0,25\%$ . Экспериментальные данные распределения поля давлений в поперечном сечении ЭМ собирались с помощью блока коммутации «Agilent» на персональном компьютере, где проводилась их дальнейшая обработка и пересчет в компоненты вектора скорости.

### Методика проведения исследований

Изучение процесса межкассетного взаимодействия потоков теплоносителя включало следующие этапы.

1. Исследование межкассетного взаимодействия потоков теплоносителя в активной зоне с ТВСА-Т.mod.2 (схема расположения ДР и ПР представлена на рис. 2).
2. Исследование межкассетного взаимодействия потоков теплоносителя в двух фрагментах твэльного пучка активной зоны с ТВСА-Т и ТВСА-Т.mod.2 (схемы расположения ДР и КДР представлены на рис. 3, 4).



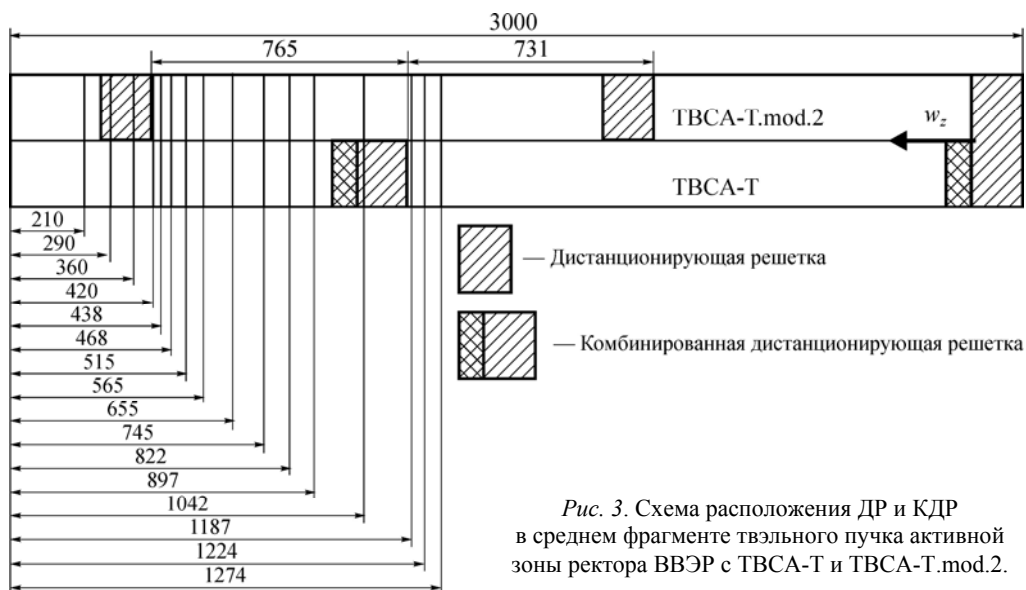


Рис. 3. Схема расположения ДР и КДР в среднем фрагменте твэльного пучка активной зоны реактора ВВЭР с ТВСА-Т и ТВСА-Т.mod.2.

Основным отличием ЭМ нижнего и среднего фрагментов твэльного пучка активной зоны реактора ВВЭР с ТВСА-Т.mod.2 и ТВСА-Т является отсутствие на нижнем фрагменте твэльного пучка ТВСА-Т одного пояса КДР (рис. 3, 4).

Методика проведения исследований была следующей.

1. Для изучения процесса межкассетного взаимодействия потока между соседними кассетами выбирались характерные области в поперечном сечении ЭМ, расположенные в зазорах между твэлами и межкассетном пространстве. Поперечные сечения ЭМ с выделенными характерными зазорами представлены на рис. 5, 6.

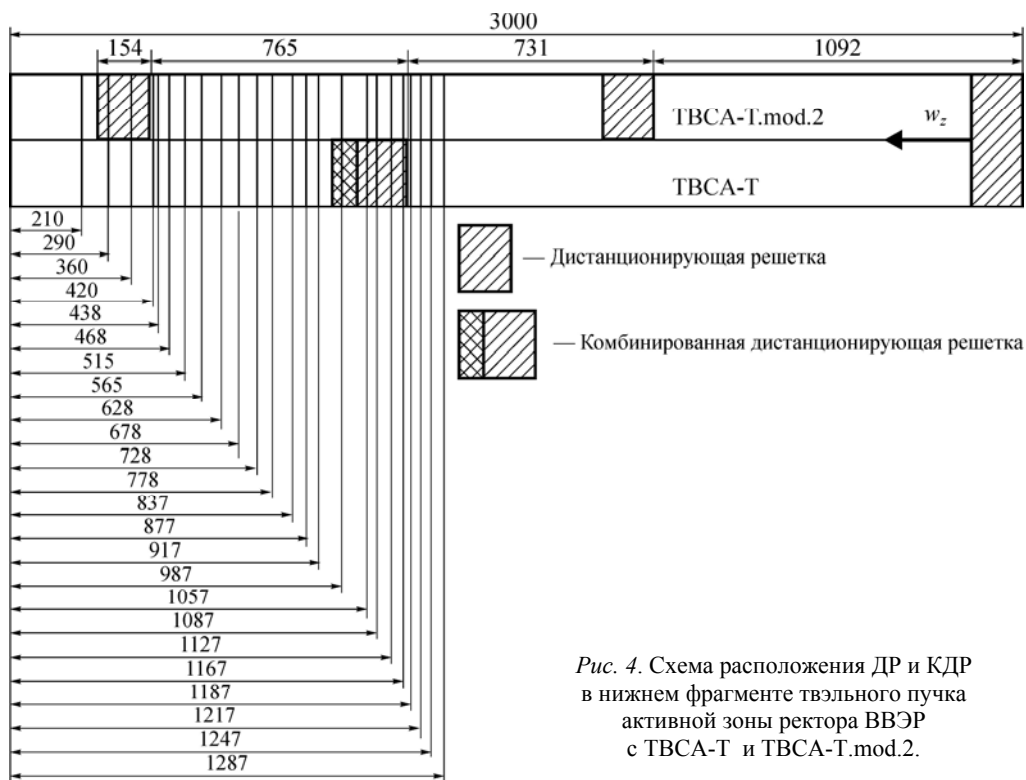


Рис. 4. Схема расположения ДР и КДР в нижнем фрагменте твэльного пучка активной зоны реактора ВВЭР с ТВСА-Т и ТВСА-Т.mod.2.

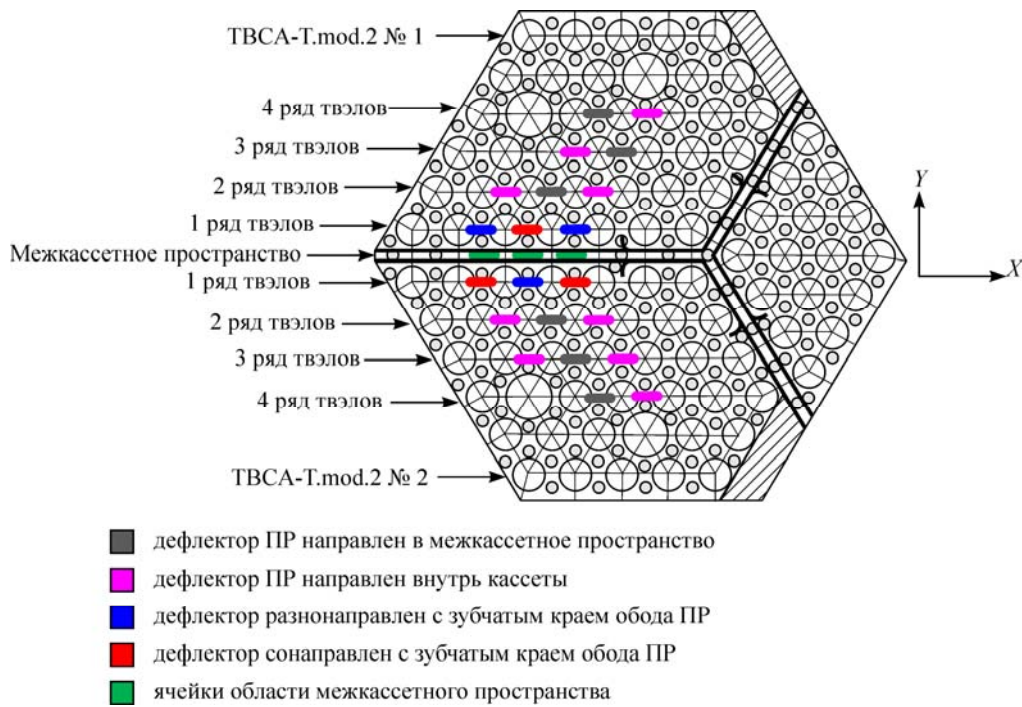


Рис. 5. Схема расположения характерных зазоров между ТВЭлами в поперечном сечении ЭМ фрагмента активной зоны реактора ВВЭР с ТВСА-T.mod.2.

2. Выделенные области разбивались на определенное количество зон измерения, в каждой из которых с помощью пятиканального зонда проводились замеры полей давления потока за поясами КДР, ПР и ДР в характерных сечениях по длине модели (рис. 2–4). Полученное распределение давлений затем пересчитывалось в проекции абсолютной скорости на координатные оси  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$ .

3. Полученные значения абсолютной скорости осреднялись по зазорам между ТВЭлами и по межкассетному пространству (рис. 5, 6).

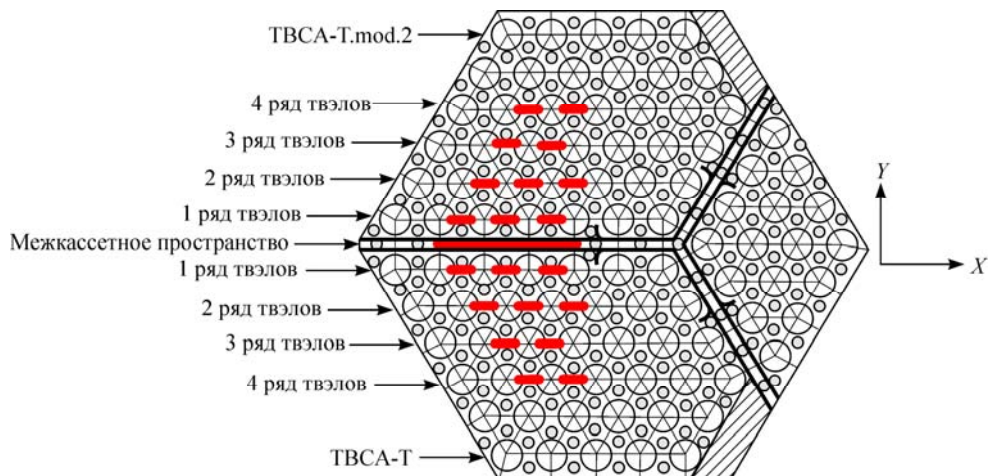


Рис. 6. Схема расположения характерных зазоров между ТВЭлами в поперечном сечении ЭМ фрагмента активной зоны реактора ВВЭР с ТВСА-T и ТВСА-T.mod.2.

4. По результатам предыдущего шага строились графики распределения проекций составляющих вектора скорости и картограммы распределения аксиальной скорости в поперечном сечении модели.

Анализ гидродинамики теплоносителя включал этапы:

- определение значений осевых и поперечных скоростей в характерных областях ЭМ;
- определение глубины распространения возмущений потока теплоносителя в соседних кассетах;
- оценка величины перераспределения осевого расхода теплоносителя между сборками ТВСА.

#### **Обоснование представительности экспериментальных исследований**

Важным этапом проведения экспериментального исследования является подтверждение его представительности. В активной зоне реактора ВВЭР при штатных параметрах теплоносителя число Рейнольдса  $Re = 500000$ , что труднодостижимо в лабораторных условиях. Однако поскольку течение водяного теплоносителя моделируется потоком воздуха, то на основе теории гидродинамического подобия можно утверждать, что в области автомодельности профиль относительной скорости ( $w_{лок}/w_{ср.расх}$ ) остается неизменным [7]. Исходя из этого, результаты, полученные при изучении гидродинамики теплоносителя на ЭМ в зоне автомодельности, могут быть перенесены на штатные условия течения теплоносителя. Таким образом, для обоснования представительности исследований на стенде требовалось проведение экспериментов по определению нижней границы зоны автомодельного течения [8]. С этой целью были выполнены исследования в диапазоне чисел  $Re = 20000 \div 80000$ , которые заключались в построении эмпирической зависимости коэффициента сопротивления трения исследованного участка от числа Рейнольдса. Полученный массив точек аппроксимировался двумя линейными зависимостями: в переходной области турбулентного течения и в области автомодельного течения. Согласно полученным результатам, область автомодельного течения потока в ЭМ начинается с чисел Рейнольдса  $Re = 55000$ , а все исследования проводились при  $Re = 80000$  на участке стабилизированного автомодельного течения теплоносителя. Также были определены значения коэффициентов местного гидравлического сопротивления дистанционирующих и комбинированных дистанционирующих решеток, которые соответствуют значениям сопротивления натуральных ДР и КДР штатных топливных кассет.

#### **Результаты исследований процесса межкассетного взаимодействия потоков теплоносителя в фрагменте активной зоны реактора ВВЭР с ТВСА-Т.mod.2**

Анализ результатов экспериментальных исследований показал следующее.

1. Движение теплоносителя в области межкассетного пространства преимущественно носит осевой характер, о чем можно судить по малым величинам осредненной поперечной скорости  $w_y / \bar{w}$  (рис. 7), значения которых не превышают 0,1. Этот факт говорит о малой величине поперечных перетечек теплоносителя из одной кассеты в другую.

2. На течение теплоносителя в рядах твэлов, прилегающих к межкассетному пространству, оказывает влияние взаимная ориентация турбулизирующих дефлекторов и зубчатого края обода ПР. Схема взаимной ориентации этих конструктивных элементов ПР представлена на рис. 8. В зазорах между твэлами, где дефлектор сонаправлен с зубчатым краем обода, осредненная поперечная скорость имеет значение  $w_y / \bar{w} = 0,3$ , а в зазорах, где дефлектор разнонаправлен с зубчатым краем обода, осредненная поперечная скорость

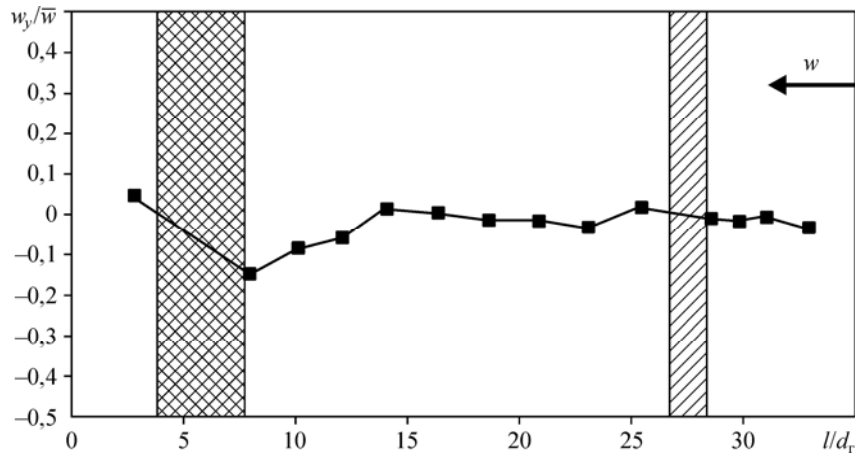


Рис. 7. Распределение осредненной поперечной скорости  $w_y/\bar{w}$  в межкассетном пространстве.  
 $\bar{w} = 30,6$  м/с,  $Re = 80000$ .

составляет  $w_y/\bar{w} = 0,15$  (рис. 9). Данный факт говорит о том, что зубчатый край обода создает дополнительное сопротивление поперечному потоку, образуемому под воздействием дефлектора, и снижает его интенсивность в два раза.

3. Возмущения потока, создаваемые зубчатым краем обода, охватывают только тот ряд твэлов, который прилегает к межкассетному пространству, а начиная со второго ряда твэлов движение потока теплоносителя в значительной степени обусловлено расположением дефлекторов.

4. В межтвэльных зазорах, расположенных в глубине исследуемых топливных сборок (со второго по четвертый ряд твэлов), осредненная поперечная скорость за турбулизирующими дефлекторами имеет величину  $w_y/\bar{w} \approx 0,4$ , далее при удалении от пояса ПР

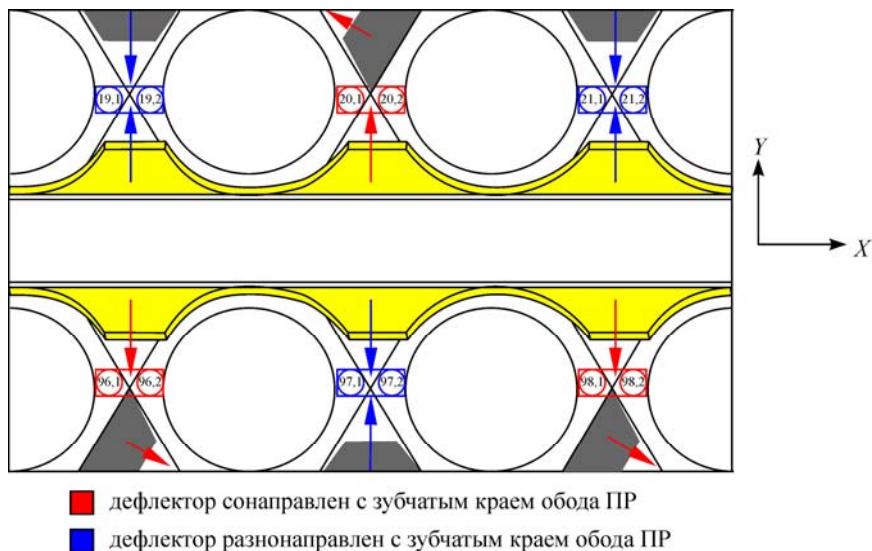


Рис. 8. Схема взаимной ориентации дефлекторов и зубчатого края обода ПР.

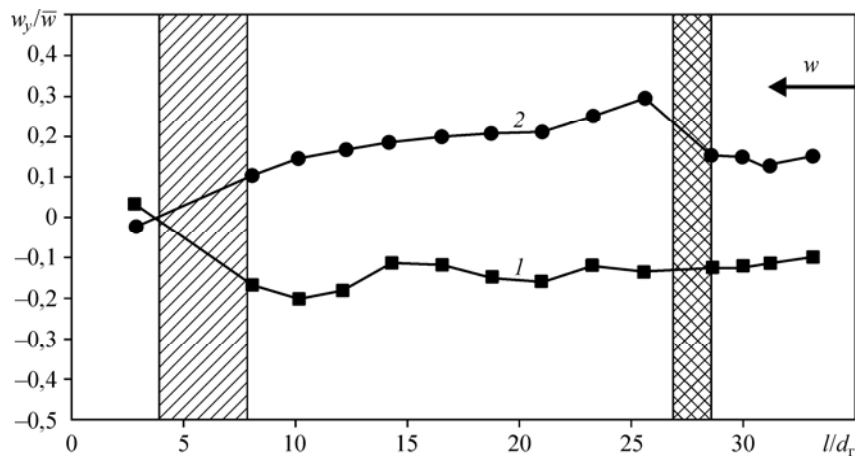


Рис. 9. Распределение осредненной поперечной скорости  $w_y / \bar{w}$  в зазорах между твэлами, прилежащими к межкассетному пространству.  $\bar{w} = 30,6$  м/с,  $Re = 80000$ ; зазоры между твэлами, где дефлектор ПР имеет противоположное направление (1) и сонаправлен (2) с зубчатым краем обода решетки.

значение поперечной скорости уменьшается и перед ДР при  $l/d_r = 8,5$  составляет  $w_y / \bar{w} \approx (0,1 \div 0,15)$  ( $l$  — длина участка измерения, мм,  $d_r$  — гидравлический диаметр модели, мм). Далее за поясом ДР происходит полное затухание возмущений потока, вызванных турбулизирующими дефлекторами, и поперечная скорость имеет значение  $w_y / \bar{w} \approx 0,05$  (рис. 10, 11).

5. Величина перераспределения потока между соседними топливными сборками незначительна, осевые расходы теплоносителя через соседние сборки отличаются менее чем на 5 % (рис. 12).

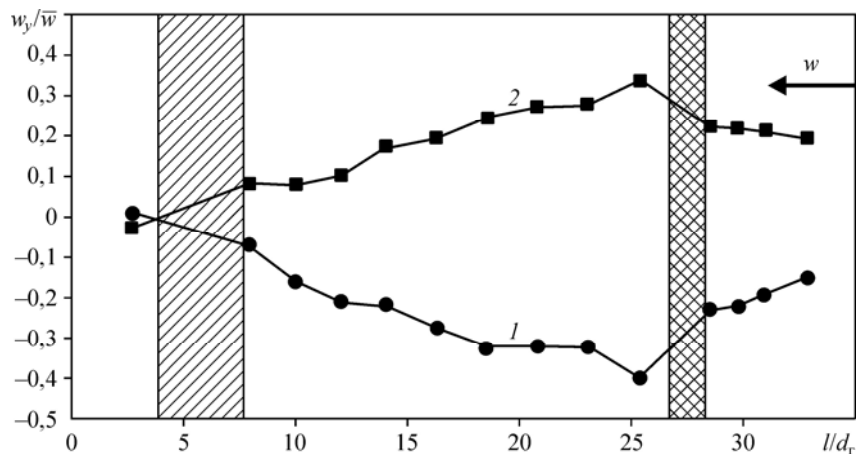


Рис. 10. Распределение осредненной поперечной скорости  $w_y / \bar{w}$  в характерных зазорах между твэлами ТВСА-Т.mod.2 в ряду № 1.  $\bar{w} = 30,6$  м/с,  $Re = 80000$ ; 1 и 2 — зазоры между твэлами, где дефлектор направлен в область межкассетного пространства и внутрь кассеты соответственно.



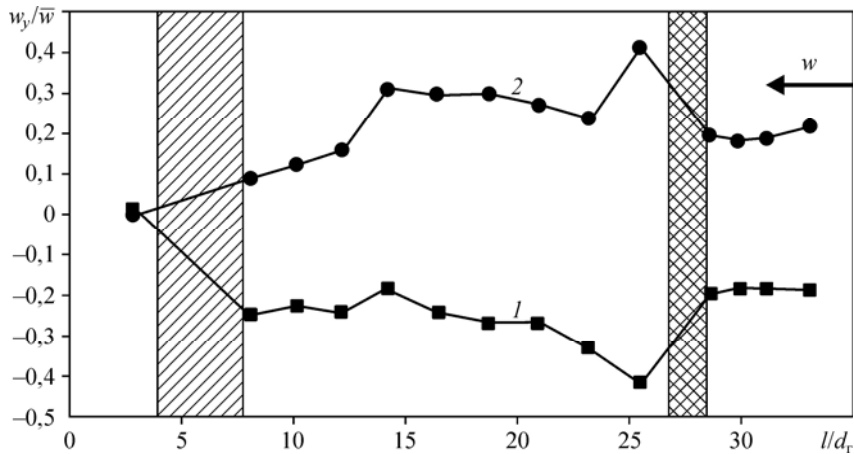


Рис. 11. Распределение осредненной поперечной скорости  $w_y/\bar{w}$  в характерных зазорах между твэлами ТВСА-Т.mod.2 в ряду № 2.  $\bar{w} = 30,6$  м/с,  $Re = 80000$ ; 1 и 2 — зазоры между твэлами, где дефлектор направлен внутрь кассеты и в область межкассетного пространства соответственно.

### Результаты исследований межкассетного взаимодействия потоков теплоносителя в среднем и нижнем фрагментах твэльного пучка активной зоны реактора ВВЭР с ТВСА-Т и ТВСА-Т.mod.2

Анализ результатов экспериментальных исследований позволил выявить общие закономерности течения потока и сделать приведенные ниже выводы.

1. Движение теплоносителя в исследуемой области носит следующий характер: при обтекании КДР, расположенной в ТВСА-Т, поперечный поток движется в ТВСА-Т.mod.2, а перед ДР, расположенной в ТВСА-Т.mod.2, поперечный поток направляется в ТВСА-Т. Сформированные таким образом потоки оказывают значительное влияние на движение теплоносителя в соседних топливных кассетах.

2. Величины поперечной скорости при обтекании потоком КДР и ДР в области межкассетного пространства имеют близкие значения. Для среднего фрагмента твэльного пучка эта скорость составляет  $w_y/\bar{w} = 0,3$ , для нижнего фрагмента —  $w_y/\bar{w} = 0,25$  (см. рис. 13–16).

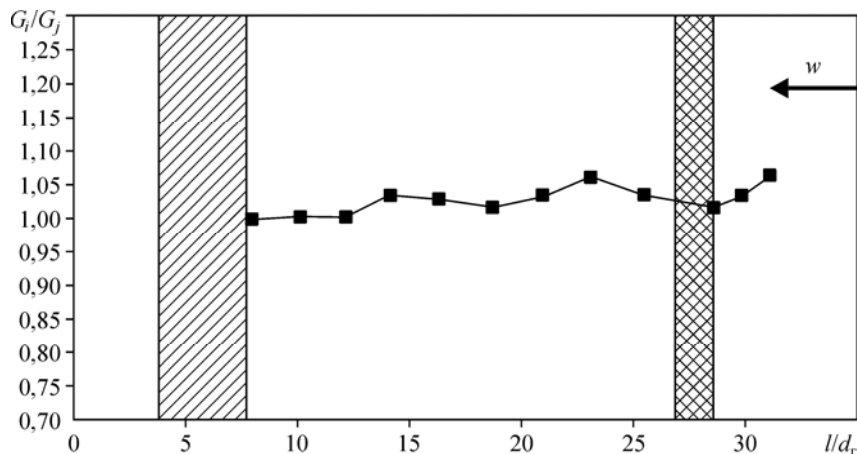


Рис. 12. Соотношение расходов потока в соседних топливных кассетах.

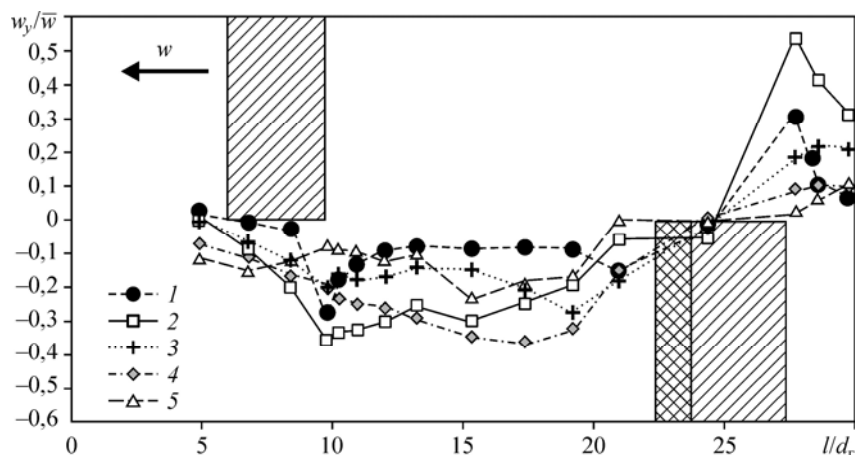


Рис. 13. Распределение осредненной поперечной скорости  $w_y/\bar{w}$  в среднем фрагменте твэльного пучка ТВСА-Т.  $\bar{w} = 27,5$  м/с,  $Re = 78000$ ; межкассетное пространство (1), первый (2), второй (3), третий (4) и четвертый (5) ряды твэлов ТВСА-Т.

3. В зазорах между твэлами, прилегающими к межкассетному пространству, отмечено следующее.

а) Наибольшая величина поперечной скорости наблюдается при обтекании потоком КДР, расположенной в среднем фрагменте твэльного пучка. Поперечная скорость в смежных кассетах имеет близкие значения и составляет  $w_y/\bar{w} = 0,55$  в ТВСА-Т и  $w_y/\bar{w} = 0,5$  в ТВСА-Т.mod.2 (рис. 13, 14).

б) При обтекании потоком ДР, расположенной в среднем фрагменте твэльного пучка, значение поперечной скорости в ТВСА-Т составило  $w_y/\bar{w} = 0,35$ , а в ТВСА-Т.mod.2 —  $w_y/\bar{w} = 0,5$  (рис. 13, 14).

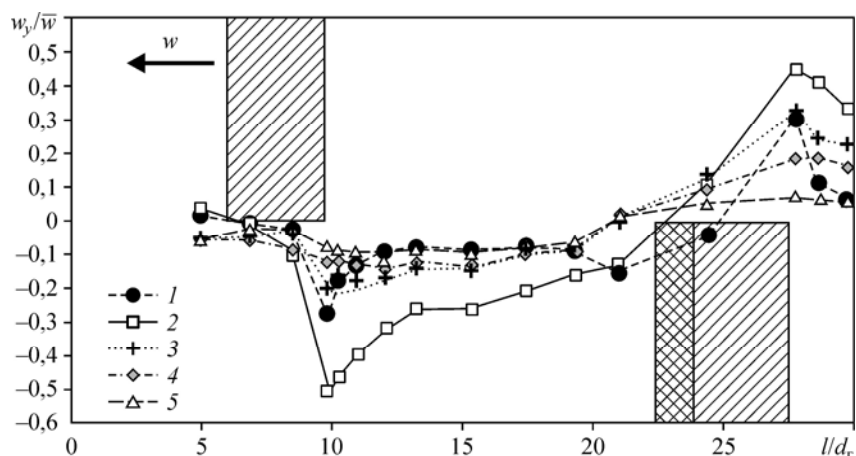


Рис. 14. Распределение осредненной поперечной скорости  $w_y/\bar{w}$  в среднем фрагменте твэльного пучка и ТВСА-Т.mod.2.  $\bar{w} = 27,5$  м/с,  $Re = 78000$ ; межкассетное пространство (1), первый (2), второй (3), третий (4) и четвертый (5) ряды твэлов ТВСА-Т.mod.2.

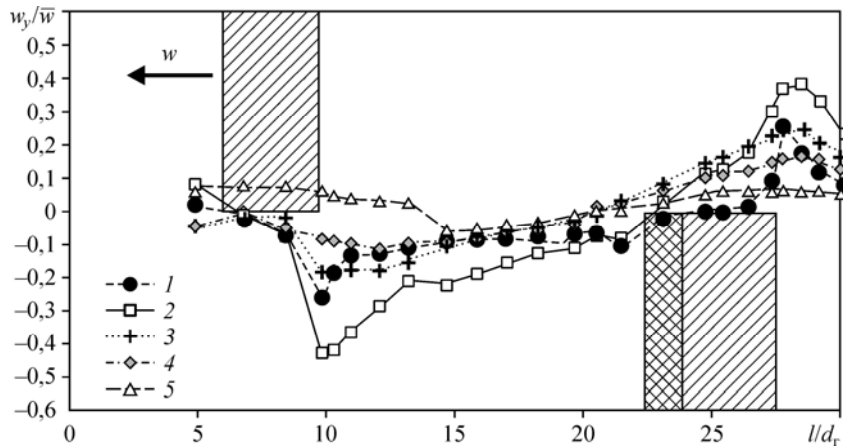


Рис. 15. Распределение осредненной поперечной скорости  $w_y / \bar{w}$  в нижнем фрагменте твэльного пучка и ТВСА-Т.mod.2.  
 $\bar{w} = 27,5$  м/с,  $Re = 78000$ ; обозначения см. на рис. 14.

в) При обтекании потоком КДР и ДР, расположенных в нижнем фрагменте твэльного пучка, для обеих сборок ТВСА значение поперечной скорости одинаково и составляет  $w_y / \bar{w} = 0,4$  (см. рис. 15, 16).

4. Распространение гидродинамических возмущений теплоносителя в поперечном сечении топливных сборок, вызванных обтеканием потоком ДР и КДР, происходит следующим образом.

а) В среднем фрагменте твэльного пучка глубина распространения возмущений потока в поперечном сечении смежных топливных сборок одинакова и ограничивается четырьмя рядами твэлов. Начиная с пятого ряда твэлов наблюдается турбулентное движение теплоносителя, при котором поперечная скорость имеет значение  $w_y / \bar{w} \approx (0,1 \div 0,05)$ .

б) В нижнем фрагменте твэльного пучка распространение возмущений потока в поперечном сечении ТВСА ограничивается тремя рядами твэлов. Начиная с четвертого

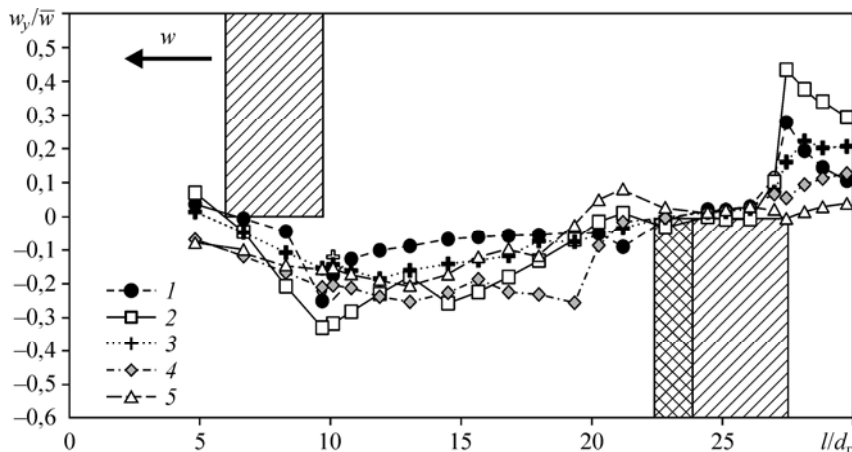


Рис. 16. Распределение осредненной поперечной скорости  $w_y / \bar{w}$  в нижнем фрагменте твэльного пучка ТВСА-Т.  
 $\bar{w} = 27,5$  м/с,  $Re = 78000$ ; обозначения см. на рис. 13.

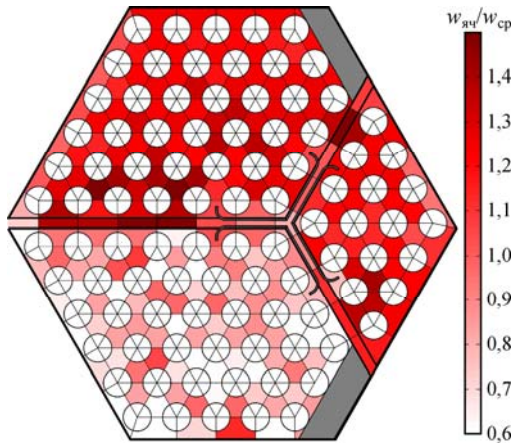


Рис. 17. Картограмма распределения осевой скорости по ячейкам ЭМ среднего фрагмента твэльного пучка ТВСА-Т и ТВСА-Т.mod.2 в сечении  $l/d = 20,95$ .  
 $\bar{w} = 27,5$  м/с,  $Re = 78000$ .

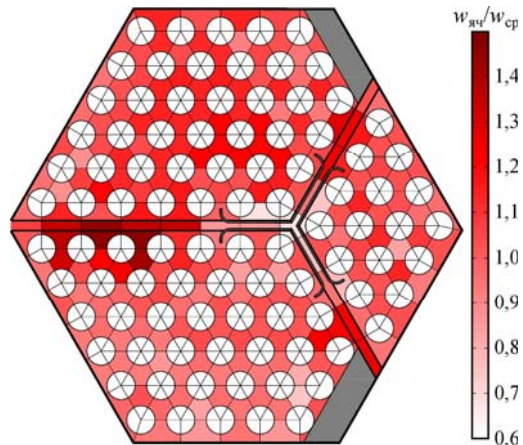


Рис. 18. Картограмма распределения осевой скорости по ячейкам ЭМ среднего фрагмента твэльного пучка ТВСА-Т и ТВСА-Т.mod.2 в сечении  $l/d = 9,81$ .  
 $\bar{w} = 27,5$  м/с,  $Re = 78000$ .

ряда твэлов наблюдается турбулентное движение теплоносителя, при котором поперечная скорость имеет значение  $w_y / \bar{w} \approx (0,1 \div 0,05)$ .

5. На любом из фрагментов твэльного пучка по мере приближения к поясам КДР и ДР наблюдается интенсивное перераспределение осевого потока теплоносителя в области трех рядов твэлов, расположенных около межкассетного пространства. Такое перераспределение теплоносителя вызвано воздействием поперечного потока, который формируется в процессе обтекания решеток с различным гидравлическим сопротивлением (рис. 17–20). Минимальное значение аксиальной скорости  $w_y / \bar{w} = 0,7$  наблюдается между уголками жесткости ТВСА (рис. 17–20).

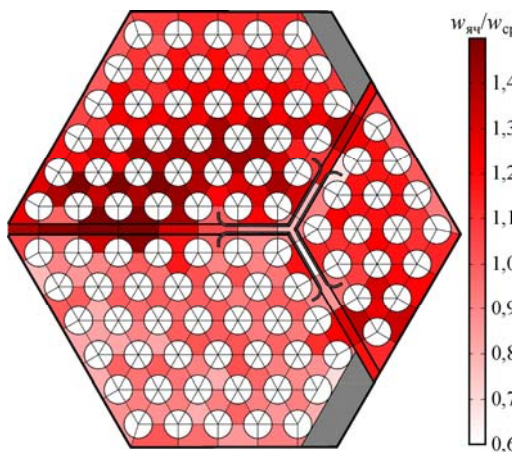


Рис. 19. Картограмма распределения осевой скорости по ячейкам ЭМ нижнего фрагмента твэльного пучка ТВСА-Т и ТВСА-Т.mod.2 в сечении  $l/d = 15,84$ .  
 $\bar{w} = 27,5$  м/с,  $Re = 78000$ .

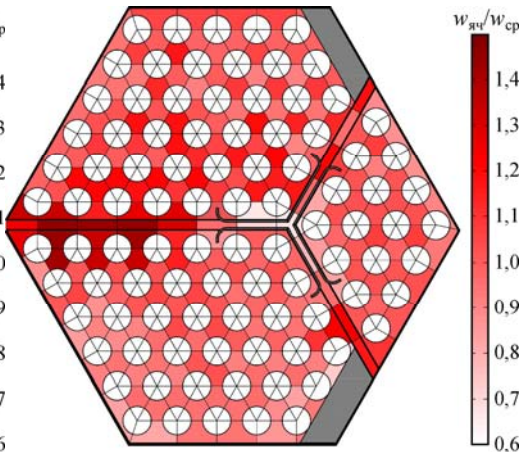


Рис. 20. Картограмма распределения осевой скорости по ячейкам ЭМ нижнего фрагмента твэльного пучка ТВСА-Т и ТВСА-Т.mod.2 в сечении  $l/d = 9,81$ .  
 $\bar{w} = 27,5$  м/с,  $Re = 78000$ .

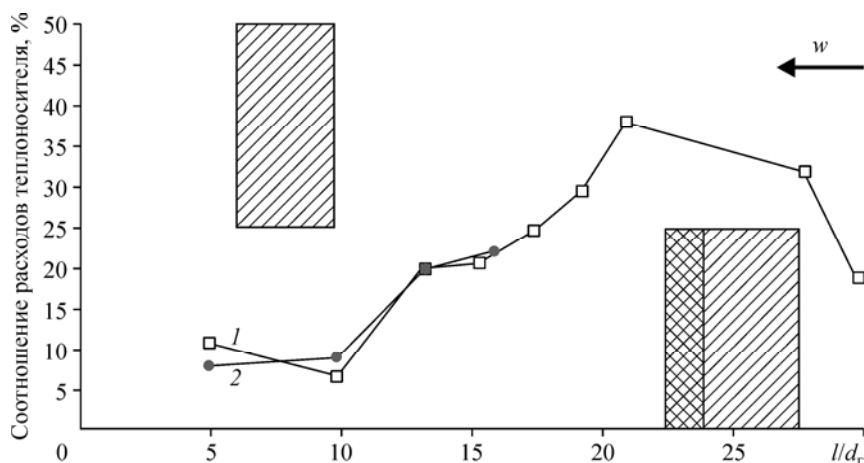


Рис. 21. Соотношение расходов теплоносителя между ТВСА-Т и ТВСА-Т.mod.2.  
 $\bar{w} = 27,5$  м/с,  $Re = 78000$ ; средний (1) и нижний (2) фрагменты твэльного пучка.

6. Максимальное значение аксиальной скорости потока на исследуемых фрагментах твэльного пучка реализуется в области трех рядов твэлов, расположенных около межкассетного пространства, в момент обтекания потоком поясов КДР и ДР и составляет  $w_y / \bar{w} \approx 1,45$  (рис. 17–20).

7. Вследствие наличия гидравлически неидентичных КДР и ДР распределение расхода теплоносителя между соседними топливными кассетами приобретает сильную неравномерность. Максимальное различие расхода теплоносителя между смежными кассетами наблюдается на среднем фрагменте твэльного пучка активной зоны непосредственно за КДР и составляет 38 % (рис. 21).

8. Выравнивание расхода теплоносителя между смежными топливными кассетами наблюдается непосредственно перед ДР. Здесь различие расхода теплоносителя между кассетами составляет не более 10 % (рис. 21).

### Сравнительный анализ распределения поперечной скорости потока теплоносителя в среднем и нижнем фрагментах твэльного пучка активной зоны реактора ВВЭР с ТВСА-Т.mod.2 и ТВСА-Т

Сравнительный анализ распределения поперечной скорости потока  $w_y / \bar{w}$  проводился в характерной области, которая включает в себя совмещенные средний и нижний фрагменты твэльного пучка активной зоны реактора ВВЭР с ТВСА-Т.mod.2 и ТВСА-Т. Этот анализ показал следующее.

1. В области межкассетного пространства значения поперечной скорости при обтекании потоком КДР и ДР на среднем фрагменте твэльного пучка на 20 % выше, чем на нижнем фрагменте (рис. 22).

2. Наибольшее значение поперечной скорости достигается в процессе обтекания потоком пояса КДР. Значения поперечной скорости на среднем фрагменте твэльного пучка на (25 ÷ 30) % выше, чем на нижнем фрагменте (рис. 23, 24).

3. Оценка глубины распространения возмущений потока в соседних кассетах ТВСА позволила заключить, что при обтекании теплоносителем поясов КДР и ДР глубина распространения возмущений потока в среднем фрагменте твэльного пучка ограничивается четвертым рядом твэлов, а в нижнем фрагменте — третьим (рис. 22–24). Такое различие по глубине распространения возмущений теплоносителя в смежные топливные сборки можно объяснить наличием на среднем участке твэльного пучка ТВСА-Т

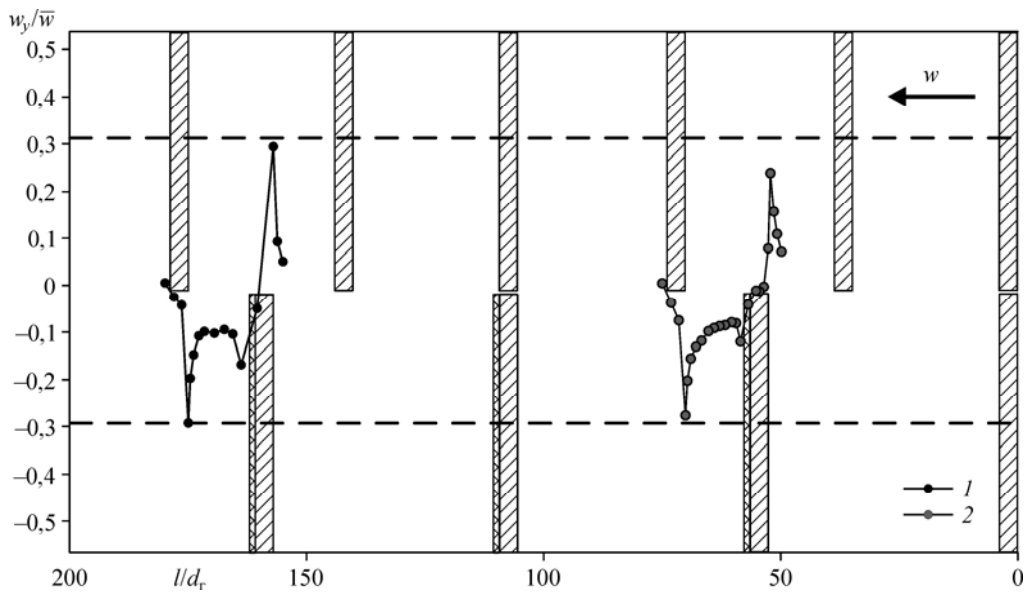


Рис. 22. Распределение поперечной скорости  $w_y/\bar{w}$  в твэльном пучке ТВСА-Т и ТВСА-Т.mod.2.  $\bar{w} = 27,5$  м/с,  $Re = 78000$ ; межкассетное пространство: средний (1) и нижний (2) фрагменты твэльного пучка.

еще одного пояса КДР, который придает дополнительную неравномерность осевому движению потока.

4. В процессе обтекания теплоносителем гидравлически неидентичных КДР и ДР наблюдается эффект накопления возмущений потока: поперечная скорость  $w_y/\bar{w}$  при обтекании решеток в среднем фрагменте твэльного пучка выше, чем при обтекании решеток в нижнем фрагменте.

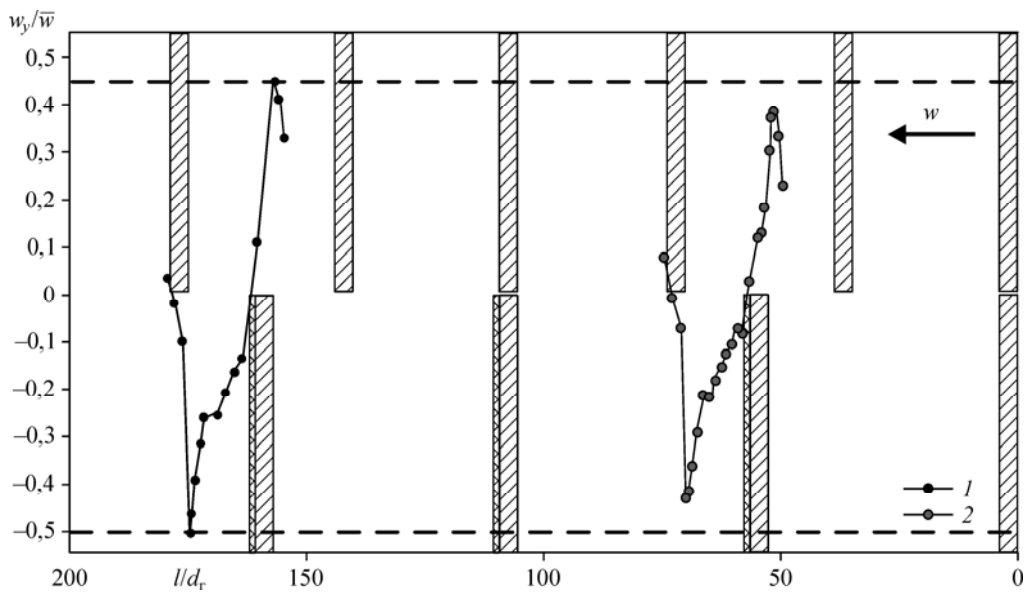


Рис. 23. Распределение поперечной скорости  $w_y/\bar{w}$  в твэльном пучке ТВСА-Т и ТВСА-Т.mod.2.

$\bar{w} = 27,5$  м/с,  $Re = 78000$ ; первый ряд твэлов ТВСА-Т.mod.2: средний (1) и нижний (2) фрагменты твэльного пучка.

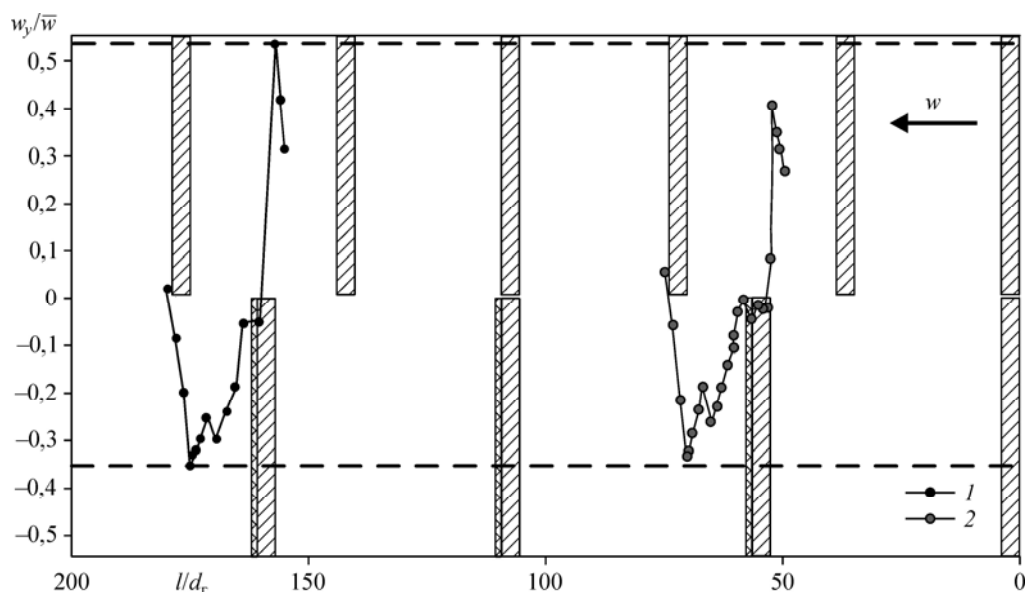


Рис. 24. Распределение поперечной скорости  $w_y / \bar{w}$  в твэльном пучке ТВСА-Т и ТВСА-Т.mod.2.

$\bar{w} = 27,5$  м/с,  $Re = 78000$ ; первый ряд твэлов ТВСА-Т:  
средний (1) и нижний (2) фрагменты твэльного пучка.

### Заключение

Проведен комплексный анализ результатов исследований межкассетного взаимодействия потоков теплоносителя в активной зоне реактора ВВЭР с ТВСА-Т.mod.2 и ТВСА-Т, на основании которого сделан ряд выводов.

1. В однородной активной зоне реактора ВВЭР, состоящей только из кассет ТВСА-Т.mod.2, наблюдается низкая интенсивность межкассетного взаимодействия теплоносителя. На движение потока в области ряда твэлов, прилежащих к межкассетному пространству, значительное влияние оказывает взаимное расположение дефлекторов и зубчатого края обода перемешивающей решетки.

2. На движение теплоносителя в твэльном пучке активной зоны реактора ВВЭР, состоящей из кассет ТВСА-Т и ТВСА-Т.mod.2, оказывают влияние поперечные потоки, сформированные при обтекании гидравлически неидентичных комбинированных дистанционирующих и дистанционирующих решеток.

3. В области межкассетного пространства активной зоны реактора ВВЭР, состоящей из кассет ТВСА-Т и ТВСА-Т.mod.2, величина поперечной скорости при обтекании потоком комбинированной дистанционирующей и дистанционирующей решеток на различных фрагментах твэльного пучка соответствующих кассет является одинаковой.

4. Максимальная величина поперечной скорости наблюдается при обтекании потоком комбинированной дистанционирующей решетки, расположенной в среднем фрагменте твэльного пучка активной зоны.

5. Глубина распространения возмущений теплоносителя в поперечном сечении кассет для среднего фрагмента твэльного пучка ограничивается четырьмя рядами твэлов, а для нижнего фрагмента — тремя рядами твэлов.

6. На любом из исследуемых фрагментов твэльного пучка по мере приближения к поясам комбинированной дистанционирующей и дистанционирующей решеток наблюдается интенсивное перераспределение осевого потока теплоносителя в области трех рядов твэлов, расположенных около межкассетного пространства.

7. Выравнивание расхода теплоносителя между соседними кассетами ТВСА в среднем и нижнем фрагментах твэльного пучка наблюдается непосредственно за дистанционирующей решеткой.

8. В процессе обтекания теплоносителем гидравлически неидентичных комбинированной дистанционирующей и дистанционирующей решеток наблюдается эффект накопления возмущений потока.

### Список литературы

1. **Дмитриев С.М., Бых О.А., Панов Ю.К., Сорокин Н.М., Зверев Д.Л., Фарафонов В.А.** Основное оборудование АЭС с корпусными реакторами на тепловых нейтронах. М.: Машиностроение, 2013. 415 с.
2. **Волков С.Е., Кашинский О.Н., Курдюмов А.С., Лобанов П.Д., Прибатурин Н.А.** Экспериментальное исследование влияния дистанционирующей решетки на структуру течения в ТВС реактора АЭС-2006 // Теплоэнергетика. 2013. № 1. С. 63–67.
3. **Безруков Ю.А., Волков С.Е., Главный В.Г., Лисенков Е.А., Лобачев С.М., Прибатурин Н.А., Селезнев А.В.** Исследование перемешивания теплоносителя в тепловыделяющей сборке реактора ВВЭР-1000 // Тяжелое машиностроение. 2012. № 9. С. 6–14.
4. **Дмитриев С.М., Баринев А.А., Самойлов О.Б., Хробостов А.Е.** Методы обоснования теплотехнической надежности активной зоны тепловых водо-водяных реакторов // Атомная энергия. 2016. Т. 120, вып. 5. С. 270–275.
5. **Дмитриев С.М., Варенцов А.В., Добров А.А., Доронков Д.В., Самойлов О.Б., Сорокин В.Д., Хробостов А.Е.** Расчетно-экспериментальные исследования локальной гидродинамики и массообмена потока теплоносителя в ТВС-Квадрат реакторов PWR с перемешивающими решетками // Теплоэнергетика. 2014. № 8. С. 20–27.
6. **Дмитриев С.М., Добров А.А., Легчанов М.А., Хробостов А.Е.** Применение многоканального пневмометрического зонда для исследования профиля скорости теплоносителя в моделях топливных кассет ядерных реакторов // Приборы и методы измерений. 2015 Т. 6, вып. 2. С. 188–195.
7. **Жуков А.В., Сорокин А.П., Матюхин Н.М.** Межканальный обмен в ТВС быстрых реакторов. Теоретические основы и физика процесса. М.: Энергоатомиздат, 1989. 184 с.
8. **Гухман А.А.** Введение в теорию подобия. М.: Высшая школа, 1973. 296 с.

*Статья поступила в редакцию 3 апреля 2019 г.,  
после доработки — 16 апреля 2019 г.,  
принята к публикации 4 июня 2019 г.*