

УДК 621.311.25:621.039

**Экспериментальное исследование
влияния дистанционирующей решетки
на распределение напряжения трения
в моделях тепловыделяющих сборок**

**Н.А. Прибатурин^{1,2}, П.Д. Лобанов², В.В. Рандин², О.Н. Кашинский²,
А.С. Курдюмов², М.А. Воробьев², С.М. Волков²**

¹*Новосибирский филиал Института проблем
безопасного развития атомной энергетики РАН, Новосибирск*

²*Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск*

E-mail: nialp@mail.ru, lobanov@itp.nsc.ru

Для оценки влияния дистанционирующей решетки на возмущение течения жидкости проведены измерения напряжения трения на поверхности вертикального стержня — имитатора твэла — в семи-стержневых моделях тепловыделяющих сборок, различающихся размерами дистанционирующих решеток, диаметром стержней — имитаторов твэла, относительным расстоянием между ними. Приведены данные по осевому и аксиальному распределениям напряжения трения. Показано возрастание осредненного и пульсационного напряжений трения на стенке непосредственно за решеткой вследствие возмущения потока жидкости и угасание этого эффекта вдали от решетки. Результаты работы могут быть использованы для верификации расчетных кодов, используемых при гидродинамических расчетах реакторных установок.

Ключевые слова: эксперимент, тепловыделяющая сборка, твэл, трение, дистанционирующая решетка.

Введение

Для позиционирования твэлов в тепловыделяющих сборках (ТВС) применяются дистанционирующие решетки (ДР), дистанционирующие перемешивающие решетки, проволочная навивка. Эти элементы вносят возмущение в течение теплоносителя через ТВС. Исследование влияния такого возмущения на течение важно с точки зрения определения оптимальных параметров течения жидкости и, в частности, гидравлического сопротивления ТВС. При выполнении анализа имеющихся данных был использован ряд источников, наиболее известные из которых приведены в списке литературы [1–5]. Так, ранние работы по измерению параметров течения в ТВС с ДР были посвящены исследованию коэффициента гидравлического сопротивления (КГС) дистанционирующих решеток. С развитием методов локальных измерений появилась возможность получения информации о турбулентных характеристиках потока, теплообмене, межканальном перемешивании потока жидкости в ТВС. Выполненные в последнее время в мировой практике работы посвящены влиянию турбулизирующих элементов — дефлекторов на параметры течения теплоносителя [6–8]. В работе [9] было выполнено комплексное

экспериментальное исследование течения жидкости в 37-стержневой модели ТВС водяного энергетического реактора (ВВЭР) с решетками разного типа и конструкции. В работе [10] приводились результаты измерений профилей осевого распределения скорости жидкости в межстеблевых каналах модели тепловыделяющей сборки с дистанционирующей решеткой. В работе [11] были представлены первичные экспериментальные данные по осевому и аксиальному распределениям касательного напряжения трения на поверхности стержня — имитатора твэла при течении жидкости в ТВС в отсутствие дистанционирующих решеток.

Цель настоящей работы — экспериментальное исследование влияния толщины материала дистанционирующей решетки, шага расположения стержней — имитаторов твэлов, режима течения жидкости на распределение напряжения трения по периметру имитатора твэла в модели ТВС с гексагональной упаковкой стержней.

Экспериментальный стенд и метод измерения

Принципиальная схема работы стенда приведена на рис. 1а. Жидкость из бака 2 подается циркуляционным насосом 1 на вход вертикально расположенного рабочего

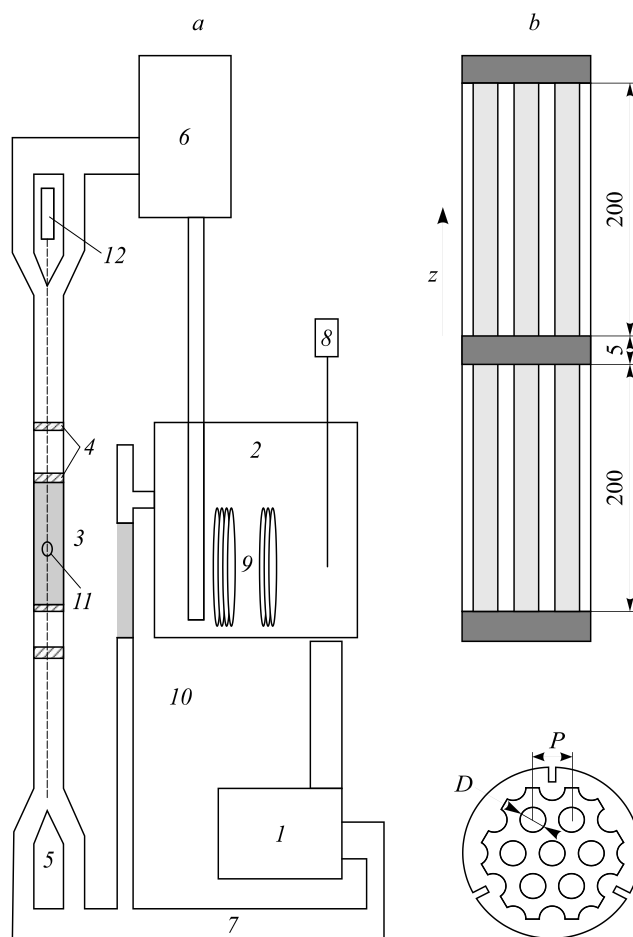


Рис. 1. Схемы экспериментальной установки модели ТВС (а), рабочего участка и его поперечного сечения (б).

1 — насос, 2 — основной бак, 3 — рабочий участок, 4 — дистанционирующие решетки, 5 — подводящие соединения, 6 — бак-сепаратор, 7 — расходомерная диафрагма, 8 — терморегулятор, 9 — теплообменники, 10 — калибровочный канал, 11 — измерительная секция, 12 — автоматическая система позиционирования; размеры приведены в мм.

участка, в который устанавливалась модель ТВС. На подводящем трубопроводе размещены регулирующие вентили, расходомерная диафрагма 7. Через входной коллектор 5, в котором установлена система выравнивающих решеток, жидкость поступает в рабочий участок 3, состоящий из непрозрачных секций и прозрачной вставки. Входной коллектор выполнен из прозрачных материалов для возможности изучения потока непосредственно на входе в рабочий участок установки. Далее через выходной коллектор и отводной трубопровод жидкость поступает в бак-сепаратор 6 и затем в основной бак 2. Контроль температуры осуществлялся с помощью резистивного термометра 8, установленного во входном коллекторе. Центральный (измерительный) твэл выводился через штуцер в верхней части выходного коллектора для подключения измерительной аппаратуры. Температура жидкости в контуре поддерживалась с помощью автоматической системы термостабилизации за счет прокачки охлаждающей воды через теплообменник 9. Управление теплообменником осуществлялось с помощью измерителя-регулятора температуры ТРМ-2М. Температура жидкости в баке поддерживалась постоянной в пределах $25 \pm 0,1$ °С. Расход жидкости регулировался изменением оборотов центробежного насоса 1 с помощью частотного регулятора. Стенд позволяет проводить исследования гидродинамических параметров течения с расходом водяного теплоносителя до $0,016 \text{ м}^3/\text{сек}$.

Рабочий участок представляет собой 7-стержневую модель ТВС, в которой для позиционирования стержней используются дистанционирующие решетки. Модель ТВС имеет гексагональную упаковку стержней, при которой они размещаются в углах правильного шестигранника (см. рис. 1*b*). Перед рабочими участками располагалась зона стабилизации течения жидкости, для чего в канале устанавливались выравнивающие решетки. Дистанционирующие решетки были изготовлены из цельного материала методом прототипирования с использованием гидроабразивной резки. Общий вид решетки показан на рис. 2*a*. Высота дистанционирующей решетки — 5 мм, толщина материала решетки составляла 0,4 и 0,6 мм. Измерения параметров течения теплоносителя проводились при различных относительных расстояниях между стержнями S , равных 1,2, 1,3, 1,4, 1,45, и диаметре стержней $D = 9, 10$ мм. Схемы проходного сечения экспериментальных моделей с различным шагом между стержнями приведены на рис. 2.

Измерения касательного напряжения трения на стенке выполнялись электродиффузионным методом [12]. Для этого в стенку центрального имитатора твэла был зашлифован датчик касательных напряжений. В качестве рабочей жидкости использовался электролит — водный раствор ферри- и ферроцианида калия ($\text{K}_3\text{Fe}(\text{CN})_6$ и карбоната натрия (Na_2CO_3).

Напряжение трения измерялось на поверхности центрального стержня по его периметру и высоте. Для выполнения таких измерений было предусмотрено, чтобы центральный стержень мог вращаться вокруг своей оси и перемещаться по высоте. Угловая координата точки измерения изменялась в пределах 0° – 360° (полный круг). Шаг изменения азимутальной координаты составлял 10° . Перемещение датчика трения осуществлялось с помощью автоматизированной системы позиционирования центрального стержня,

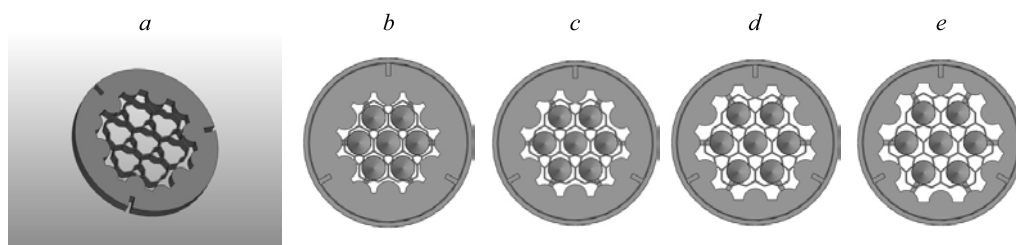


Рис. 2. Общий вид решетки (а) и проходного сечения канала ТВС с ДР с относительным расстоянием между центрами ячеек — 1,2 (b), 1,3 (c), 1,4 (d), 1,45 (e).

основанной на использовании программируемых контроллеров, шаговых двигателей и управляющих блоков, подключенных к последовательному порту компьютера. Начальное положение датчика по углу устанавливалось с помощью угломера с погрешностью $\pm 1^\circ$. Позиция датчика по вертикали устанавливалась с помощью лазерного дальномера с точностью $\pm 0,5$ мм. Расстояние от дистанционирующей решётки z при проведении экспериментов изменялось ступенчато и составляло 0, 5, 10, 15, 20, 30, 40, 50, 60, 80, 100, 120, 160 мм. Число Рейнольдса при проведении измерений определялось установкой требуемого режима течения жидкости и составляло 500, 2500, 5000 и 10000, что соответствовало ламинарному, переходному и турбулентным режимам течения жидкости в модели ТВС.

Измерения проводились за дистанционирующей решёткой, расположенной в центральной части модели ТВС. Для фиксации стержней были использованы две дополнительные решетки, расположенные на расстоянии 200 мм вверх и вниз по потоку жидкости от исследуемой дистанционирующей решетки. На входе в рабочий участок располагался хонейкомб. Как показали проведенные ранее измерения [11], подобной конфигурации достаточно для установления потока жидкости на входе в сборку вертикальных стержней.

Результаты экспериментов

На рис. 3 и 4 приведены типичные данные по изменению азимутальных распределений относительных напряжения трения и пульсаций напряжения трения по периметру имитатора твэла в зависимости от расстояния после дистанционирующей решетки. Здесь и далее для обезразмеривания измеренного в каждой точке по азимутальному углу напряжения трения τ использовалось осредненное по азимутальному углу значение напряжения трения на поверхности стержня вдали от дистанционирующей решетки τ_∞ , там где ее влияние пропадает. Пульсации напряжения трения относились к среднему трению в той же точке.

Как видно из рис. 3, сразу за решеткой наблюдается существенная неравномерность значений напряжения трения на поверхности имитатора твэла. Это вызвано влиянием дистанционирующей решетки на течение. На выходе потока жидкости из решетки присутствуют шесть максимумов значения напряжения трения, разделенных на две группы по интенсивности. Их азимутальное расположение хорошо коррелирует с особенностями геометрии дистанционирующих решеток. Жидкость ускоряется в области сопряжения ДР со стержнями, что приводит к образованию струй жидкости на выходе из каналов ДР. Выше решетки по высоте ТВС постепенно происходит стабилизация течения и азимутальная неравномерность в распределении трения уменьшается.

Для переходного режима течения с $Re = 2500$ была отмечена более значительная неравномерность азимутального распределения напряжения трения. Обнаружено, что увеличение расстояния от дистанционирующей решетки в целом не приводит к снижению степени неравномерности. Видимо, это связано с неустойчивостью течения жидкости при таком числе Рейнольдса и его близости к значению критической величины перехода к турбулентному течению.

Для турбулентного режима течения с числами $Re = 5000$ и 10000 вблизи ДР также наблюдалась высокая степень неравномерности азимутального распределения напряжения трения, подтверждающая перестройку течения жидкости сразу за ДР. С удалением от решетки происходит снижение азимутальной неравномерности распределения касательных напряжений и среднего значения трения вплоть до некоторого расстояния, при котором это распределение становится однородным по периметру имитатора твэла. Данное расстояние можно считать длиной, на которую распространяется возмущение, вносимое дистанционирующей решеткой в поток жидкости.

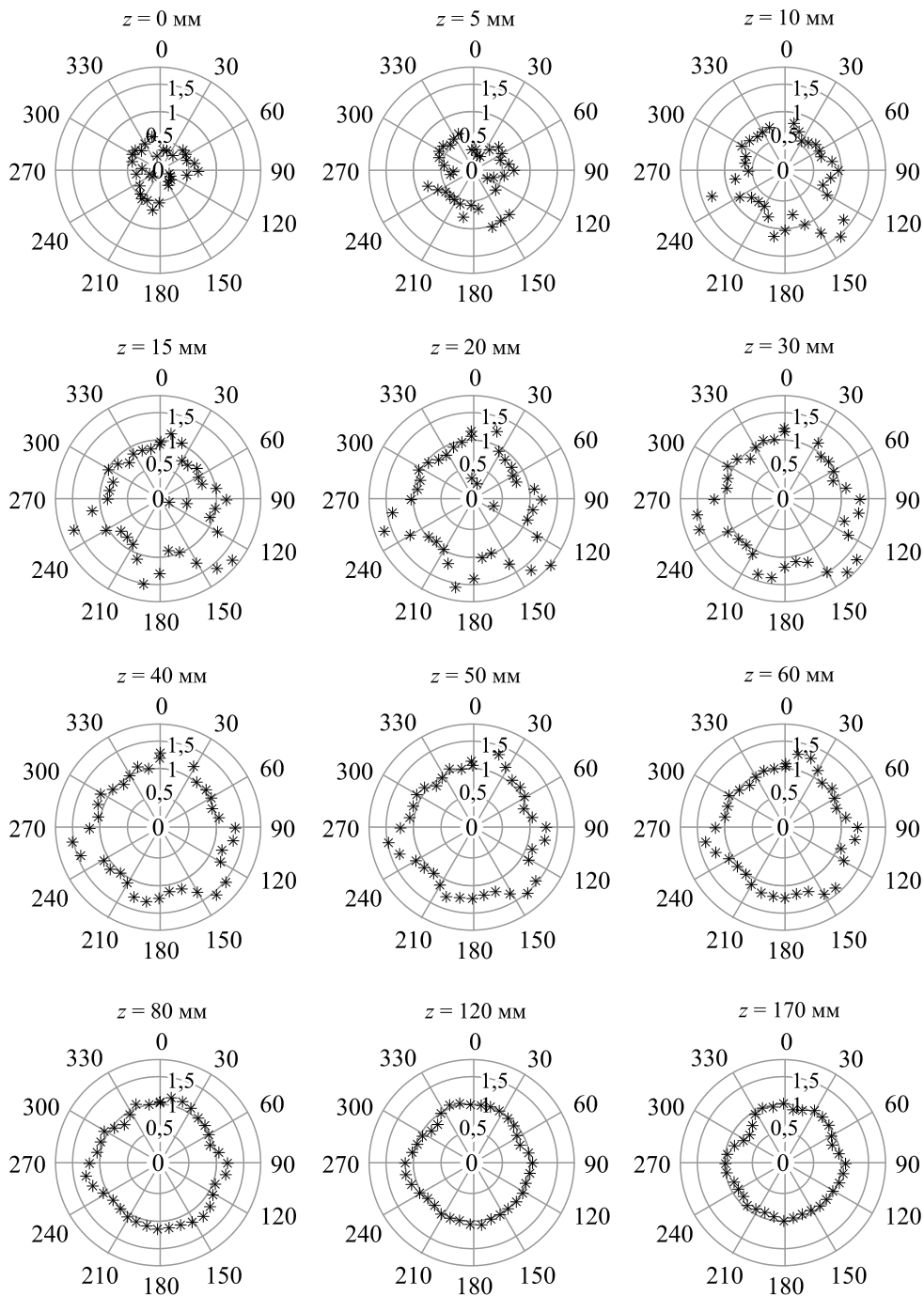


Рис. 3. Азимутальные распределения относительного напряжения трения на стенке за дистанционирующей решёткой.

$S/D = 1,4$, $Re = 5000$, толщина материала ДР — 0,4 мм.

Пульсационные значения характеризуются резким ростом в области за решёткой и постепенным снижением до значений $0,05 \div 0,1$ для $Re = 2500$ и $0,15 \div 0,2$ для $Re = 5000 \div 10000$. Для $Re = 500$ относительные пульсации трения не превышают нескольких сотых долей. Для $Re = 2500$, как и для касательных напряжений, для пульсационных значений наблюдается азимутальная неравномерность даже на больших расстояниях от решётки.

При больших числах Рейнольдса, соответствующих турбулентному режиму течения, этого не наблюдается: пульсации трения снижаются за ДР, постепенно происходит стабилизация течения.

На рис. 5 приведены результаты статистической обработки данных, представленных на рис. 3 и 4, показывающие изменение относительных осредненных по углу значений

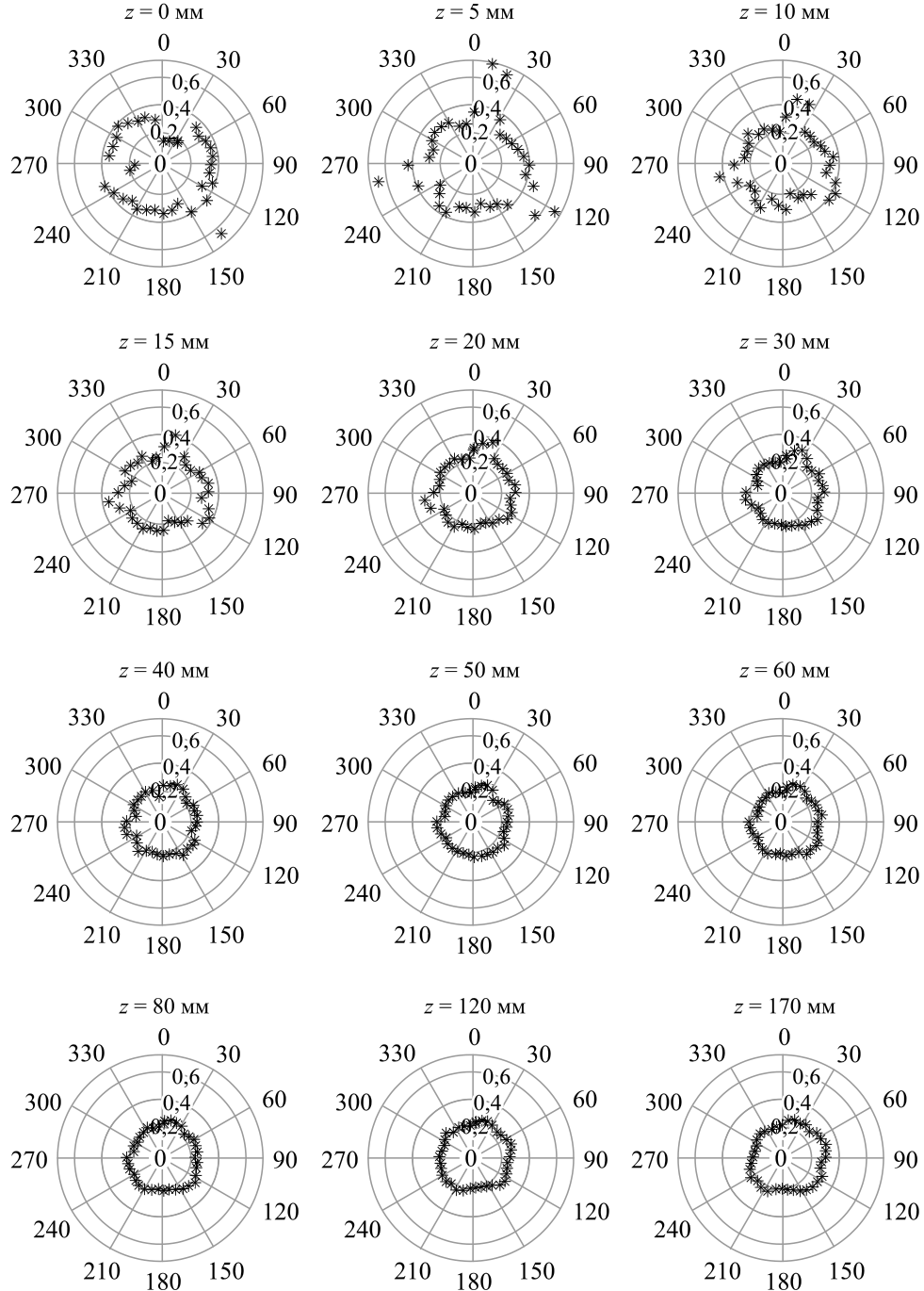


Рис. 4. Азимутальные распределения пульсаций напряжения трения на стенке за дистанционирующей решёткой.

$S/D = 1,4$, $Re = 5000$, толщина материала ДР — 0,4 мм.

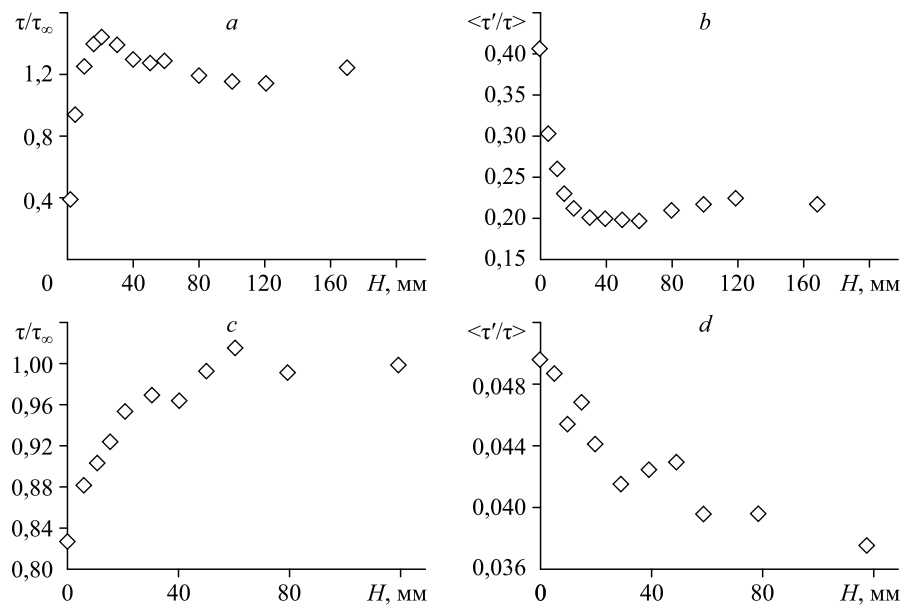


Рис. 5. Зависимость осредненного по азимутальному углу напряжения трения (a, c) и пульсаций напряжения трения (b, d) за дистанционирующей решёткой.
 $S/D = 1,4$, $Re = 5000$ (a, b), 500 (c, d).

трения и пульсаций трения в зависимости от расстояния после дистанционирующей решетки. Как видно, область расстояний, на которых максимально проявляется возмущающее действие ДР, ограничивается диапазоном 30–40 мм.

С целью определения влияния относительного шага расположения стержней на уровень возмущения потока жидкости за ДР были выполнены измерения осредненных и пульсационных значений напряжения трения для более «плотного» расположения стержней в сборке с относительным расстоянием между ними 1,2 и 1,3, а также для шага 1,45, при котором каналы для течения жидкости имеют большее проходное сечение, чем для шага 1,4 (см. рис. 2). Измерения показали, что при изменении относительного расстояния между стержнями существенных особенностей в изменении поведений азимутального распределения среднего и пульсационного значений напряжения трения за ДР не происходит. Для более плотных упаковок стержней затухание пульсаций происходит на меньшем расстоянии от ДР. Увеличение шага стержней приводит к более равномерному азимутальному распределению среднего значения трения.

На рис. 6 показано распределение относительного напряжения трения на поверхности имитатора твэла τ к трению в невозмущенном потоке τ_∞ при разных режимах течения. Интенсивность напряжения трения выделена цветовой градацией. Наглядно видны вертикальные полосы, определяющие разные значения напряжения трения по периметру стержня, которые соответствуют особенностям формирования течения за дистанционирующей решеткой в виде струй жидкости.

На рис. 7 и 8 приведены данные среднеквадратичного отклонения напряжения трения от его среднего значения по аксиальному углу в зависимости от расстояния после ДР, относительного шага расположения стержней и режима течения. Как видно, сразу после ДР среднеквадратичное отклонение напряжения трения является максимальным, а затем его величина начинает снижаться. Область, в которой можно считать, что влияние ДР на изменение среднеквадратичного отклонения напряжения трения нивелируется, начинается на расстояниях 50–80 мм после ДР и слабо меняется при изменении шага расположения стержней и режима течения жидкости.

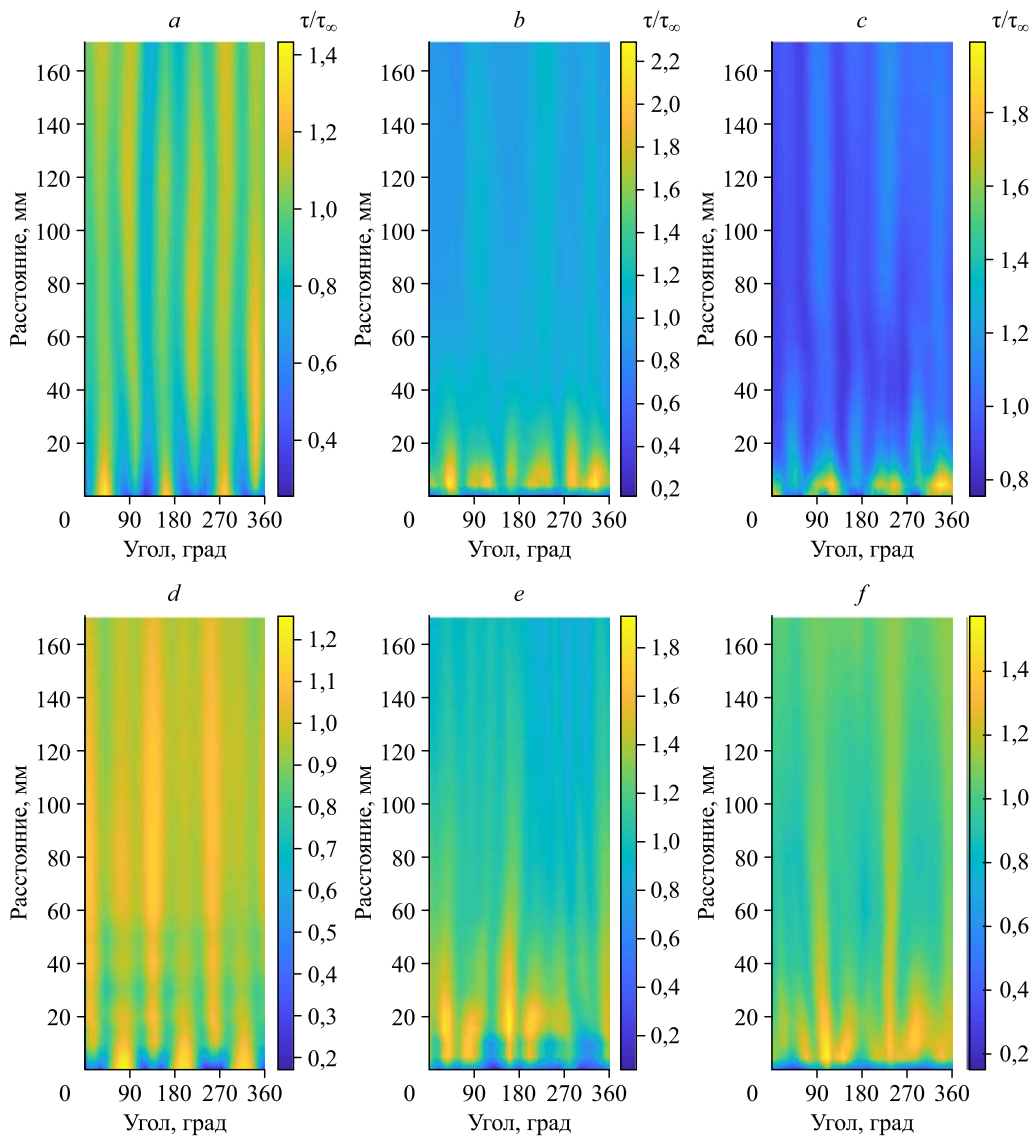


Рис. 6. Распределение касательных напряжений за дистанционирующей решеткой толщиной 0,6 мм. $S/D = 1,2$ (a–c), $1,4$ (d–f); $Re = 500$ (a, d), 5000 (b, e), 10000 (c, f); на шкалах показана безразмерная величина относительного трения.

На рис. 9 приведены данные по неравномерности распределения касательного напряжения по периметру имитатора твэла в зависимости от расстояния после решетки. За неравномерность распределения касательного напряжения приняты максимальное и минимальное значения напряжения трения по периметру стержня, отнесенные к значению напряжения трения на поверхности стержня вдали от дистанционирующей решетки τ_{∞} . Эти величины вычислялись как среднее значение по шести максимальным и минимальным значениям распределения трения по аксиальному углу вокруг стержня, соответствующим областям формирования струй жидкости на выходе из решетки. Как следует из графиков, неравномерность распределения касательного напряжения является максимальной в области 5–20 мм от решетки, здесь влияние ДР проявляется наиболее сильно.

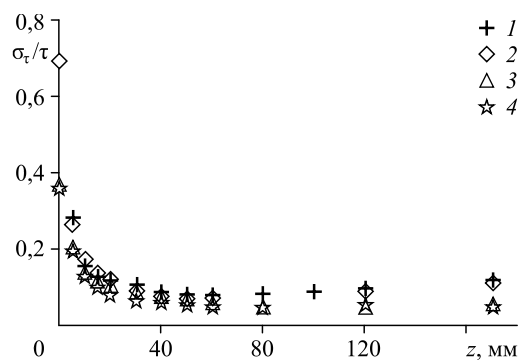


Рис. 7. Зависимость среднеквадратичного по азимутальному углу значения напряжения трения от расстояния после ДР. Диаметр стержней 9 мм; относительный шаг стержней: 1,2 (1), 1,3 (2), 1,4 (3), 1,45 (4); $Re = 500$.

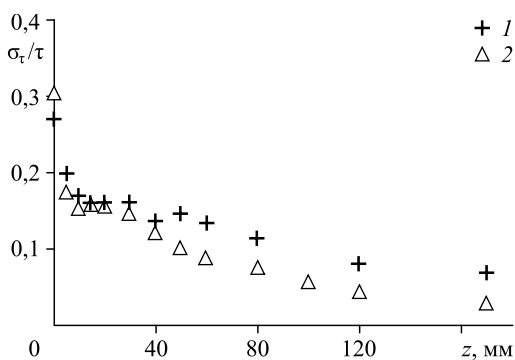


Рис. 8. Зависимость среднеквадратичного по азимутальному углу значения напряжения трения от расстояния после ДР. Диаметр стержней 9 мм; относительный шаг стержней: 1,2 (1), 1,4 (2); $Re = 10000$.

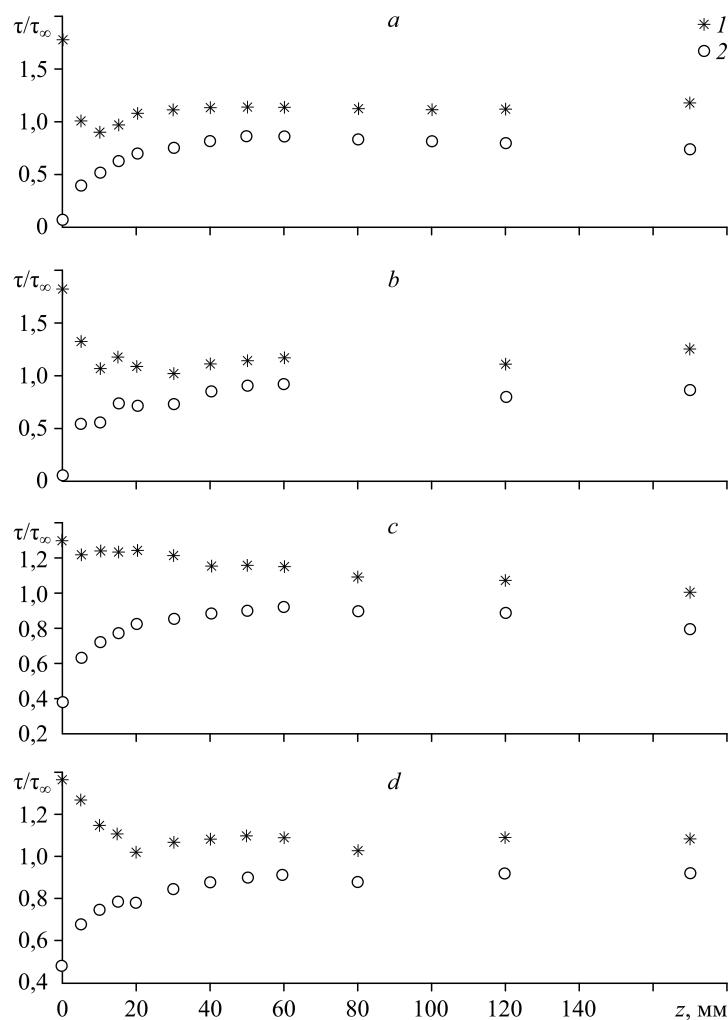


Рис. 9. Влияние ДР на неравномерность касательного напряжения по периметру. $Re = 500$, $d = 9$ мм, $S/D = 1,2$ (a), 1,3 (b), 1,4 (c), 1,45 (d); 1 — максимальные значения, 2 — минимальные значения.

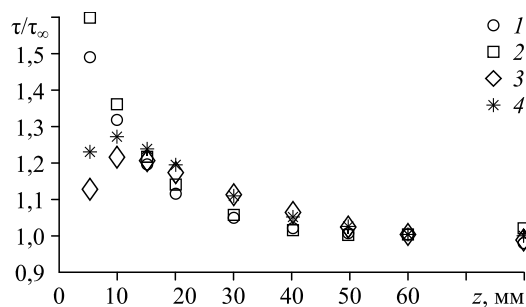


Рис. 10. Влияние шага и толщины материала решетки на зависимость напряжения трения от расстояния после ДР.

Re = 10000; шаг решетки и толщина: 1 — 1,2 и 0,4 мм, 2 — 1,2 и 0,6 мм, 3 — 1,4 и 0,4 мм, 4 — 1,4 и 0,6.

На расстоянии от ДР больше 50–60 мм и ниже по потоку жидкости максимальные и минимальные значения сближаются и стремятся к среднему по периметру стержня касательному напряжению. Чем больше относительный шаг расположения стержней, тем меньше значение касательного напряжения трения на поверхности стержня — имитатора твэла. Для турбулентного режима течения поведение максимального и минимального значений в азимутальных распределениях напряжения трения по периметру стержня аналогично. При анализе результатов измерений, полученных для разных диаметров стержней, можно сделать вывод о том, что течение хорошо масштабируется по относительному шагу расположения стержней. Для шага стержней больше 1,3 наблюдается слабая степень неравномерности потока в области течения вдали от дистанционирующей решетки.

График влияния толщины материала ДР на распределение напряжения трения приведен на рис. 10. Здесь по оси ординат отложены относительные значения напряжения трения, а по оси абсцисс — расстояния после дистанционирующей решетки. Относительное значение трения равно результату деления среднего напряжения трения по периметру стержня, соответствующего конкретной длине, на среднее напряжение трения в сборке стержней при отсутствии ДР. На графике приведены данные для толщин решеток, равных 0,4 и 0,6 мм. Измерения показали, что для более толстого материала дистанционирующей решетки наблюдается увеличение значения касательного напряжения на величину порядка 5–7 % в области течения, расположенной на расстояниях 0–20 мм от ДР. С удалением от решетки влияние толщины материала решетки нивелируется.

Выводы

Анализ результатов выполненных экспериментов по исследованию влияния дистанционирующей решетки на параметры течения жидкости указывает, что ее воздействие на течение жидкости пропадает на расстоянии больше 50–80 мм от решетки вниз по потоку. В этой области распределение напряжения трения по периметру стержня становится равномерным и соответствуют распределениям в сборке гладких стержней при отсутствии дистанционирующих решеток.

Существенная неравномерность в распределении напряжения трения по поверхности стержня непосредственно за ДР связана с плохим обтеканием элементов ячейки ДР, за которыми возникают не только интенсивные пульсации скорости жидкости, приводящие к существенным пульсациям напряжения трения на поверхности стержней, но и формирование струй жидкости на выходе из ДР, приводящие к азимутальной неоднородности распределения напряжения трения по периметру стержня — имитатора твэла.

Список литературы

1. Левченко Ю.Д., Субботин В.И., Ушаков П.А. Распределение скоростей теплоносителя и напряжения на стенке плотно упакованных стержней // Атомная энергия. 1967. Т. 22, № 3. С. 218–225.
2. Rehme K. Pressure drop performance of rod bundles in hexagonal arrangements // Int. J. Heat and Mass Transfer. 1972. Vol. 15, No. 12. P. 2499–2517.
3. Fakory M., Todreas N. Experimental investigation of flow resistance and wall shear stress in the interior sub-channel of a triangular array of parallel rods // Trans. ASME. J. Fluids Engng. 1979. Vol. 101, Iss. 4. P. 429–434.
4. Hooper J.D., Rehme K. Large-scale structural effects in developed turbulent flow through closely-spaced rod arrays // J. Fluid Mechanics. 1984. Vol. 145. P. 305–337.
5. Conner M.E., Hassan Y.A., Dominguez-Ontiveros E.E. Hydraulic benchmark data for PWR mixing vane grid // Nuclear Engineering and Design. 2013. Vol. 264. P. 97–102.
6. Фомичев Д.В., Солонин В.И. Гидравлические характеристики пучков стержней тепловыделяющих сборов реакторной установки БРЕСТ-ОД-300 // Вест. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия: Машиностроение. 2015. № 2. С. 4–17.
7. Дмитриев С.М., Добров А.А., Доронков Д.В., Пронин А.Н., Рубцова Е.В., Рязанов А.В., Солнцев Д.Н., Хробостов А.Е. Исследования гидродинамики теплоносителя в области направляющего канала тепловыделяющей сборки с решетками-интенсификаторами // Теплофизика и аэромеханика. 2020. Т. 27, № 5. С. 771–785.
8. Chang S.-K., Kim S., Song C.-H. Turbulent mixing in a rod bundle with vaned spacer grids: OECD/NEA-KAERI CFD benchmark exercise test // Nuclear Engng and Design. 2014. Vol. 279. P. 19–36.
9. Кашинский О.Н., Лобанов П.Д., Прибатурин Н.А., Курдюмов А.С., Волков С.М. Экспериментальное исследование влияния дистанционирующей решетки на структуру течения в ТВС реактора АЭС-2006 // Теплоэнергетика. 2013. № 1. С. 63–67.
10. Кашинский О.Н., Куликов Д.В., Лобанов П.Д., Прибатурин Н.А., Светоносков А.И. Распределение скорости жидкости в экспериментальной модели тепловыделяющей сборки с дистанционирующей решеткой // Теплофизика и аэромеханика. 2018. Т. 25, № 2. С. 219–223.
11. Прибатурин Н.А., Лобанов П.Д., Рандин В.В., Кашинский О.Н., Воробьев М.А., Волков С.М. Экспериментальное исследование напряжения трения при течении жидкости в модели ТВС // Теплофизика и аэромеханика. 2020. Т. 27, № 6. С. 869–874.
12. Накоряков В.Е., Бурдуков А.П., Кашинский О.Н., Гешев П.И. Электродиффузионный метод исследования локальной структуры турбулентных течений / ред. В.Г. Гасенко. Новосибирск: ИТ СО АН СССР, 1986. 247 с.

*Статья поступила в редакцию 15 апреля 2021 г.,
после доработки — 11 мая 2021 г.,
принята к публикации 18 мая 2021 г.*