

УДК 621.039.4

## Экспериментальное исследование напряжения трения при течении жидкости в модели ТВС

Н.А. Прибатурин<sup>1,2</sup>, П.Д. Лобанов<sup>2</sup>, В.В. Рандин<sup>2</sup>, О.Н. Кашинский<sup>2</sup>,  
М.А. Воробьев<sup>2</sup>, С.М. Волков<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН,  
Новосибирск

<sup>2</sup>Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск

E-mail: lobanov@itp.nsc.ru

Представлены первичные экспериментальные данные по осевому и аксиальному распределениям касательного напряжения трения на поверхности стержня — имитатора твэла — при течении жидкости через модель тепловыделяющей сборки (ТВС) в зависимости от диаметра стержня (9, 10, 15 мм), относительного расстояния между стержнями (1,2, 1,3, 1,4, 1,45) и числа стержней (7 и 37) при ламинарном, переходном и турбулентном режимах течения жидкости в ТВС.

**Ключевые слова:** эксперимент, тепловыделяющая сборка, твэл, трение.

В реакторных установках используется компоновка тепловыделяющей сборки, в которой теплоноситель омывает топливные элементы (твэлы). Топливные кассеты состоят из десятков и сотен твэлов. В основном твэлы собираются в треугольную (гексагональную) или квадратную компоновки, при этом они располагаются в углах правильных треугольников и квадратов. В ранее опубликованных работах, например [1–4], основное внимание уделялось распределению базовых гидродинамических параметров, таких как коэффициент гидравлического сопротивления, осредненная скорость жидкости и напряжение трения на стенке, теплообмен. Однако детального экспериментального исследования влияния диаметра стержней, их числа и шага расположения на гидродинамические параметры течения не проводилось. Внедрение современных методов измерений позволяет проводить измерения с высоким временным разрешением характеристик турбулентности, Рейнольдсовых напряжений, спектральных характеристик течения жидкости.

Целью настоящей работы является выполнение детальных измерений напряжения трения на поверхности вертикального стержня — имитаторе твэла в 7- и 37-стержневых моделях тепловыделяющей сборки (ТВС) в зависимости от диаметра стержня, относительного расстояния между стержнями и режима течения.

Для выполнения работы использовались два гидродинамических стенда, построенных по общей схеме и различающихся между собой конструкцией рабочих участков. Один стенд рассчитан на течение жидкости через 7-стержневую, а другой через 37-стержневую модели ТВС. Принципиальным явилось рассмотрение большого диапазона для шага расположения стержней в пучке (от 1,2 до 1,45), разного диаметра стержней и разного количества стержней в модели ТВС (7- и 37-стержней).

© Прибатурин Н.А., Лобанов П.Д., Рандин В.В., Кашинский О.Н., Воробьев М.А., Волков С.М., 2020

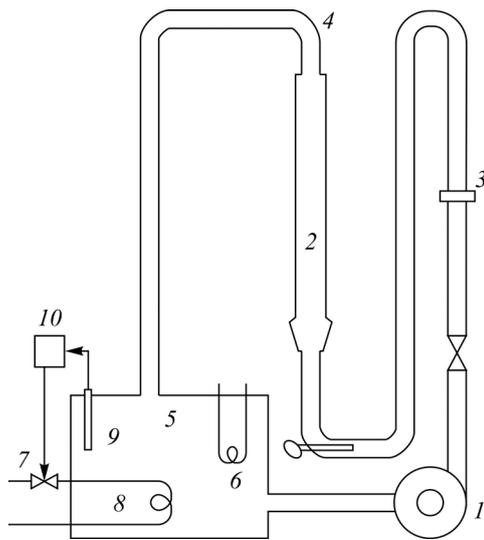


Рис. 1. Схема экспериментального стенда.  
 1 — насос, 2 — рабочий канал, 3 — расходомерная диафрагма, 4 — выход рабочего участка, 5 — основной бак, 6 — нагреватель, 7 — клапан, 8 — змеевик системы термостабилизации, 9 — термопара, 10 — автоматизированная система поддержания температуры.

Экспериментальные стенды представляют собой замкнутый гидродинамический контур с рабочим участком — имитатором ТВС. Каждый контур состоит из системы трубопроводов, расходомеров, рабочего участка, баков с рабочей жидкостью и измерительной аппаратуры. Принципиальная схема работы стендов приведена на рис. 1. Рабочая жидкость из основного бака 5 с помощью центробежного насоса 1 через расходомерную диафрагму 3 подается в рабочий участок 2.

Из рабочего участка жидкость через трубопровод 4 поступает в возвратную трубу и затем в основной бак 5. Расход жидкости регулируется изменением оборотов центробежного насоса с помощью частотного регулятора. Температура жидкости в баке поддерживается постоянной с помощью автоматической системы термостабилизации в пределах  $25 \pm 0,1$  °С.

Схема проходного сечения рабочего участка для 7-стержневой модели ТВС приведена на рис. 2. Для проведения детальных исследований распределения напряжения трения используется 7-твэльная экспериментальная модель, обечайка которой имитирует дополнительный пояс твэлов (так называемая квазипериодическая сборка). Измерения проводились в ламинарном, переходном и турбулентном режимах течения, соответствующий диапазон изменения числа Рейнольдса составил  $Re = 500 \div 10000$ . Для расчета  $Re$  используется гидравлический диаметр  $D_h$ , построенный по смоченному периметру, включая обечайку. Выбор столь малых чисел Рейнольдса обусловлен направленностью данных исследований на верификацию CFD расчетных кодов, используемых в атомной энергетике [5], а также для моделирования аварийных ситуаций с потерей расхода теплоносителя (ЛОСА).

Измерения параметров течения в 7- и 37-ячеечных сборках проводились при относительном расстоянии между стержнями  $P/D = 1,2, 1,3, 1,4, 1,45$  и диаметрах имитаторов твэлов  $D = 9, 10, 15$  мм. Всего было изготовлено 13 вариантов рабочих участков. Модели-имитаторы ТВС имели гексагональную упаковку, при которой стержни размещаются в углах правильного шестигранника. Перед рабочими участками располагалась зона стабилизации течения жидкости, для чего в канале устанавливались выравнивающие решетки.

Для проведения измерений распределения напряжения трения на поверхности стержня — имитатора твэла был использован электродиффузионный метод [6]. В качестве модельной жидкости при проведении экспериментов применялся ферри- и ферроцианидный электрохимический раствор на базе дистиллированной воды. В качестве датчиков трения использовались тонкие платиновые пластины. Датчики были вклеены в центральный стержень и зашлифованы заподлицо с его наружной поверхностью. Для 37-ячеечной сборки использовались датчики двух размеров:  $0,1 \times 0,85$  и  $0,05 \times 0,35$  мм<sup>2</sup>.

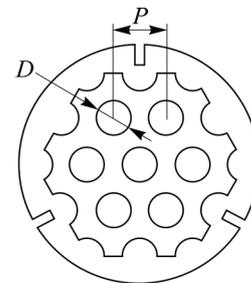


Рис. 2. Схема проходного сечения 7-стержневой модели ТВС.

Большой датчик применялся для измерения среднего трения, маленький — для измерения пульсаций. Маленький датчик был установлен на 1 мм сверху большого. Датчики подсоединялись к усилителю тока. Выходное напряжение усилителя оцифровывалось аналого-цифровым преобразователем. Дальнейшая обработка сигнала проводилась в цифровом виде на компьютере. Угловая координата точки измерения изменялась в пределах от 0 до 360 градусов (полный круг). Перемещение датчиков внутри рабочих участков осуществлялось с помощью автоматизированной системы позиционирования центрального стержня, 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.

В рассматриваемом исследовании представлялось важным проведение экспериментов в невозмущенной дистанционирующей решеткой области потока. Выполненные экспериментальные исследования распределения напряжения трения на стенке в 37-стержневой сборке на различных расстояниях от решетки показали, что на расстоянии 160 мм все возмущения от решетки пропадают (см. рис. 3). Об этом свидетельствует тот факт, что по азимутальному углу наблюдается равномерное распределение напряжения трения на стенке и его величина соответствует значению в гладком пучке стержней. Данное наблюдение справедливо для ламинарного, переходного и турбулентного режимов течения ( $Re = 500 \div 10000$ ).

Измерения напряжения трения на поверхности имитатора твэла в 7-стержневой модели ТВС проводились на расстояниях  $H = 200$  и  $300$  мм от дистанционирующей решетки для исключения ее влияния на течение жидкости. Каждая точка измерялась в течении 10 секунд, затем результат измерения усреднялся.

Типичные профили азимутального распределения напряжения трения на стенке и его пульсаций в зависимости от режима течения приведены на примере 7-стержневой модели ТВС на рис. 4 и 5.

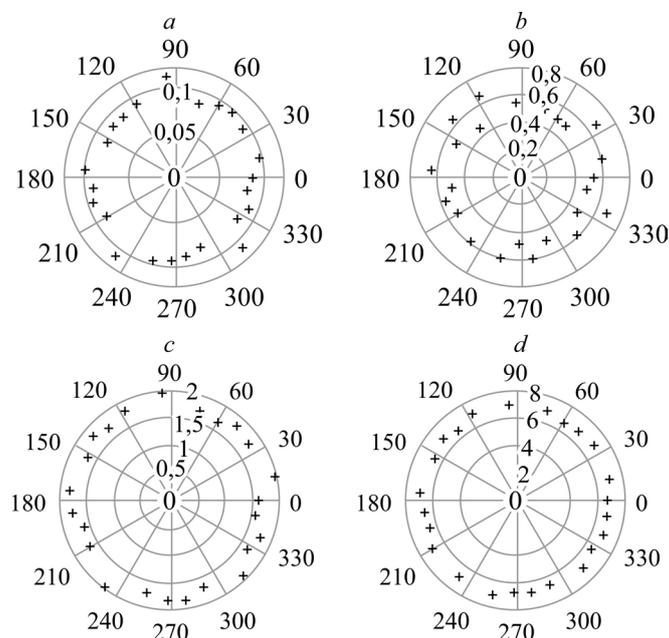


Рис. 3. Азимутальные распределения напряжения трения на стенке в 37-стержневой сборке.

$Re = 500$  (a),  $2500$  (b),  $5000$  (c),  $10000$  (d).

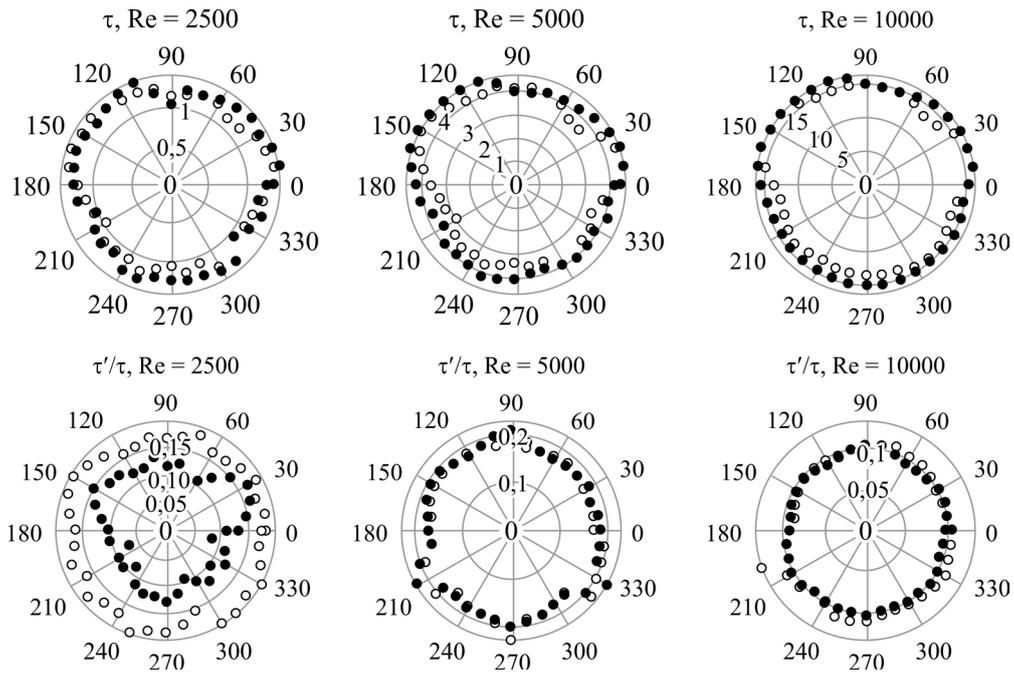


Рис. 4. Азимутальные распределения напряжения трения на стенке и его пульсаций.  
 $D = 9$  мм,  $P/D = 1,2$ ; светлые символы —  $H = 200$  мм, темные символы —  $H = 300$  мм.

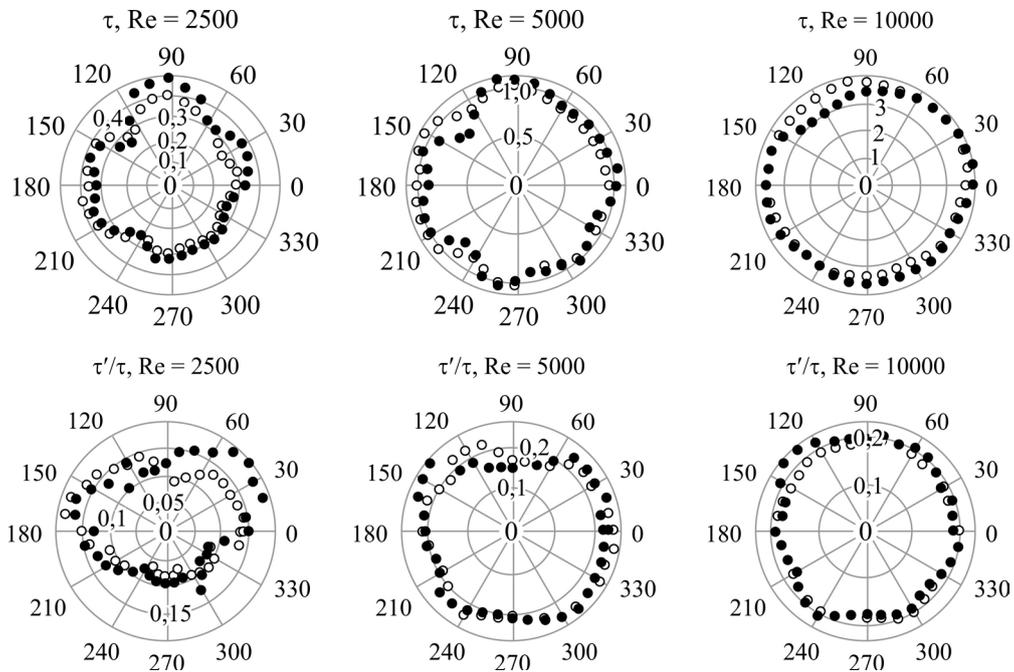


Рис. 5. Азимутальные распределения напряжения трения на стенке и его пульсаций.  
 $D = 9$  мм,  $P/D = 1,45$ ; светлые символы —  $H = 200$  мм, темные символы —  $H = 300$  мм.

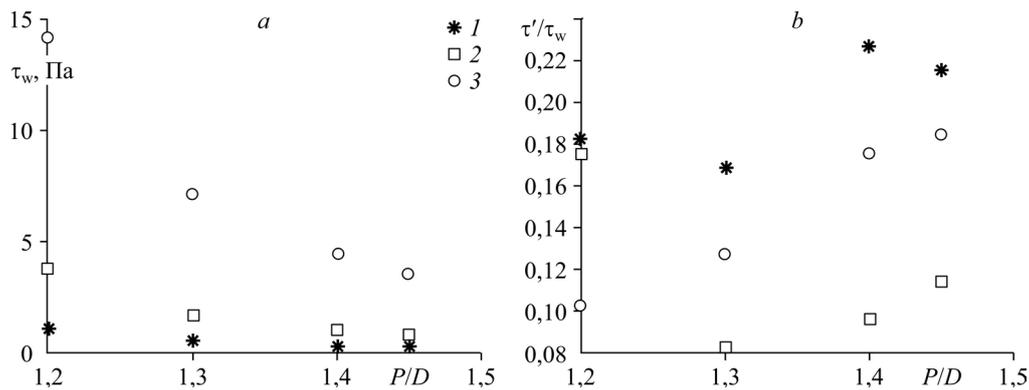


Рис. 6. Осредненные по азимутальному углу значения напряжения трения (а) и значения пульсаций напряжения трения (b) в зависимости от числа Рейнольдса и шага стержней.  $Re = 2500$  (1),  $5000$  (2),  $10000$  (3);  $D = 9$  мм,  $H = 200$  мм.

Осредненные по азимутальному углу значения напряжения трения за решеткой и его относительные пульсации в зависимости от относительного шага приведены на рис. 6. Значения среднего по периметру стержня трения усреднялись по всем точкам азимутального профиля. Как видно, в области турбулентного течения происходит рост величины напряжения трения на стенке стержня, однако при заданном числе Рейнольдса и при увеличении относительного расстояния между стержнями трение уменьшается. При анализе полученных данных можно сделать выводы, что уменьшение относительного шага между стержнями приводит к увеличению значения среднего напряжения трения на стенке, а значит и гидравлического сопротивления. При этом величина увеличения напряжения трения на стенке может достигать трех и более раз. Пульсации трения, наоборот, увеличиваются с увеличением шага стержней, что говорит о вероятной стабилизации потока в стесненных условиях. Неравномерность распределения касательного напряжения по периметру стержня в области турбулентного течения крайне мала. Такое же поведение неравномерности наблюдается в распределении по периметру стержня и пульсаций трения, что свидетельствует об устойчивости течения. В переходной области течения проявляются пульсационные явления, что находит отражение в неравномерных по периметру стержня распределениях пульсаций трения.

Результаты исследования показали, что относительные гидродинамические характеристики течения довольно хорошо масштабируются с увеличением диаметра стержней. Найдено хорошее качественное подобие течения в каналах 7- и 37-стержневых сборок. Это свидетельствует о том, что несмотря на изменение поперечного сечения ячейки у стенки обечайки экспериментальной модели, гидродинамические характеристики, полученные вблизи центрального стержня сборки, могут быть перенесены для случая многостержневой сборки. Результаты измерений также продемонстрировали, что тенденция изменения напряжения трения на стенке при смене относительного шага практически не зависит от диаметра стержня (рис. 7, здесь  $t_{w1,2}$  — осредненное по окружности напряжение трения на стенке для относительного шага 1,2).

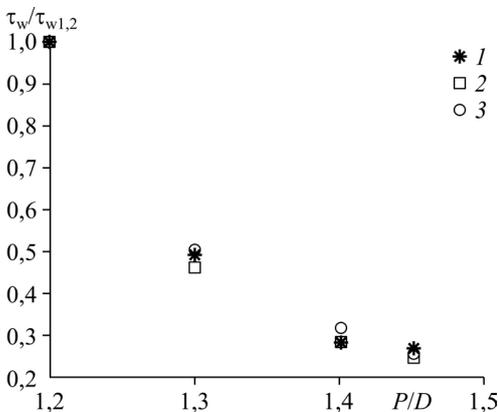


Рис. 7. Осредненные по азимутальному углу значения напряжения трения на стенке при вариации диаметров стержней и относительного расстояния между ними.  $D = 9$  (1), 10 (2), 15 (3).

Таким образом, установлено, что азимутальная неравномерность распределения напряжения трения для всех тестируемых моделей ТВС составляет единицы процентов и имеет тенденцию к снижению с увеличением относительного шага между стержнями и увеличением диаметра стержней. При этом нет существенной разницы для 7- и 37-стержневых моделей, что подтверждает подобие процессов при изменении масштабирования.

#### Список литературы

1. **Rehme K.** Pressure drop performance of rod bundles in hexagonal arrangements // Intern. J. Heat and Mass Transfer. 1972. Vol. 15, Iss. 12. P. 2499–2517.
2. **Abdelghany M., Eichhorn R.** Measurements of Wall Shear Stress in Axial Flow in a Square Lattice Rectangular Rod Bundle // J. Fluids Engng. 1986. Vol. 108, Iss. 2. P. 166–172.
3. **Baratto F., Bailey S.C.C., Tavoularis S.** Measurements of frequencies and spatial correlations of coherent structures in rod bundle flows // Nuclear Engng and Design. 2006. Vol. 60, Iss. 5. P. 1830–1837.
4. **Zhukov A.V., Sorokin A.P., Titov P.A., Ushakov P.A.** Analysis of the fast reactors' fuel-rod bundle flow resistance // Soviet Atomic Energy. 1986. Vol. 60, Iss. 5. P. 369–374.
5. **Obabko A.V., Fischer P.F., Karabasov T.J.S., Goloviznin V.M., Zaytsev M.A., Chudanov V.V., Pervichko V.A., Aksenova A.E.** CFD Validation in OECD/NEA T. Junction Benchmark. Argonne National Laboratory. Report ANL/NE11/25.
6. **Накоряков В.Е., Бурдуков А.П., Кашинский О.Н., Гешев П.И.** Электродиффузионный метод исследования локальной структуры турбулентных течений. Новосибирск: Институт теплофизики СО РАН СССР, 1986. 247 с.

*Статья поступила в редакцию 21 апреля 2020 г.,  
после доработки — 31 июля 2020 г.,  
принята к публикации 5 августа 2020 г.*