

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Калинушкин А.Е., Козлов В.В., Митин В.И., Семченков Ю.М. Система контроля, диагностики и управления для ЯЭУ большой мощности с водо-водяными реакторами. — Атомная энергия, 2009, т. 106, вып. 1, с. 3 — 8.
2. Общие положения обеспечения безопасности атомных станций (НП-001-15). М., 2015. 74 с.
3. On-line Monitoring for Improving Performance of Nuclear Power Plants. Pt 1. Instrument Channel Monitoring. Vienna: IAEA, 2008. 122 p.
4. On-line Monitoring for Improving Performance of Nuclear Power Plants. Pt 2. Process and Component Condition Monitoring and Diagnostics. Vienna: IAEA, 2008. 82 p.
5. Хашемин Х.М. Техническое обслуживание измерительных устройств на атомных электростанциях. М.: Изд-во БИНОМ, 2012. 350 с.
6. Алыев Р.В. Распознавание состояния активной зоны и анализ достоверности информации системы внутриреакторного контроля при эксплуатации топливных загрузок ВВЭР-1000. Автореф. дис. на соискание ученой степени канд. техн. наук. Обнинск, МИФИ, 2013. 22 с.
7. Семенихин А.В., Саунин Ю.В., Жук М.М. Опробование системы диагностики информации СВРК на блоке № 1 НВАЭС-2. Тезисы докл. 10-й Межд. научно-техн. конф. «Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР». Подольск, 16—19 мая 2017 г., с. 98.
8. Саунин Ю.В., Добротворский А.Н., Семенихин А.В. Разработка и применение специализированного программного обеспечения при проведении комплексных испытаний системы внутриреакторного контроля реакторов ВВЭР. — Тяжелое машиностроение, 2008, № 11, с. 18—22.
9. Саунин Ю.В. Разработка методик комплексных испытаний систем внутриреакторного контроля ВВЭР. Автореф. дис. на соискание ученой степени канд. техн. наук. Екатеринбург, УПТИ, 2010. 30 с.
10. Обеспечение эффективности измерений при управлении технологическими процессами. Оценивание погрешности измерений при ограниченной исходной информации. РМГ 62—2003. М.: ИПК Изд-во стандартов, 2004. 19 с.
11. Saunin Yu.V., Dobrotvorski A.N., Semenikhin A.V. e.a. Numerical and experimental investigation of 3D coolant temperature distribution in the hot legs of primary circuit of reactor plant with WWER-1000. — Kerntechnik, 2015, v. 80, № 4, p. 366—372.

Поступила в Редакцию 20.07.17

УДК 621.039.536.24.08

ТЕПЛОТДАЧА И НЕРАВНОМЕРНОСТЬ ТЕМПЕРАТУРЫ В ПУЧКАХ СТЕРЖНЕЙ С РАЗНЫМ ДИСТАНЦИОНИРОВАНИЕМ, ОХЛАЖДАЕМЫХ ТЯЖЕЛЫМ ЖИДКОМЕТАЛЛИЧЕСКИМ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕМ

Кузина Ю.А., Сорокин А.П. (АО «ГНЦ РФ — ФЭИ им. А.И. Лейпунского», г. Обнинск)

Для разработки быстрых реакторов нового поколения, характеризующихся высокими энергонапряженностью, температурой твэлов, требуются надежные данные о теплогидравлике активной зоны (теплотдаче, температурном режиме твэлов и др.), которая является одной из важных в обосновании конструкции и режимных параметров.

В настоящее время отсутствуют количественные данные, которые характеризуют теплообмен в свободных решетках твэлов, характерных для активной зоны быстрых реакторов нового поколения со свинцовым теплоносителем при разных видах дистанционирования твэлов. Получение этих данных наряду с коэффициентами гидравлического сопротивления позволяет замкнуть систему констант для поканального метода теплогидравлического расчета, учитывающего влияние пространственных неоднородностей геометрии и энерговыделения, являющегося эффективным инструментом на стадии

технических проектов, а также при анализе эксплуатационных режимов.

ТЕПЛОТДАЧА И ТЕМПЕРАТУРНЫЕ ПОЛЯ В РЕШЕТКАХ ГЛАДКИХ ТВЭЛОВ

Коэффициенты теплотдачи гладких твэлов с жидкометаллическим охлаждением получены на основании исследований для решеток твэлов в широких интервалах изменения определяющих параметров — $1 \leq s/d \leq 1,95$, $4 \leq Re \leq 3500$, $0,007 \leq Pr \leq 0,03$, $0,02 \leq \epsilon \leq 16$. Это позволило выявить основные закономерности теплообмена в решетках гладких твэлов с жидкометаллическим охлаждением и получить универсальные расчетные формулы.

Для обобщения чисел Нуссельта принята формула ($\epsilon \geq 0,01$, $1 \leq s/d \leq 2$, $1 \leq Re \leq 4000$) [1—3]

$$Nu = Nu_{\text{л}} + f(\epsilon, x) Re^{\varphi(x)}, \quad (1)$$

где $Nu_{\text{л}}$ — число Нуссельта для ламинарного течения теплоносителя; $f(\epsilon, x)$, $\phi(x)$ — эмпирические функции; $x = s/d$ — относительный шаг решетки твэлов, рассчитанный по основной гармонике разложения температурного поля в ряд Фурье (для треугольной решетки твэлов — это шестая гармоника $k = 6$); $\epsilon = \epsilon_6$ — параметр теплового подобия твэлов. В числах Nu и Re за характерный размер принят гидравлический диаметр ячейки регулярной решетки твэлов.

Ламинарное число Нуссельта $Nu_{\text{л}}$, эмпирические функции $f(\epsilon, x)$ и $\phi(x)$ рассчитываются по формулам

$$Nu_{\text{л}} = \left[7,55x - \frac{6,3}{x^{17,3(x-0,81)}} \right] \left[1 - \frac{3,6x}{x^{20}(1 + 2,5\epsilon^{0,86}) + 3,2} \right]; \quad (2)$$

$$f = \frac{0,041}{x^2} \left(1 - \frac{1}{(x^{30} - 1)/6 + \sqrt{1,24\epsilon + 1,15}} \right); \quad (3)$$

$$\phi = 0,56 + 0,19x - 0,1/x^{80} \quad (4)$$

или берутся из соответствующих номограмм.

Формулы (1)—(4) имеют такую структуру лишь для диапазона относительного шага $1 \leq s/d \leq 1,2$ (тесные решетки твэлов). Для других характерных диапазонов s/d формула существенно упрощается. Например, для диапазона $1,2 \leq s/d \leq 1,95$, в который входит рассматриваемый в настоящей статье относительный шаг решетки твэлов $s/d = 1,33$ и $1,28$, формула для чисел Нуссельта имеет вид [3, 4]

$$Nu = Nu_{\text{л}} + (0,041/x^2) Pe^{0,56+0,19x}; \quad (5)$$

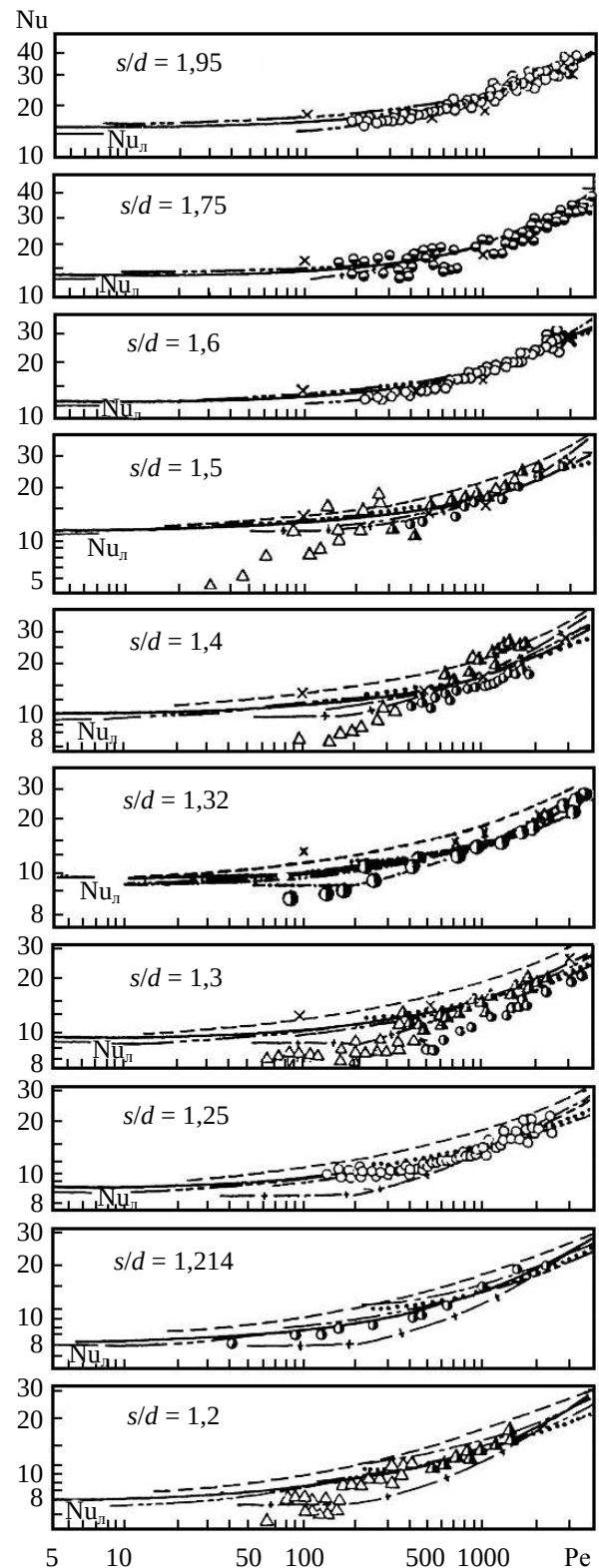
$$Nu_{\text{л}} \approx 7,55x - 20x^{-13}.$$

На рис. 1 показан экспериментальный и расчетный теплообмен жидких металлов в свободных гладких решетках стержней [2—4].

За основу обобщения неравномерностей температуры принимается формула [2—4]

$$\Delta T = \frac{t_w^{\max} - t_w^{\min}}{\bar{q}R} \lambda_f = \frac{\Delta T_{\text{л}}}{1 + \gamma(\epsilon) Pe^{\beta(x)}}, \quad (6)$$

где q — тепловой поток; R — внешний радиус твэла [3, 4]; λ_f — теплопроводность теплоносителя; $\Delta T_{\text{л}}$ — неравномерность температуры при ламинарном режиме течения, определяемая по номограмме; $\gamma(\epsilon)$, $\beta(x)$ — эмпирические функции.



Р и с. 1. Расчетный по формуле (5) (—) и экспериментальный теплообмен жидких металлов (Δ , $\circ$, $\ominus$, $\bullet$, $\times$, Δ , $+$) в свободных гладких правильных решетках стержней

Необходимо отметить, что формула (6) получена для температуры по периметру гладких твэлов, расположенных в тесной решетке ($1 \leq x \leq 1,15$), где велико влияние соседних твэ-

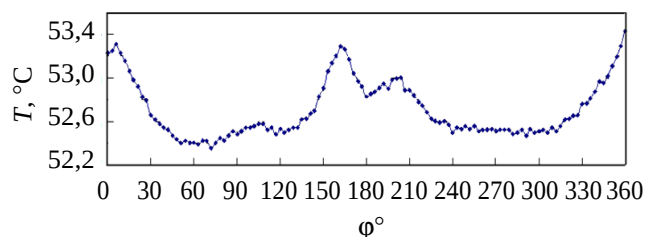
лов и ее неравномерность в значительной мере определяется эквивалентной теплопроводностью твэлов (параметром ϵ). В свободных решетках твэлов неравномерности температуры почти нет.

ТЕПЛООТДАЧА И ТЕМПЕРАТУРНЫЕ ПОЛЯ В РЕШЕТКАХ ОРЕБРЕННЫХ ТВЭЛОВ (ВИНТОВЫЕ НАВИВКИ ТИПА «РЕБРО ПО РЕБРУ»)

Экспериментальная модель ТВС с оребренными имитаторами твэлов. Экспериментальная модель ТВС с оребренными имитаторами твэлов проектируется в соответствии с принципами теплового моделирования [3—6]. Она представляет собой сборку из 37 электрообогреваемых имитаторов твэлов с дистанционирующими навивками на имитаторах, выполненными по принципу касания «ребро по ребру», имитаторы расположены в треугольной решетке с относительным шагом $s/d = 1,33$ в шестигранном чехле без вытеснителей на периферии.

На поверхности измерительных (поворотных) имитаторов твэлов в продольных пазах на разном расстоянии равномерно с шагом 30° по всей области от начала энерговыделения заделаны 12 микротермопар. Поворот имитатора в интервале угла $0\text{—}360^\circ$ позволяет измерять температуру на его поверхности. Ребра привариваются к нижней и верхней штифтуемым в решетках пробкам и натягиваются на поворотном имитаторе, плотно прилегая к его поверхности. При повороте имитатора в ребристой оправке каждая из 12 термопар проходит участок периметра под ребром и измеряет температуру. Измеряется температура поверхности теплообмена центрального имитатора твэла и температура теплоносителя на входе и выходе модельной сборки в коллекторах, а также на выходе по всем ячейкам модельной сборки. Моделирующим теплоносителем является эвтектический сплав натрий—калий с числом Прандтля, близким к числу Прандтля свинца, который используется в качестве теплоносителя в реакторе БРЕСТ-ОД-300 (один из принципов теплового моделирования [2, 5, 6]).

Повышение температуры под дистанционирующими ребрами. Общая неравномерность температуры по периметру измерительных имитаторов твэлов. В начале зоны энерговыделения примерно через 180° отме-



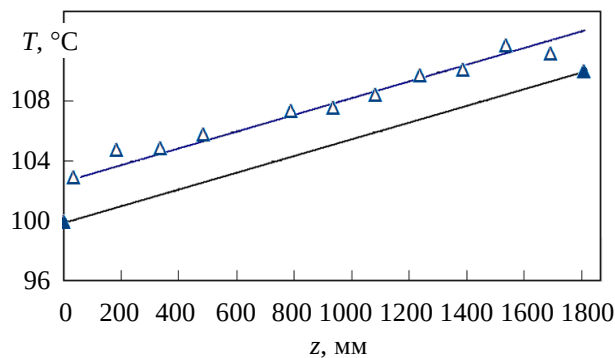
Р и с. 2. Температурное поле центрального имитатора твэла модельной сборки в начале зоны энерговыделения для одного экспериментального режима

чается повышение температуры под ребрами центрального имитатора, затем проявляются дополнительные максимумы от соседних ребер, численные значения которых могут быть значительными (рис. 2). Быстро развивается общая неравномерность температуры бокового и углового имитаторов твэлов (разница между максимальной и минимальной температурой по периметру), температура сильно увеличивается в результате ее повышения под ребрами, если их положение приходится на центральную область сборки.

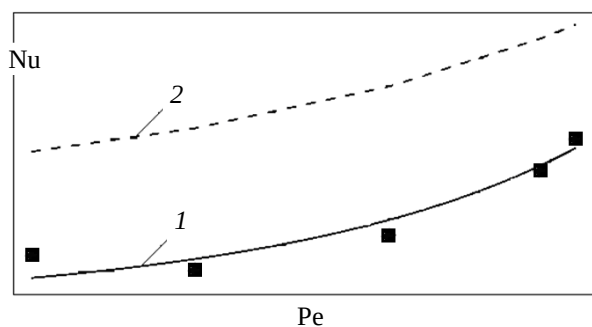
Теплоотдача. Изменение температурного напора стенка—жидкость, показанное в качестве примера для одного из опытных режимов на рис. 3, характеризуется сравнительно небольшим разбросом опытных точек. Разброс средне-смешанной температуры на выходе центральных ячеек также невелик.

Экспериментальные данные для центрального имитатора твэла показаны на рис. 4. Сравнивая экспериментальные данные для центрального имитатора с расчетными по формуле для гладких твэлов (1), получаем [7]

$$Nu_{\text{ц}} = Nu_f(Re), \quad (7)$$



Р и с. 3. Изменение температурного напора стенки—жидкость по длине энерговыделения оребренного центрального имитатора твэла модельной сборки для одного из экспериментальных режимов: ▲, △ — температура теплоносителя и стенки измерительного имитатора соответственно



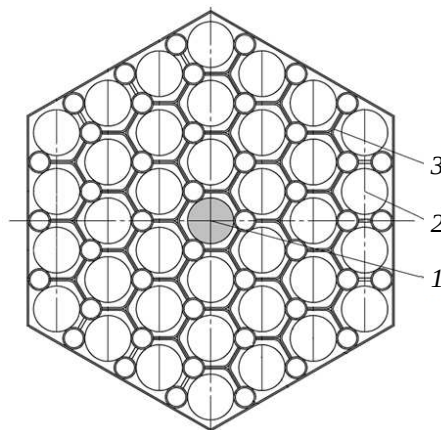
Р и с. 4. Зависимость числа Нуссельта от Пекле для центрального имитатора твэла в модельных сборках: 1 — аппроксимация по соотношению (7) для оребренного имитатора твэла; 2 — зависимость по числу Нуссельта для решеток гладких твэлов с $s/d = 1,33$; ■ — эксперимент

где Nu — зависимость по числу Нуссельта для гладких твэлов, которую можно рассчитать по формуле (5); $f(Re)$ — поправка к числу Нуссельта на оребрение твэлов.

Видно, что теплоотдача в опытах на сборке с $s/d = 1,33$ с двухзаходным оребрением твэлов «ребро по ребру» значительно ниже, чем для гладких твэлов. В оребренных системах, охлаждаемых жидкими металлами, теплоотдача снижается из-за неравномерности температуры под ребрами, так как эффект турбулизации ребрами жидкого металла оказывается небольшим по сравнению с повышением температуры под ними. С увеличением числа Пекле влияние повышенной температуры под ребрами на теплоотдачу уменьшается (роль турбулентности возрастает), поэтому коэффициенты теплоотдачи оребренных твэлов по сравнению с гладкими каналами снижаются. Если при $Re \cong 1000$ снижение составляет примерно 40%, то при $Re \cong 2300$ теплоотдача оребренных и гладких твэлов сравнивается, т.е. при данном числе Пекле, по-видимому, турбулентность жидкометаллического потока и повышение температуры под дистанционирующими ребрами компенсируются.

ТЕПЛОТДАЧА И ТЕМПЕРАТУРНЫЕ ПОЛЯ В РЕШЕТКАХ ТВЭЛОВ, ДИСТАНЦИОНИРУЕМЫХ ПОПЕРЕЧНЫМИ РЕШЕТКАМИ

Модельная ТВС с дистанционирующими решетками. Эксперименты выполняли на 37-стержневой модельной сборке ($s/d = 1,33$ и $s/d = 1,28$), но вместо ребер дистанционирование осуществлялось поперечными решетками (четыре по длине энерговыделения) [8, 9]. Термо-

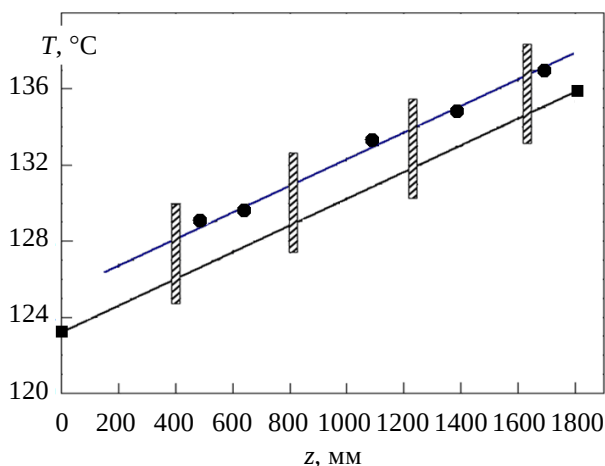


Р и с. 5. Поперечное сечение модельной сборки в области дистанционирующей решетки: 1 — измерительный (поворотный) имитатор твэла; 2 — имитатор твэла; 3 — дистанционирующая решетка

пары в центральном измерительном имитаторе твэла наиболее часто заделаны в области третьей решетки, что позволило изучить ее влияние на теплоотдачу (рис. 5).

Результаты экспериментов для модельныхборок с дистанционирующими решетками. Экспериментальные данные обрабатывали для гладкой области имитаторов твэлов и области дистанционирующих решеток. Пример температурного поля измерительного имитатора твэла по показаниям термопар, находящихся между дистанционирующими решетками, показан на рис. 6.

Полученные зависимости для чисел Нуссельта в гладкой области имитаторов твэлов с



Р и с. 6. Характерный температурный напор стенка—жидкость по длине энерговыделения центрального имитатора твэла, дистанционируемого решетками, по показаниям термопар, расположенных между решетками, для одного из экспериментальных режимов: ●, ■ — температура стенки без поправки на заделку термопар и жидкости соответственно

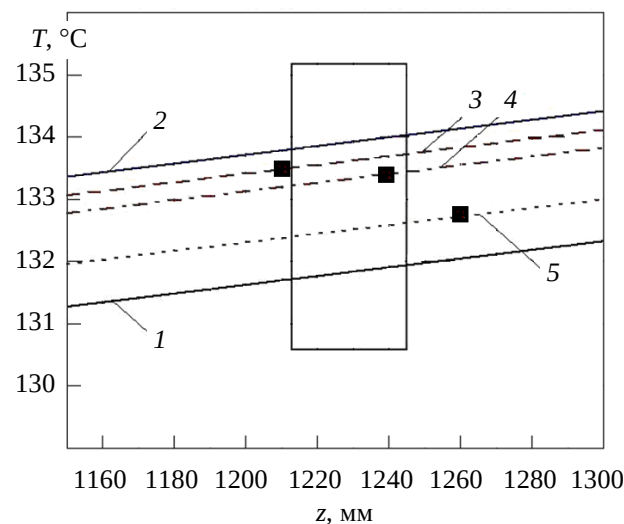
шагом $s/d = 1,33$ и $s/d = 1,28$, дистанционируемых поперечными решетками, в исследованном диапазоне чисел Пекле описываются формулой вида [8, 9]

$$Nu_{гр} = A + B \cdot Pe^C, \quad 200 \leq Pe \leq 1150, \quad (8)$$

что соответствует общему виду зависимостей $Nu(Pe)$, которые представлены формулой (1) для решеток твэлов, охлаждаемых жидкими металлами.

На рис. 7 видно, дистанционирующие решетки приводят к локальному всплеску теплоотдачи, которая оказывается выше, чем для гладких областей имитаторов твэлов (между решетками). Теплоотдача увеличивается по мере движения теплоносителя в решетке. Если температурный напор стенка—жидкость в нижнем торце решетки (кривая 3) близок к температурному напору для гладких областей имитаторов, то внутри решетки он уменьшается (кривая 4) и особенно малым становится возле верхнего торца решетки (кривая 5) из-за ее турбулизирующего воздействия на поток теплоносителя. В этом месте наблюдается наибольшее увеличение теплоотдачи.

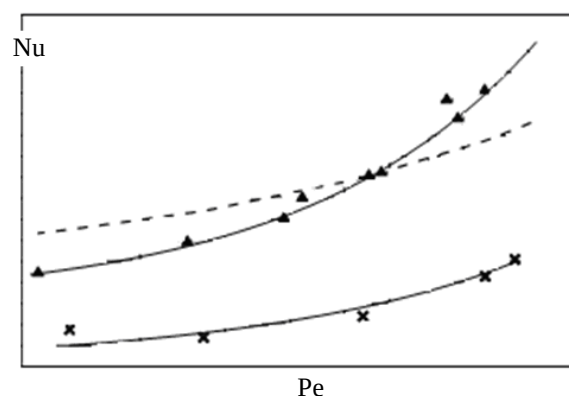
Формулы для расчета коэффициента теплоотдачи получены для разных областей дистанционирующей решетки: до, после и внутри нее. По этим соотношениям можно рассчитывать локальные коэффициенты теплоотдачи, а также



Р и с. 7. Температурные поля теплоносителя и стенки имитатора твэла в области дистанционирующей решетки для одного экспериментального режима: 1—5 — температура теплоносителя, стенки имитатора твэла по показаниям термодатчиков, находящихся в гладкой области, до, внутри и после решетки соответственно

использовать данные зависимости для определения числа Нуссельта, учитывающего влияние дистанционирующих решеток на гладкую область твэлов для всей зоны энерговыделения.

Теплоотдача и температурные поля в решетках твэлов, дистанционируемых винтовыми навивками типа «ребро по ребру», и твэлов, дистанционируемых поперечными решетками ($s/d = 1,33$) (рис. 8). В исследованном диапазоне чисел Пекле влияние дистанционирующих решеток на твэлы невелико (между решетками сравнительно небольшое расстояние и их толщина невелика), в результате числа Нуссельта почти совпали с числами для решеток гладких твэлов с шагом $s/d = 1,33$. Эта зависимость для решеток гладких твэлов с $s/d = 1,33$ показана пунктирной линией. Отличие теплоотдачи решеток гладких твэлов и теплоотдачи в гладкой области имитаторов твэлов, дистанционируемых поперечными решетками, составило $\pm 20\%$ при высоких и низких числах Пекле. Таким образом, расчеты для гладких областей твэлов, дистанционируемых поперечными решетками, можно проводить по формуле для гладких твэлов (5) или по вновь полученной формуле вида (8). Числа Нуссельта при таком же относительном шаге $s/d = 1,33$ для двухзаходного оребрения твэлов значительно меньше. Это объясняется большой неравномерностью температуры по периметру твэлов по сравнению с рассматриваемым случаем.

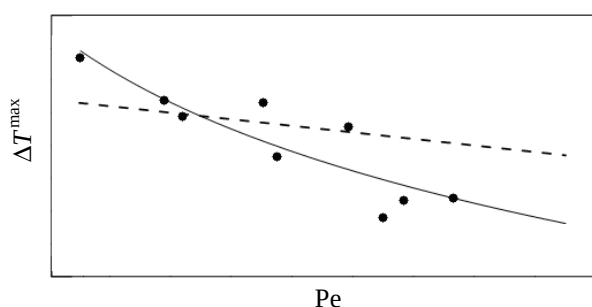


Р и с. 8. Зависимость числа Нуссельта от Пекле для центрального имитатора твэла в модельных сборках твэлов с $s/d = 1,33$: $\blacktriangle$ — эксперимент в гладкой области имитаторов твэлов, дистанционируемых поперечными решетками, с аппроксимирующей кривой, описываемой формулой вида (8); --- — зависимость для решеток гладких твэлов с $s/d = 1,33$, рассчитанная по формуле (5); $\times$ — зависимость для имитаторов твэлов с двухзаходным оребрением «ребро по ребру» [7]

Как отмечалось, в свободных решетках гладких твэлов, охлаждаемых жидким металлом, неравномерность температуры по периметру твэлов отсутствует, что приводит к высокой теплоотдаче. В сборке с дистанционирующими решетками неравномерность температуры при разных числах Пекле, за исключением малых чисел в районе дистанционирующих решеток, значительно меньше, чем в случае дистанционирования твэлов винтовыми навивками «ребро по ребру». Это относится для области как выхода из дистанционирующей решетки, так и внутри решетки (рис. 9). При малых числах Пекле отмечается примерное равенство неравномерности температуры при дистанционировании твэлов решетками и винтовыми навивками «ребро по ребру». Происходит даже перестройка численных значений. Однако при больших числах Пекле различие неравномерности температуры при данных способах дистанционирования может достигать 2 раз.

Таким образом, при прочих равных условиях в свободных решетках твэлов с тяжелым жидкометаллическим теплоносителем их дистанционирование поперечными решетками более предпочтительно с точки зрения характеристик температурных полей и теплоотдачи, чем двухзаходными ребрами по принципу «ребро по ребру».

Заключение. Анализ указывает на полученные ранее надежные соотношения для расчета теплообмена в каналах и пучках гладких твэлов в идеализированных условиях теплоносителя



Р и с. 9. Зависимость безразмерной общей максимальной неравномерности температуры от числа Пекле: ● — эксперимент и аппроксимирующая кривая по показаниям термопары, расположенной внутри дистанционирующей решетки; --- — общая максимальная неравномерность температуры для центрального имитатора твэла при дистанционировании винтовыми навивками «ребро по ребру» [7]

ля без примесей. Вновь полученные данные о теплообмене в свободных решетках твэлов, характерных для быстрого реактора со свинцовым охлаждением, указывают на ухудшение теплоотдачи при дистанционировании винтовыми навивками и увеличение азимутальной неравномерности температуры твэлов по сравнению с гладкими твэлами и при дистанционировании твэлов поперечными решетками.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кириллов П.Л., Бобков В.П., Жуков А.В., Юрьев Ю.С. Справочник по теплогидравлическим расчетам в ядерной энергетике. Теплогидравлические процессы в ЯЭУ. Под общей ред. П.Л. Кириллова. М.: ИздАТ, 2010.
2. Жуков А.В., Кузина Ю.А., Сорокин А.П., Привезенцев В.В. Работы по реализации программы теплогидравлических исследований в РУ БРЕСТ и СВБР. — В сб.: Итоги научно-технической деятельности Института ядерных реакторов и теплофизики за 2011 год. Обнинск, ГНЦ РФ — ФЭИ, 2012, с. 211—226.
3. Методические указания и рекомендации по теплогидравлическому расчету активных зон быстрых реакторов. Под ред. А.В. Жукова, А.П. Сорокина. РТМ 1604.008—88. Обнинск, ФЭИ, 1989.
4. Жуков А.В., Кириллов П.Л., Матюхин Н.М. и др. Теплогидравлический расчет ТВС быстрых реакторов с жидкометаллическим охлаждением. М.: Энергоатомиздат, 1985.
5. Субботин В.И., Ибрагимов М.Х., Ушаков П.А. и др. Гидродинамика и теплообмен в атомных энергетических установках (основы расчета). М.: Атомиздат, 1975.
6. Ушаков П.А. Приближенное тепловое моделирование цилиндрических тепловыделяющих элементов. — В сб.: Жидкие металлы. М.: Атомиздат, 1967, с. 137—148.
7. Жуков А.В., Кузина Ю.А., Сорокин А.П. и др. Проблемы и особенности теплообмена и температурных полей твэлов реакторов с тяжелым теплоносителем. Тезисы докл. конф. «Теплофизика реакторов на быстрых нейтронах (Теплофизика-2013)». Обнинск, ГНЦ РФ — ФЭИ, 2013, с. 97—99.
8. Жуков А.В., Кузина Ю.А., Привезенцев В.В., Сорокин А.П. Экспериментальные исследования для определения коэффициентов теплоотдачи и температурных полей в модельной ТВС реактора типа БРЕСТ с дистанционирующими решетками. — В сб.: Инновационные проекты и технологии ядерной энергетики. Москва, ОАО «НИКИЭТ», 2016, с. 408—414.
9. Кузина Ю.А., Привезенцев В.В., Сорокин А.П., Рымкевич К.С. Исследования температурных полей и теплоотдачи в модельных ТВС реактора с тяжелым теплоносителем (однородная геометрия). Тезисы докл. конф. «Теплофизика реакторов нового поколения (Теплофизика-2016)». Обнинск, ГНЦ РФ — ФЭИ, 2016, с. 88—90.

Поступила в Редакцию 27.10.17