

# ТЕМПЕРАТУРНЫЕ ПОЛЯ И ТЕПЛООТДАЧА В РАЗДВИНУТЫХ РЕШЕТКАХ ТВЭЛОВ, ОХЛАЖДАЕМЫХ ТЯЖЕЛЫМ ЖИДКОМЕТАЛЛИЧЕСКИМ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕМ

**А.В. Жуков, Ю.А. Кузина, А.П. Сорокин, В.В. Привезенцев**

*АО «ГНЦ РФ-ФЭИ», 249033, г. Обнинск Калужской обл., пл. Бондаренко, 1*



Рассматриваются теплоотдача и поля температур в раздвинутой решетке твэлов с тяжелым жидкометаллическим теплоносителем при различных способах дистанционирования. Анализируются данные в трех сборках твэлов с относительным шагом  $s/d = 1,33$ : сборка гладких твэлов, сборка твэлов, дистанционируемых двухзаходными винтовыми ребрами типа «ребро по ребру», и сборка с дистанционированием поперечными решетками. В раздвинутой решетке гладких твэлов отсутствуют неравномерности температуры по периметру твэлов в отличие от больших общих неравномерностей температуры, имеющих место в сборке с дистанционированием винтовыми навивками, которые дают значительное снижение теплоотдачи. В сборке с поперечными дистанционирующими решетками теплоотдача возрастает лишь в районе решеток, а между ними – примерно равна теплоотдаче в сборке гладких твэлов. Приводятся соотношения, рекомендуемые для расчетов чисел Нуссельта и неравномерностей температуры по периметру твэлов для указанных способов дистанционирования.

**Ключевые слова:** жидкометаллический теплоноситель, модельная ТВС, эксперимент, гладкие твэлы, дистанционирующие решетки, винтовые ребра, температурное поле, числа Нуссельта, неравномерность температуры.

## ВВЕДЕНИЕ

Для разработки быстрых реакторов нового поколения, характеризующихся высокой энергонапряженностью [1, 2], высоким уровнем температуры твэлов в активной зоне реакторов, требуются надежные данные по теплогидравлике активной зоны реактора (теплоотдача, температурные режимы твэлов и т.д.), которая является одной из важнейших компонент в обосновании конструкции и режимных параметров реактора [3].

В настоящее время отсутствуют количественные данные, характеризующие теплообмен в широких решетках твэлов, характерных для активной зоны быстрых реакторов нового поколения со свинцовым теплоносителем при различных видах дистанционирования твэлов. Получение этих данных (наряду с коэффициентами гидравлического сопротивления) позволяет замкнуть систему констант для канального метода теплогидравлического расчета активных зон реакторов, охлаж-

© А.В. Жуков, Ю.А. Кузина, А.П. Сорокин, В.В. Привезенцев, 2015

даемых свинцом, учитывающего влияние пространственных неоднородностей геометрии и энерговыделения и являющегося эффективным инструментом теплогидравлического анализа на стадии выполнения технических проектов быстрых реакторов, а также при анализе эксплуатационных режимов.

### ТЕПЛОТДАЧА И ТЕМПЕРАТУРНЫЕ ПОЛЯ В РЕШЕТКАХ ГЛАДКИХ ТВЭЛОВ

Имеющиеся данные по расчету коэффициентов теплоотдачи гладких твэлов с жидкометаллическим охлаждением получены на основании многочисленных исследований для решеток твэлов в широких интервалах изменения определяющих параметров ( $1,0 \leq s/d \leq 1,95$ ;  $4 \leq Pe \leq 3500$ ;  $0,007 \leq Pr \leq 0,03$ ;  $0,02 \leq \varepsilon \leq 16$ ). Это позволило выявить основные закономерности теплообмена в решетках гладких твэлов с жидкометаллическим охлаждением и получить универсальные расчетные формулы.

Для обобщения чисел Нуссельта принята формула ( $\varepsilon \geq 0,01$ ;  $1,0 \leq s/d \leq 2,0$ ;  $1 \leq Pe \leq 4000$ ) [4 – 6]

$$Nu = Nu_n + f(\varepsilon, x) Pe^{\varphi(x)}, \quad (1)$$

где  $Nu_n$  – число Нуссельта для ламинарного течения теплоносителя;  $x = s/d$  – относительный шаг решетки твэлов;  $\varepsilon = \varepsilon_6$  – параметр теплового подобия твэлов, рассчитанный по основной гармонике разложения температурного поля в ряд Фурье (для треугольной решетки твэлов – это шестая гармоника –  $k = 6$ );  $f(\varepsilon, x)$  и  $\varphi(x)$  – эмпирические функции. В числах  $Nu$  и  $Pe$  за характерный размер принят гидравлический диаметр ячейки регулярной решетки твэлов.

Значения  $Nu_n$ ,  $f$  и  $\varphi$  рассчитываются по формулам [4 – 6]

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

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

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

или берутся из соответствующих номограмм.

Структура формул (1) – (4) полностью сохраняется лишь для диапазона относительных шагов  $1,0 \leq s/d \leq 1,20$  (тесные решетки твэлов). Для других характерных диапазонов  $s/d$  формула существенно упрощается. Например, для диапазона относительных шагов  $1,2 \leq s/d \leq 1,95$ , в который входит рассматриваемый в работе относительный шаг решетки твэлов  $s/d = 1,33$ , формула для чисел Нуссельта такова [6, 7]:

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

$$Nu_n \cong 7,55x - 20x^{-13}. \quad (6)$$

На рисунке 1 представлено сравнение экспериментальных и расчетных данных по теплообмену жидких металлов в раздвинутых гладких решетках стержней [5 – 7].

За основу обобщения неравномерностей температуры принимается формула [4 – 7]

$$\Delta T = (t_w^{\max} - t_w^{\min}) \cdot \lambda_f / (q^{cp} \cdot R) = \Delta T_n / (1 + \gamma(\varepsilon) \cdot Pe^{\beta(x)}), \quad (7)$$

где  $\Delta T_n$  – неравномерность температуры при ламинарном режиме течения, определяемая по номограмме [6, 7];  $\gamma(\epsilon)$  и  $\beta(x)$  – эмпирические функции.

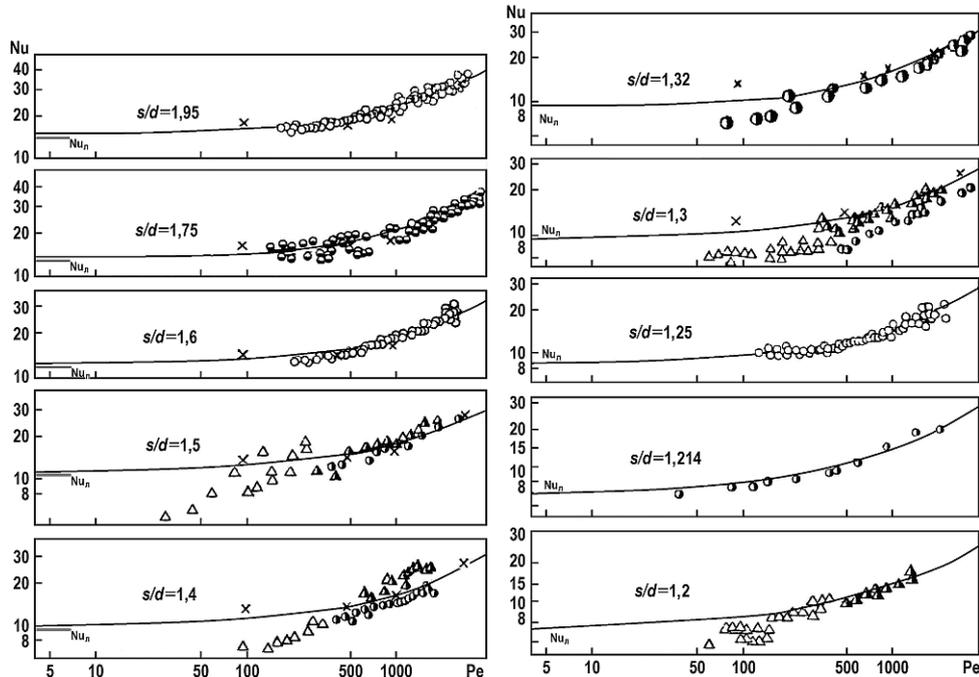


Рис. 1. Сравнение расчетных (линии) и экспериментальных (символы) данных по теплообмену жидких металлов в раздвинутых гладких правильных решетках стержней (сплошная линия – расчет по формуле (5)) [5 – 7]

Отметим, что формула (7) получена для неравномерностей температуры по периметру гладких твэлов, расположенных в тесной решетке ( $1,0 \leq x \leq 1,15$ ), где велико влияние друг на друга соседних твэлов и когда неравномерности температуры в значительной мере определяются эквивалентной теплопроводностью твэлов (параметром  $\epsilon$ ). В раздвинутых решетках твэлов неравномерности температуры практически отсутствуют.

## 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, разработанными в ГНЦ РФ-ФЗИ [6 – 9]. Она представляет собой сборку 37-ми электрообогреваемых имитаторов твэлов (с дистанционирующими винтовыми навивками на имитаторах, выполненными по принципу касания друг с другом «ребро по ребру»), расположенных в треугольной решетке с относительным шагом  $s/d = 1,33$  и размещенных в шестигранном чехле без вытеснителей на периферии.

На поверхности измерительных (поворотных) имитаторов твэлов в продольных пазах, выфрезерованных в стенке, заделываются на различных расстояниях от начала энерговыделения 12 микротермопар (равномерно по всей области энерговыделения). Они располагаются по периметру имитатора с шагом  $30^\circ$ . Поворот имитатора в интервале углов  $0 - 360^\circ$  позволяет измерять распределение температур по 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-ти термомпар, заделанных в стенке имитатора, проходит участок периметра под ребром и измеряет температуру под ним.

Измеряется температура поверхности теплообмена измерительных имитаторов твэлов 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, имеющий число Прандтля, близкое по своему численному значению к числу Прандтля свинца, используемого в качестве теплоносителя в реакторе БРЕСТ-ОД-300 (один из принципов теплового моделирования [5, 8, 9]).

### Подъемы температуры под ребрами. Общая неравномерность температуры по периметру измерительных имитаторов твэлов

В начале зоны энерговыделения расположение подъемов температуры под ребрами для центрального имитатора (рис. 2) – примерно через  $180^\circ$ , далее (по высоте) этот интервал ( $180^\circ$ ) прослеживается примерно, проявляются дополнительные максимумы от соседних ребер, численные значения которых могут быть значительными.

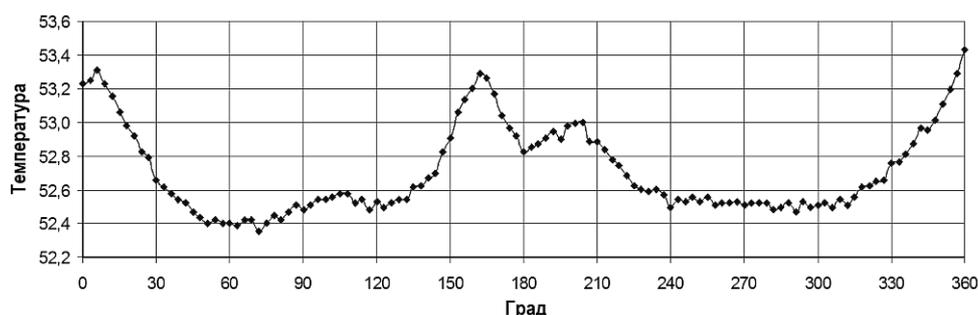


Рис. 2. Температурное поле центрального имитатора твэла модельной сборки в начале зоны энерговыделения для одного из экспериментальных режимов

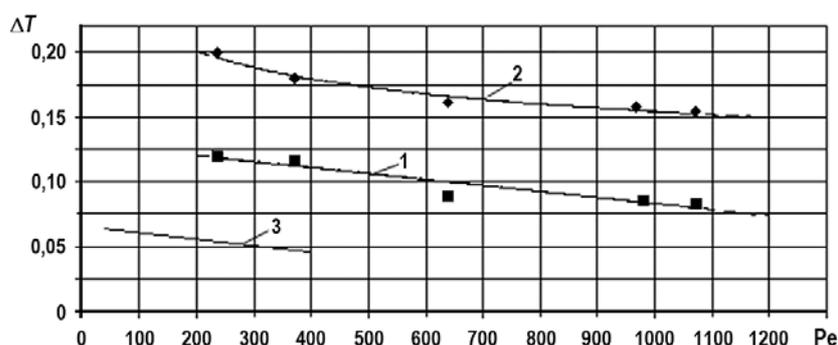


Рис. 3. Безразмерные подъемы температуры под ребрами и общие неравномерности температуры для центрального имитатора твэла модельной сборки: 1 – подъемы температуры под ребрами центрального имитатора; 2 – общая неравномерность температуры; 3 – подъемы температуры под ребрами дляборок  $s/d = 1,08 - 1,10$ , рассчитанные по формулам работы [11]; - - - - аппроксимация на диапазон чисел Пекле, выходящий за интервал опытных исследований

Для бокового и углового имитаторов твэлов быстро развивается общая неравномерность температуры (разница между максимальным и минимальным ее значением по периметру имитатора), численное значение которой сильно увеличивается благодаря подъемам температуры под ребрами, если их положение приходится на центральную область сборки.

Построены зависимости и получены формулы для подъемов температуры под ребрами и общих неравномерностей температуры в безразмерном виде для различных имитаторов твэлов (рис. 3) [10].

### Теплоотдача

Экспериментальные данные по теплоотдаче для центрального имитатора твэла представлены на рис. 4. Сравнивая экспериментальные данные для центрального имитатора с формулой для гладких твэлов (1), получаем [11]

$$Nu_{ц} = Nu \cdot f(Re), \quad (8)$$

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

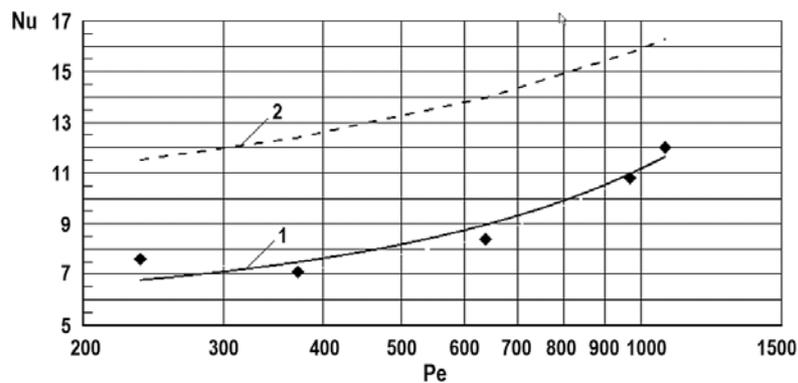


Рис. 4. Зависимость чисел Нуссельта от чисел Пекле для центрального имитатора твэла в модельных сборках:  $\blacklozenge$  – экспериментальные данные; 1 – аппроксимация по соотношению (8) для оребренного имитатора твэла; 2 – зависимость по числам Нуссельта для решеток гладких твэлов с  $s/d = 1,33$  (5)

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. Играет роль особенность оребренных систем, охлаждаемых жидкими металлами: теплоотдача падает из-за неравномерностей температуры под ребрами, так как эффект турбулизации ребрами жидкого металла оказывается небольшим по сравнению с подъемами температуры под ребрами. С увеличением  $Re$  влияние подъемов температуры под ребрами на теплоотдачу уменьшается (роль турбулентности растет), поэтому падение коэффициентов теплоотдачи оребренных твэлов по сравнению с гладкими каналами становится меньше. Если при  $Re \approx 1000$  падение составляет примерно 40%, то при  $Re \approx 2300$  теплоотдача оребренных и гладких твэлов сравнивается, т.е. при данном числе  $Re$ , по-видимому, турбулентность жидкометаллического потока и подъемы температуры под дистанционирующими ребрами компенсируют друг друга.

## ТЕПЛОТДАЧА И ТЕМПЕРАТУРНЫЕ ПОЛЯ В РЕШЕТКАХ ТВЭЛОВ, ДИСТАНЦИОНИРУЕМЫХ ПОПЕРЕЧНЫМИ РЕШЕТКАМИ

### Модельная ТВС с дистанционирующими решетками

Эксперименты по изучению температурных полей и теплоотдачи твэлов с дистанционирующими решетками выполнялись на 37-стержневой модельной сборке ( $s/d = 1,33$ ), которая описана в предыдущем разделе, но вместо ребер дистанционирование осуществлялось поперечными решетками (четыре штуки по длине энерговыделения). Термопары в центральном измерительном имитаторе твэла наиболее часто заделаны в области третьей решетки, что позволяет изучить ее влияние на теплоотдачу. На рисунке 5 представлено поперечное сечение модельной сборки с конструкцией дистанционирующей решетки.

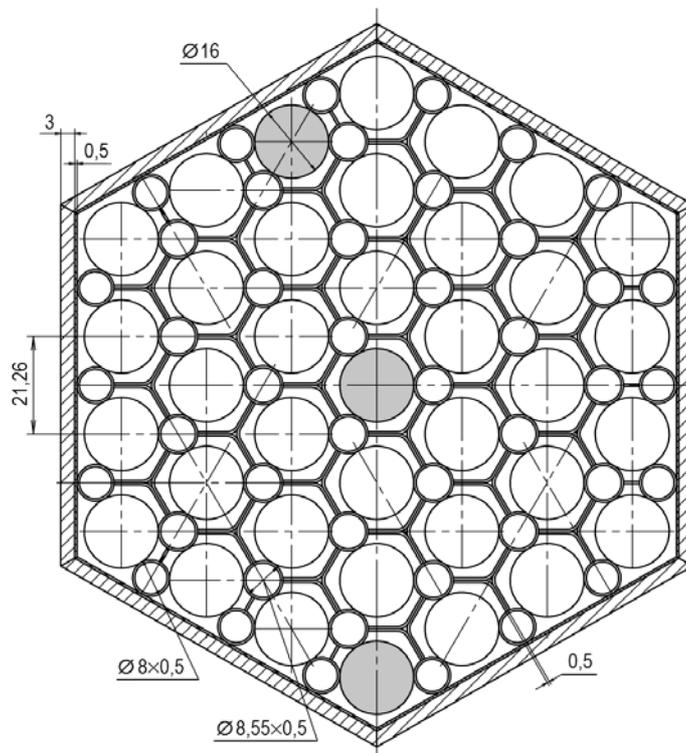


Рис. 5. Поперечное сечение модельной сборки в области дистанционирующей решетки

### Результаты экспериментов в модельной ТВС с дистанционирующими решетками

Обработка экспериментальных данных велась 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.

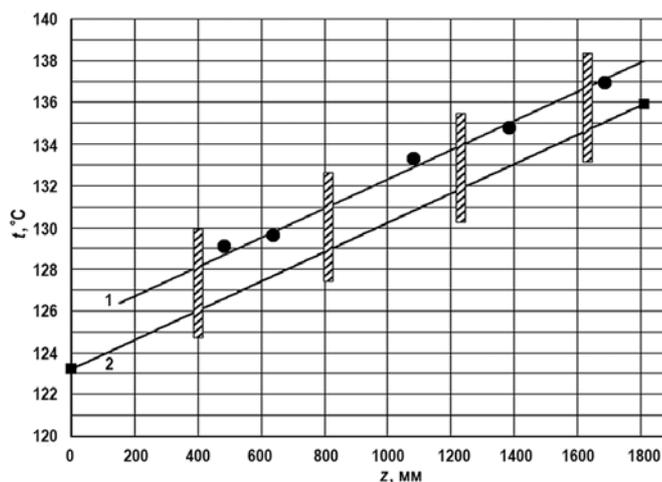


Рис. 6. Изменение температурного напора «стенка-жидкость» по длине энерговыделения центрального имитатора твэла, дистанционируемого решетками, по показаниям термопар, расположенных между решетками, для одного из экспериментальных режимов: 1 – температура стенки без поправки на заделку термопар; 2 – температура жидкости

Полученная зависимость для чисел Нуссельта в гладкой области имитаторов твэлов

с шагом  $s/d = 1,33$ , дистанционируемых поперечными решетками, в исследованном диапазоне чисел Пекле описывается формулой

$$Nu_{г\ell} = A + B \cdot Pe^c, \quad 200 \leq Pe \leq 1150. \quad (9)$$

что соответствует общему виду зависимостей  $Nu(Pe)$  в решетках твэлов (1), охлаждаемых жидкими металлами.

Эксперименты показали, что 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 близок к температурному напору для гладких областей имитаторов, то внутри решетки он уменьшается и особенно малым становится у верхнего торца решетки из-за ее турбулизирующего воздействия на поток теплоносителя. Здесь наблюдается наибольшее увеличение теплоотдачи. На рисунке 7 представлено сравнение локальных чисел Нуссельта в районе дистанционирующей решетки (до, после и внутри решетки).

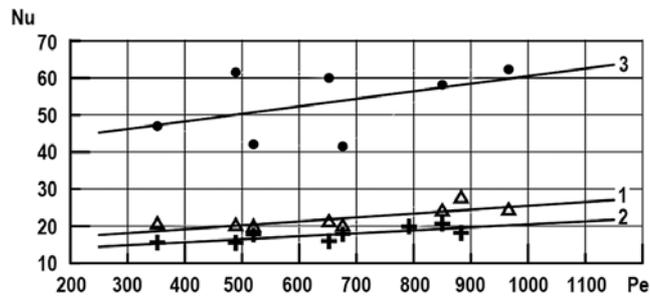


Рис. 7. Сравнение локальных чисел Нуссельта для центрального имитатора твэла в модельной сборке с дистанционирующими решетками с  $s/d = 1,33$ : 1 – числа Нуссельта внутри дистанционирующей решетки; 2 – числа Нуссельта непосредственно до дистанционирующей решетки; 3 – числа Нуссельта непосредственно после дистанционирующей решетки

**Сравнение теплоотдачи и температурных полей в решетках твэлов, дистанционируемых винтовыми навивками типа «ребро по ребру» и твэлов, дистанционируемых поперечными решетками ( $s/d = 1,33$ )**

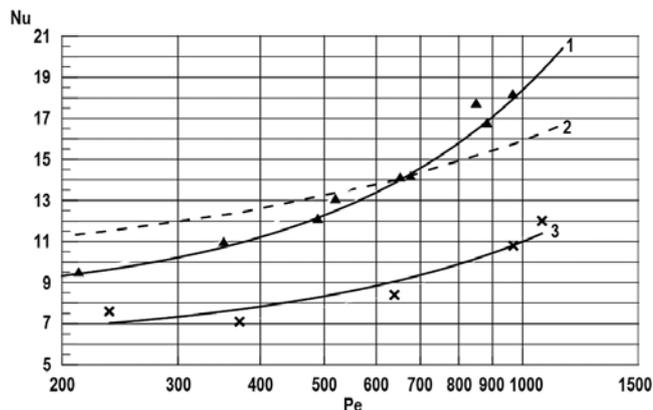


Рис. 8. Зависимость чисел Нуссельта от чисел Пекле для центрального имитатора твэла в модельных сборках твэлов с  $s/d = 1,33$ : 1 – экспериментальные точки по числам Нуссельта в гладкой области имитаторов твэлов, дистанционируемых поперечными решетками, с аппроксимирующей кривой, описываемой формулой (9); 2 – зависимость по числам Нуссельта для решеток гладких твэлов с  $s/d = 1,33$ , рассчитанная по формуле (5); 3 – зависимость по числам Нуссельта для имитаторов твэлов с двухзаходным оребрением «ребро по ребру» [10]

На рисунке 8 приведено сравнение теплоотдачи в решетках гладких твэлов и твэлов с различным типом дистанционирования («ребро по ребру» и дистанционирующие решетки).

Можно считать, что в исследованном диапазоне чисел Пекле влияние дистанционирующих решеток на твэлы невелико (между решетками сравнительно небольшое расстояние и их толщина невелика), в результате чего полученные числа  $Nu$  практически совпали с числами  $Nu$  для решеток гладких твэлов с шагом  $s/d = 1,33$  (пунктирная линия на рис. 8). Отличие теплоотдачи для решеток гладких твэлов и теплоотдачи в гладкой области имитаторов твэлов, дистанционируемых поперечными решетками друг от друга, составило  $\sim \pm 20\%$  при  $Pe = 1150$  и  $Pe = 200$  соответственно. При  $Pe \cong 650$  имеет место совпадение результатов.

Таким образом, расчеты при  $200 \leq Pe \leq 1150$  для гладких областей твэлов, дистанционируемых поперечными решетками, можно проводить по формуле для гладких твэлов (5) или по вновь полученной формуле вида (9).

Данные по числам Нуссельта (при относительном шаге  $s/d = 1,33$ ) при двухзаходном оребрении твэлов (см. рис. 8) лежат существенно ниже. Это объясняется большими азимутальными неравномерностями температуры по сравнению с рассмотренными случаями (как отмечалось, в широких решетках гладких твэлов, охлаждаемых жидким металлом, неравномерности температуры по периметру твэлов отсутствуют, что приводит к высокой теплоотдаче). В сборке с дистанционирующими решетками азимутальные неравномерности температуры значительно меньше (при больших числах Пекле – почти в два раза), чем в случае дистанционирования твэлов винтовыми навивками «ребро по ребру».

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

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Проведенный анализ указывает на полученные ранее надежные соотношения для расчета теплообмена в каналах и пучках гладких твэлов в идеализированных условиях «чистого» теплоносителя. Полученные вновь данные по теплообмену в ТВС с широкой решеткой, характерной 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.

Для проведения корректного расчета температурных режимов твэлов в областях неоднородностей геометрии и энерговыделения в ТВС активной зоны, для верификации теплогидравлических кодов также необходимо иметь данные по перемешиванию жидкометаллического теплоносителя в ТВС для различных типов дистанционирования твэлов, по температурным полям в указанных выше областях ТВС. Актуальны задача создания баз данных по теплогидравлике активной зоны реакторов с жидкометаллическим охлаждением, разработка системы верификационных тестов и проведение на этой основе верификации расчетных теплогидравлических кодов [12].

## **Литература**

1. Адамов Е.О., Джалавян А.В., Лопаткин А.В. и др. Концептуальные положения стратегии и развития ядерной энергетики России в перспективе до 2100 г. // Атомная энергия. – 2012. – Т. 112. – Вып. 6. – С. 319-330.
2. Рачков В.И. Атомная энергетика как важнейший фактор устойчивого развития России в XXI веке // Энергоснабжение и водоподготовка. – 2006. – №6. – С. 2-4.

3. Жуков А.В., Сорокин А.П., Ефанов А.Д., Кузина Ю.А. Температурные режимы твэлов корабельных ядерных установок с жидкометаллическим охлаждением // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2007. – №1. – С. 56-68.
4. Кириллов П.Л., Бобков В.П., Жуков А.В., Юрьев Ю.С. Справочник по теплогидравлическим расчетам в ядерной энергетике. Том 1. Теплогидравлические процессы в ЯЭУ / Под общей ред. П.Л. Кириллова. – М: Изд. АТ. – 2010.
5. Жуков А.В., Кузина Ю.А., Сорокин А.П., Привезенцев В.В. Работы по реализации программы теплогидравлических исследований в РУ БРЕСТ и СВБР / Научно-технический сборник «Итоги научно-технической деятельности Института ядерных реакторов и теплофизики за 2011 год». – Обнинск: ГНЦ РФ-ФЭИ, 2012. – С. 211-226.
6. 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. 435 с.
7. Жуков А.В., Кириллов П.Л., Матюхин Н.М., Сорокин А.П. Теплогидравлический расчет ТВС быстрых реакторов с жидкометаллическим охлаждением. – М.: Энергоатомиздат. – 1985.
8. Субботин В.И., Ибрагимов М.Х., Ушаков П.А. Гидродинамика и теплообмен в атомных энергетических установках (основы расчета). – М.: Атомиздат. – 1975.
9. Ушаков П.А. Приближенное тепловое моделирование цилиндрических тепловыделяющих элементов / Жидкие металлы. – М.: Атомиздат. – 1967.
10. Жуков А.В., Кузина Ю.А., Сорокин А.П. Проблемы и особенности теплообмена и температурных полей твэлов реакторов с тяжелым теплоносителем / Сб. тез. докладов конференции «Теплофизика реакторов на быстрых нейтронах (Теплофизика-2013)». – Обнинск, ГНЦ РФ-ФЭИ. – 2013. – С. 97-99.
11. LMR core and heat exchanger thermohydraulic design: Former USSR and present Russian approaches. IAEA-TECDOC-1060. – Vienna: IAEA. – 1999.
12. Жуков А.В., Кузина Ю.А., Сорокин А.П. Анализ бенчмарк-эксперимента по гидравлике и теплообмену в сборке имитаторов твэлов с жидкометаллическим охлаждением // Атомная энергия. – 2005. – Т. 99. – Вып. 5. – С. 336-348.

Поступила в редакцию 25.01.2015 г.

#### **Авторы**

Жуков Альберт Владимирович, ведущий научный сотрудник, профессор,  
доктор техн. наук  
E-mail: ukyzina@ippe.ru.

Кузина Юлия Альбертовна, ведущий научный сотрудник, доцент, канд. техн. наук,  
E-mail: ukyzina@ippe.ru.

Сорокин Александр Павлович, заместитель директора, доктор техн. наук,  
E-mail: sorokin@ippe.ru.

Привезенцев Виталий Владимирович, начальник лаборатории, канд. техн. наук,  
E-mail: privezentsev@ippe.ru

УДК 621.039.546

## TEMPERATURE FIELDS AND HEAT TRANSFER IN FREE-PACKED PIN BUNDLES COOLED BY HEAVY LIQUID-METAL

Zhukov A.V., Kuzina Ju.A., Sorokin A.P., Privezentsev V.V.

JSC «SSC RF – Institute for Physics and Power Engineering»,  
1 Bondarenko sq., Obninsk, Kaluga reg., 249033 Russia

### ABSTRACT

In the paper heat transfer and temperature fields in free-packed pin bundles with heavy liquid-metal coolant are considered at various spacing ways. Experimental data for three pin bundles are analyzed for pitch of  $s/d = 1.33$ : a bundle of smooth fuel pins, a bundle of fuel pins spaced by bilifar-helix wire wrapper of «wire to wire» type and a bundle with spacer grids.

In the free-packed bundles of smooth fuel pins temperature non-uniformities over the perimeter of fuel pins are absent [1, 2] as opposed to high general temperature non-uniformities over the perimeter of fuel pins in the bundles with wire wrapping. Such high non-uniformities result in considerable decrease of heat transfer coefficients [3].

In the bundles with transverse spacer grids heat transfer increases only in the region of grids, but between them it is approximately equal to heat transfer coefficients in bundles of smooth fuel pins.

The correlations recommended for calculations of Nusselt numbers and temperature non-uniformities over the perimeter of fuel pins are given for the above-mentioned ways of spacing of fuel pins.

**Key words:** liquid-metal coolant, model fuel assembly, experiment, smooth fuel pins, spacer grids, helical wires, temperature field, Nusselt number, temperature non-uniformities.

### REFERENCES

1. Adamov E.O., Dzhalyovyan A.V., Lopatkin A.V., Molokanov N.A., Murav'ev E.V., Orlov V.V., Kalyakin S.G., Rachkov V.I. Konceptual'nyye polozheniya strategii razvitiya yadernoj energetiki Rossii v perspektive do 2100 g. [Conceptual development strategy of Russian nuclear power in the run up to 2100]. *Atomnaya energiya*. 2012, v. 112, iss. 6, pp. 319–330.
2. Rachkov V.I. Atomnaya energetika kak vazhnejshij factor ustojchivogo razvitiya Rossii v XXI veke [Nuclear energy as an important factor for sustainable development of Russia in XXI century]. *Energoberezhenie i vodopodgotovka*. 2006, no. 6, pp. 2–4.
3. Zhukov A.V., Sorokin A.P., Efanov A.D., Kuzina J.A. Temperaturnye rezhimy tvelov korabel'nyh yadernyh ustanovok s zhidkometallicheskim ohlazhdeniem [Temperature regimes of ship fuel elements of nuclear facilities with liquid cooling]. *Izvestiya vuzov. Yadernaya energetika*. 2007, no. 1, pp. 56–68.
4. Kirillov P.L., Bobkov V.P., Zhukov A.V., Yuriev Yu.S. Spravochnik po teplogidravlicheskim raschetam v yadernoj energtike. Tom 1. Teplogidravlicheskie processy v YaEU. Ed. Kirillov P.L. [Handbook of thermohydraulic calculations in nuclear power engineering. 1. Thermo hydraulic processes in power reactor facilities]. Moscow, AT Publ. 2010 (in Russian).
5. Zhukov A.V., Kuzina J.A., Sorokin A.P., Privezentsev V.V. Raboty po realizacii programmy teplogidravlicheskih issledovanij v RU BREST i SVBR. Nauchno-tehnicheskij sbornik «Itogi nauchno-tehnicheskij deyatelnosti Instituta yadernyh reaktorov i teplofiziki za 2011 god» [Realization works on thermohydraulic investigations for BREST and SVBR reactors]. Obninsk, SSC RF-IPPE Publ. 2012, pp. 211–226 (in Russian).
6. Metodicheskie ukazaniya i rekomendacii po teplogidravlicheskomu raschetu aktivnyh zon bystryh reaktorov. Ed. Zhukov A.V., Sorokin A.P. [Guidelines and recommendations for thermohydraulic calculation of fast reactor cores]. RTM 1604.008-88. Obninsk, SSC RF-IPPE Publ. 1989, 435 p. (in Russian).

7. Zhukov A.V., Kirillov P.L., Matyuhin N.M. Teplogidravlicheskiy raschet TVS bystryh reaktorov s zhidkometallicheskim ohlazhdeniem. [Thermohydraulic calculation of fuel assemblies in fast reactors with liquid cooling.]. Moscow. Energoatomizdat Publ. 1985. (in Russian)
8. Subbotin V.I., Ibragimov M.H., Ushakov P.A., Bobkov V.P., Zhukov A.V., Yur'ev Yu.S. Gidrodinamika i teploobmen v atomnyh energeticheskikh ustanovkakh (osnovy rascheta) [Hydrodynamics and heat transfer in nuclear power plants (basis of calculation).]. Moscow, Atomizdat Publ. 1975 (in Russian).
9. Ushakov P.A. Priblizhennoe teplovoe modelirovanie cilindricheskikh teplovydelyayuschih elementov. Zhidkie metally [Approximate thermal modeling of cylindrical fuel elements. Liquid metals]. Moscow, Atomizdat Publ. 1967 (in Russian).
10. Zhukov A.V., Kuzina Ju.A., Sorokin A.P. Problemy i osobennosti teploobmena i temperaturnyh polej tvelov reaktorov s tyazhyolym teplonositelem [Problems and features of heat transfer and temperature fields of fuel pins of reactors with heavy coolant]. Sb. tez. dokl. konferencii «Teplofizika reaktorov na bystryh nejtronah» (Teplofizika-2013). Obninsk, SSCRF-IPPE Publ. 2013, pp. 97-99 (in Russian).
11. LMR core and heat exchanger thermohydraulic design: Former USSR and present Russian approaches. IAEA-TECDOC-1060. Vienna, IAEA. 1999.
12. Zhukov A.V., Kuzina Ju.A., Sorokin A.P. Analiz benchmark-eksperimenta po gidravlike i teploobmenu v sborke imitatotov tvelov s zhidkometallicheskim ohlazhdeniem [Analysis of the benchmark-experiment on heat transfer and hydraulics in the model pin bundles with liquid metal coolant]. *Atomnaya energiya*. 2005, v. 99, no. 5, pp. 336-348.

#### **Authors**

Zhukov Albert Vladimirovich, Leading Researcher, Dr. Sci. (Engineering), Professor  
E-mail: ukyzina@ippe.ru.

Kuzina Juliya Al'bertovna, Leading Researcher, Cand. Sci. (Engineering), Associate professor  
E-mail: ukyzina@ippe.ru.

Sorokin Alexandr Pavlovich, Deputy Director, Dr. Sci. (Engineering)  
E-mail: sorokin@ippe.ru

Privezentsev Vitalij Vladimirovich, Head of Laboratory, Cand. Sci. (Engineering),  
E-mail: privezentsev@ippe.ru