

ТЕПЛООБМЕН И ТЕМПЕРАТУРНЫЕ ПОЛЯ В АКТИВНОЙ ЗОНЕ РЕАКТОРА БРЕСТ НА БЫСТРЫХ НЕЙТРОНАХ СО СВИНЦОВЫМ ОХЛАЖДЕНИЕМ

Ю.А. Кузина*, А.В. Жуков*, А.П. Сорокин*, А.И. Филин**,

В.П. Смирнов**, В.Н. Леонов**, А.Г. Сила-Новицкий**

* ГНЦ РФ-Физико-энергетический институт им. А.И. Лейпунского, г. Обнинск

** НИКИЭТ, г. Москва



Рассматриваются результаты теплогидравлических исследований для опытного демонстрационного реактора на быстрых нейтронах БРЕСТ-ОД-300 со свинцовым охлаждением. Даются обобщенные рекомендации (формулы, графические зависимости) для расчета чисел Нуссельта и неравномерностей температуры по периметру твэлов этого реактора для ряда случаев, представляющих наибольший практический интерес при теплогидравлическом обосновании активной зоны реактора

ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЙ

Концептуальные проработки быстрых реакторов, охлаждаемых свинцом, показали перспективность этого направления в плане создания реакторов, обладающих свойствами повышенной безопасности [1, 2]. Учитывая низкий уровень коэффициентов теплоотдачи в свинцовом теплоносителе по сравнению с натрием (реакторы типа БН), а также практически неисследованную квадратную решетку твэлов, используемую в этих реакторах, представляется необходимым проведение исследований влияния на коэффициенты теплоотдачи числа Пекле (Pe), относительного шага твэлов (s/d), дистанционирующих решеток, переменного по длине и радиусу активной зоны энерговыделения и других факторов, характерных для реактора типа БРЕСТ.

ПОСТАНОВКА ИССЛЕДОВАНИЙ И МОДЕЛИРОВАНИЕ

Экспериментальные исследования коэффициентов теплоотдачи и температурных полей твэлов применительно к реакторам типа БРЕСТ были проведены на *теплогидравлических моделях* одинаковой конструкции, отличающихся шагом имитаторов твэлов ($s/d=1,46$; 1,28 и 1,25), а также наличием или отсутствием дистанционирующих решеток. Модели представляют собой сборки 25 имитаторов твэлов, расположенных в квадратной решетке и помещенных в прямоугольную обечайку (рис. 1, а, б). В центральном имитаторе, выполненном поворотным, проводились измерения температуры поверхности по периметру и длине имитатора микротермопарами, зачеканенными на поверхности или выполненными подвижными по длине энерговыделения. Температура теплоносителя измерялась во всех ячейках на выходе из пучка модели, а

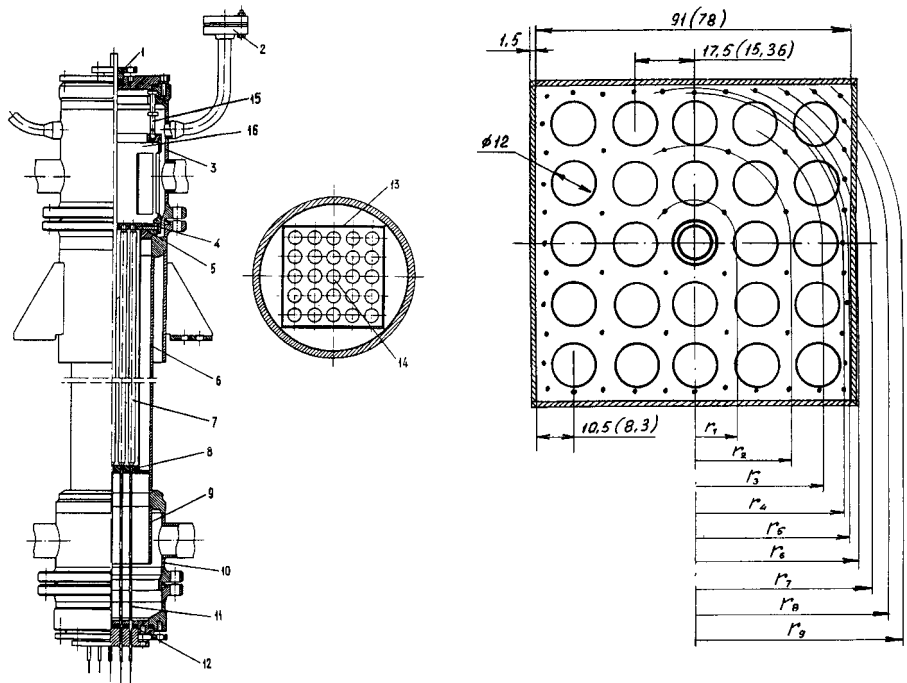


Рис. 1. Общий вид а) и поперечное сечение б) экспериментальной модельной ТВС с однородной решеткой имитаторов твэлов: 1 – сальниковое уплотнение; 2 – вывод термопар; 3, 10 – верхний и нижний коллекторы; 4 – термопарная решетка; 5, 8 – верхняя и нижняя центрирующие решетки; 6 – корпус модели; 7 – имитаторы твэлов; 9 – направляющий стакан; 11 – токоподвод; 12 – уплотнение токоподводов; 13 – квадратная обечайка (чехол); 14 – поворотный (измерительный) имитатор твэла; 15 – упорный болт; 16 – стакан; $r_1 - r_9$ – радиусы, на которых расположены равноудаленные от центра сборки термопары

также на входе и выходе модели в коллекторах.

В качестве *моделирующего теплоносителя* использовался эвтектический сплав натрия с калием (22% Na + 78% K), имеющий число Прандтля, близкое по своему

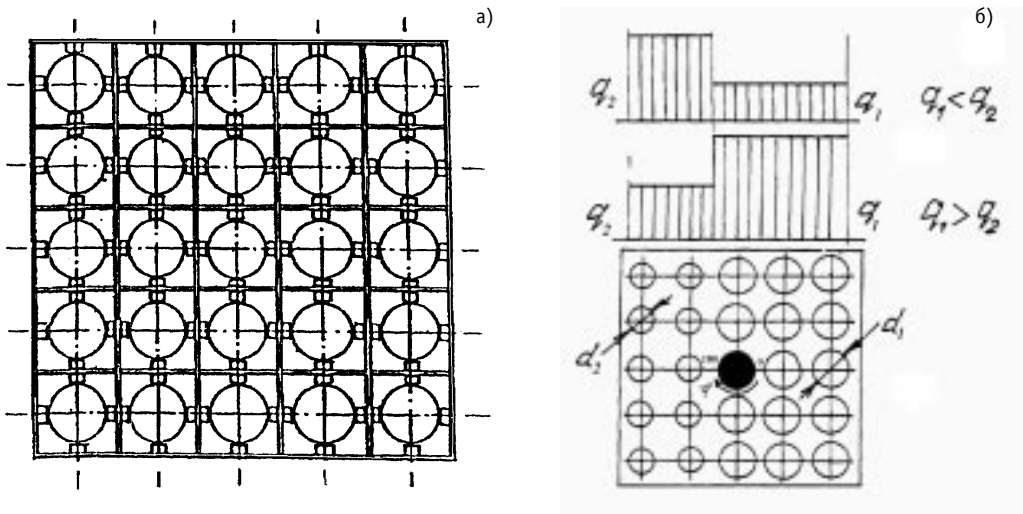


Рис. 2. Дистанционирующая решетка в сборке а); схема поперечного сечения модельной сборки с двумя группами имитаторов твэлов разного диаметра ($d_1 > d_2$) при разных тепловых потоках по группам имитаторов б)

численному значению к числу Прандтля свинца. Это обуславливало идентичность процессов теплообмена, протекающих на границе раздела «твэл - теплоноситель» в случае «чистоты» рассматриваемых теплоносителей и отсутствия термохимических явлений на поверхности теплообмена.

Тепловое моделирование твэлов реактора БРЕСТ-ОД-300 (делящийся материал - мононитрид урана или плутония, оболочка - нержавеющая сталь, прослойка - свинец) осуществлялось довольно строго (точность - 5%) по четвертой гармонике разложения температурного поля в ряд Фурье ($\kappa_0 = 4$), являющейся основной гармоникой для регулярной квадратной решетки твэлов.

Дистанционирование имитаторов осуществлялось верхней и нижней торцевыми решетками (гладкий вариант имитаторов твэлов) и дополнительно одной или двумя *дистанционирующими решетками* (рис. 2, а), расположенными от начала энерговыделения на расстоянии $l_p = 372$ и 672 мм соответственно. Обогреваемая длина сборки составляет 960 мм.

ПОЛУЧЕННЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Однородная модельная сборка

Стабилизированные по длине числа Нуссельта для гладких твэлов описываются формулой [3 - 5]

$$Nu = 7,55 s/d - 14(s/d)^{-5} + 0,007 Pe^{0,64+0,246 s/d} \quad (1)$$

$$1,20 \leq s/d \leq 1,50; 10 \leq Pe \leq 2500.$$

Для твэлов с одной дистанционирующей решеткой формула для чисел Nu аналогична формуле (1), но имеет другой коэффициент при числе Pe [4-7]:

$$Nu = 7,55 s/d - 14(s/d)^{-5} + a Pe^{0,64+0,246 s/d}, \quad (2)$$

где $a=0,01$ для степени затеснения проходного сечения ТВС дистанционирующей решеткой $\varepsilon_p = 10\%$ и $a = 0,009$ для $\varepsilon_p = 20\%$.

Важным фактором в температурном поле по длине твэлов является отсутствие перегрева стенки имитатора твэла под дистанционирующей решеткой; более того, в районе решетки наблюдается снижение температуры стенки, причем при $\varepsilon_p = 20\%$ происходит более заметное, чем при $\varepsilon_p = 10\%$, понижение температуры стенки имитатора в районе решетки (рис. 3).

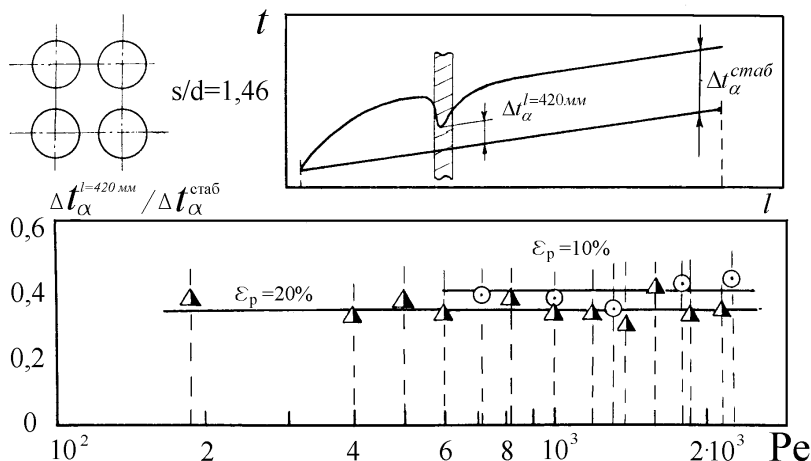


Рис. 3. Сравнение температурных напоров в районе дистанционирующей решетки ($\Delta t_{\alpha}^{l=420 \text{ мм}}$) по отношению к стабилизированным значениям температурных напоров ($\Delta t_{\alpha}^{\text{стаб}}$) при различных числах Pe в сборках с дистанционирующими решетками $\varepsilon_p = 20$ (Δ) и 10% (\odot)

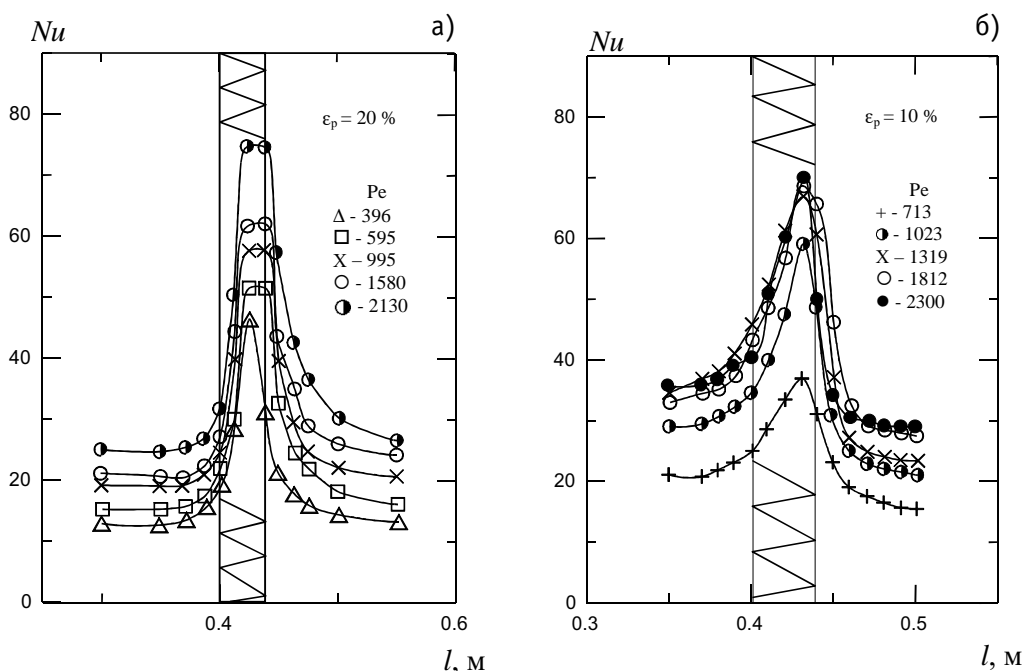


Рис. 4. Локальные значения чисел Нуссельта в районе дистанционирующей решетки с $\varepsilon_p = 20\%$ а) и $\varepsilon_p = 10\%$ б)

В связи с этим в районе решетки происходит рост коэффициентов теплоотдачи (рис. 4, а, б). При этом распределения локальных чисел Нуссельта в зоне решетки с $\varepsilon_p = 20\%$ (рис. 4, а) более симметричны, чем в случае $\varepsilon_p = 10\%$ (рис. 4, б).

Теплоотдача твэлов с двумя дистанционирующими решетками ($\varepsilon_p = 20\%$) несколько выше (примерно на 15%) теплоотдачи для твэлов с одной дистанционирующей решеткой [8]. Для исследованного диапазона чисел Пекле рекомендуется универсальная критериальная зависимость (2), в которой коэффициент a для рассматриваемого случая составляет 0,0115.

В области малых чисел Пекле происходит предельный переход чисел Нуссельта к значениям, отвечающим ламинарному режиму течения теплоносителя в сборках твэлов без дистанционирующих решеток. Согласно соотношению (2) рост теплоотдачи по мере перехода от чисто гладких твэлов к твэлам с одной, а затем с двумя дистанционирующими решетками происходит, как уже отмечалось, за счет турбулентной составляющей в числе Нуссельта, что отражается значениями коэффициента a для одной ($a=0,009$) или двух ($a=0,0115$) дистанционирующих решеток по сравнению с гладкими твэлами ($a=0,007$). При малых скоростях течения теплоносителя эффект от наличия дистанционирующих решеток (одной или нескольких) в отношении теплоотдачи практически отсутствует.

Неоднородная модельная сборка с одной дистанционирующей решеткой

Основные закономерности в температурных полях измерительного имитатора твэла, расположенного на границе зон с различными диаметрами и мощностями имитаторов (рис. 2, б) [9, 10], рассмотрим на примере опыта с малым расходом теплоносителя ($Re = 3030$) и большим отношением мощностей по зонам ($N_{15}/N_{10} = 2,0$), когда характерные закономерности проявляются наиболее четко.

Периодическая неравномерность температуры. На малых расстояниях от начала энерговыделения (до дистанционирующей решетки) подогревы теплоносителя в ячей-

ках вокруг измерительного имитатора отличаются несильно даже при большом различии (в 2 раза) мощностей имитаторов в зонах с $s/d_1=1,25$ и $s/d_2=1,46$, что создает условия для проявления периодических неравномерностей температуры по периметру имитатора. Безразмерные неравномерности температуры, приведенные к ячейке $0 - 45^\circ$, изменяются по косинусоидальному закону и не выявляют какой-либо определенной зависимости от величины скачка энерговыделения. Размерные неравномерности зависят от скачка энерговыделения по зонам, т.к. изменение относительного энерговыделения N_{15}/N_{10} предполагает изменение величины удельного теплового потока на поверхности смежных имитаторов твэлов.

Общая неравномерность температуры. В позиции термопары № 3 (и далее по зоне энерговыделения) проявляется общая неравномерность температуры по периметру, обусловленная разностью подогревов теплоносителя в “пограничных” ячейках при отличающихся мощностях имитаторов в зонах.

Общая неравномерность температуры по периметру измерительного имитатора определяется разностью температур в точках периметра $\varphi=0$ и 180° (максимум – при $\varphi=0^\circ$, минимум – при $\varphi=180^\circ$) (рис. 5, а). И наоборот, если мощность в зоне с $s/d_2=1,46$ значительно превышает мощность в зоне с $s/d_1=1,25$ ($N_{10}/N_{15}=2$ – скачок энерговыделения, “обратный” рассматриваемому скачку), то общая неравномерность температуры определяется максимумом при $\varphi=180^\circ$ и минимумом при $\varphi=0^\circ$.

В некоторых режимах работы модельной сборки (особенно при переходном течении теплоносителя от ламинарного к турбулентному) имеет место эффект “смещения” максимума температуры по периметру имитатора в разных сечениях по длине зоны энерговыделения (рис. 5, б)*: термopapa № 8 фиксирует профиль с максимумом при $\varphi=0^\circ$, термopapa № 9 – при $\varphi=60^\circ$; № 10 – при $\varphi=120^\circ$ и т.д. (увеличение

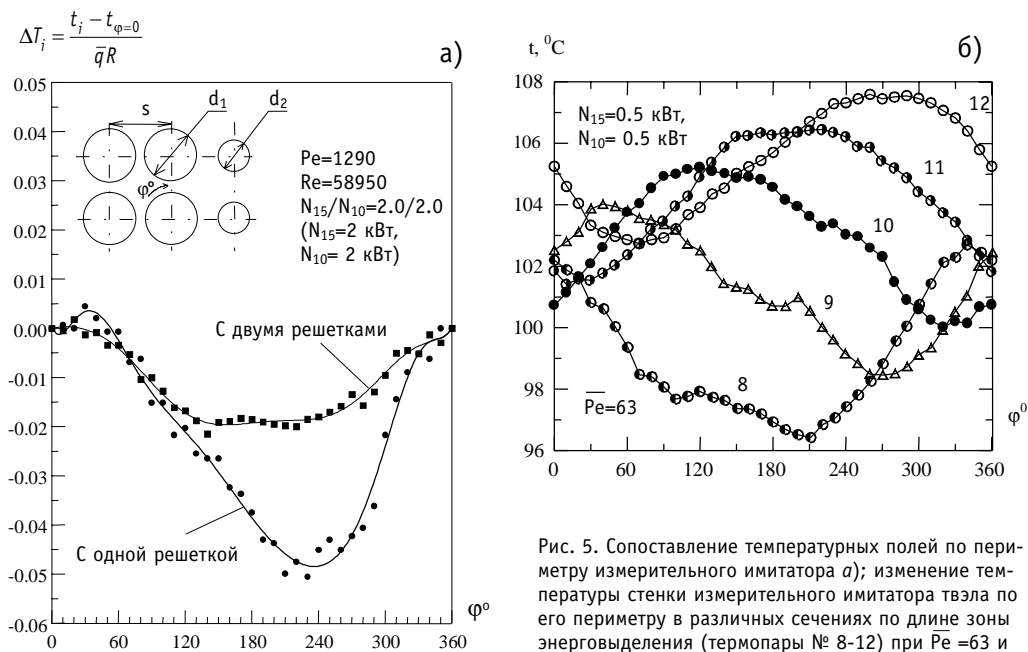


Рис. 5. Сопоставление температурных полей по периметру измерительного имитатора а); изменение температуры стенки измерительного имитатора твэла по его периметру в различных сечениях по длине зоны энерговыделения (термopapa № 8-12) при $Pe=63$ и $N_{15}/N_{10}=1,0$ б): R – внешний радиус оболочки твэла; \bar{q} – средний по его периметру тепловой поток

*) Используемые на рис. 5, б и далее (рис. 6, 7) числа \bar{Pe} и \bar{Re} рассчитаны по средней скорости \bar{w} по сечению сборки и гидравлическому диаметру регулярной ячейки в зоне $s/d_1=1,25$. Скорость в ячейке $s/d_1=1,25$ практически равна скорости \bar{w}

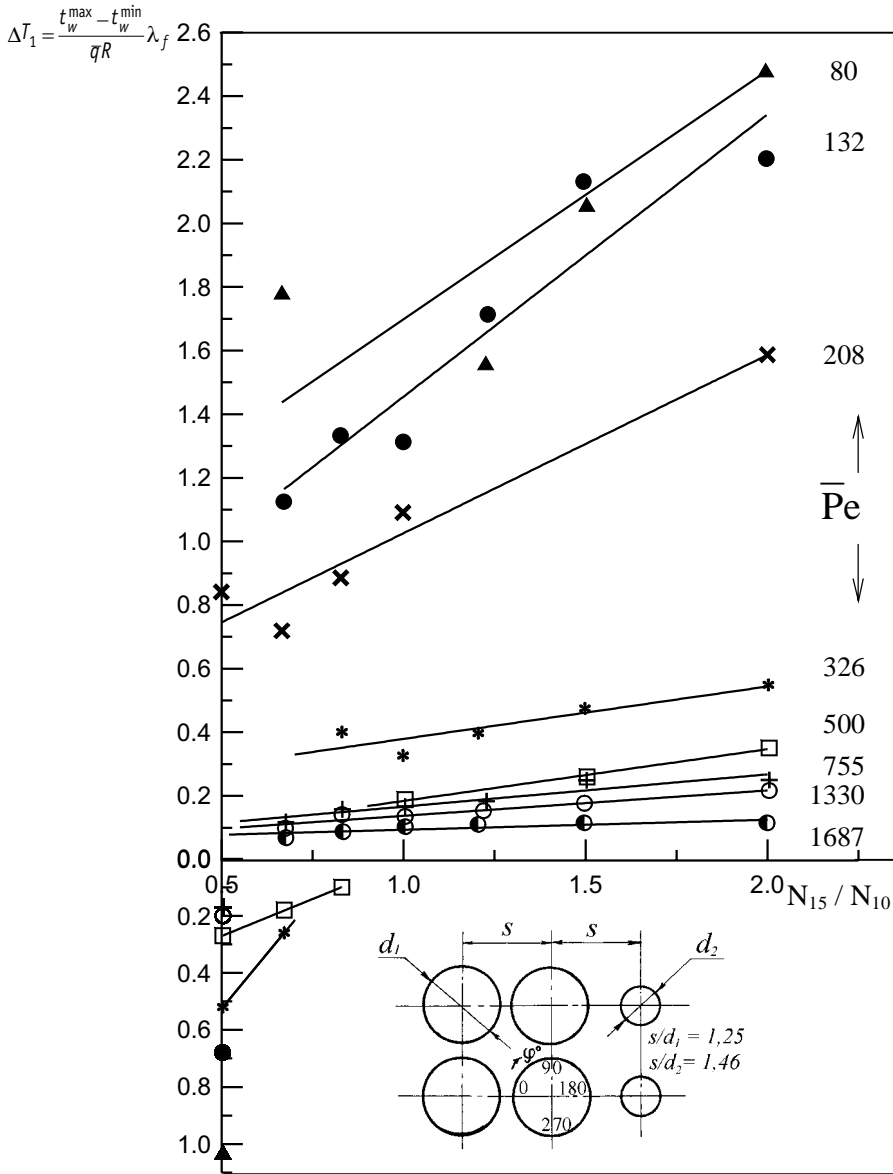


Рис. 6. Зависимости максимальных общих неравномерностей температуры по периметру измерительного имитатора твэла ΔT_1 от скачков энерговыделения N_{15} / N_{10} и чисел Пекле

номера термопары соответствует росту расстояния от начала энерговыделения).

На рис. 6 построены (в безразмерном виде) максимальные общие неравномерности температуры измерительного имитатора твэла в функции величины скачка энерговыделения при фиксированных расходах (числах Pe , Re) теплоносителя (поле температуры показано на рис. 5, а). Как видно, имеют место линейные зависимости (более строгие – при больших расходах теплоносителя), демонстрирующие увеличение неравномерностей с увеличением относительного скачка мощности N_{15}/N_{10} и с уменьшением числа Pe (Re).

При “обратных” скачках мощности, когда происходит перераспределение местоположений максимума и минимума температуры по точкам $\varphi=0$ и 180° , неравномер-

ность температуры условно отложена вниз от нуля по оси ординат. Изменение относительного энерговыделения в смежных зонах имитаторов сборки исследовано в более широком интервале, чем это может быть в активной зоне реактора БРЕСТ-ОД-300; экспериментальные данные для номинальных чисел Pe реактора (~ 2000) воспроизводятся надежной экстраполяцией; конечные рекомендации для реактора базируются на использовании наибольших значений общих неравномерностей температуры по показаниям термопар, расположенных в конце зоны энерговыделения модельной сборки. В активной зоне реактора БРЕСТ-ОД-300 наибольшие неравномерности температуры также будут иметь место в конце зоны энерговыделения, где разность подогревов в смежных ячейках максимальна.

Неоднородная модельная сборка с двумя дистанционирующими решетками

“Взаимодействие” соседних дистанционирующих решеток может снизить температурные неравномерности в ТВС (особенно в неоднородных зонах), повысить теплоотдачу (о чем говорилось выше) и в целом положительно сказаться на температурных режимах твэлов реактора БРЕСТ-ОД-300.

Характерной особенностью температурного поля по периметру имитатора твэла (рис. 5, а) является, как и в опытах с одной дистанционирующей решеткой, наличие максимума температуры стенки имитатора в “затесненной” зоне модельной сборки ($s/d = 1,25$, узкий зазор между имитаторами - $\varphi=0^\circ$) и минимума в “открытой” зоне модельной сборки ($s/d=1,34$, зазор при $\varphi=180^\circ$)^{*}. Это определяет общую неравномерность температуры по периметру имитатора, обусловленную перегревом теплоносителя в зоне с $s/d=1,25$ и недогревом в зоне с $s/d=1,34$.

На рис. 5, а) приводятся усредненные температурные поля во второй половине модельной сборки по показаниям нескольких термопар, когда распределения характеризуются меньшим значением неравномерности температуры по сравнению с неравномерностью в конце зоны энерговыделения. Опыты показали, что соотношение между неравномерностями температуры сравниваемых вариантов (сборки с одной и с двумя дистанционирующими решетками) одно и то же для различных сечений сборки (в том числе и для сечения в конце зоны энерговыделения, представляющего наибольший практический интерес). Это соотношение остается таким же и для иллюстрируемых на рис. 5, а) усредненных значений неравномерностей температуры по показаниям нескольких термопар.

Установленная в опытах с одной дистанционирующей решеткой линейная зависимость неравномерности температуры от относительной мощности N_{15}/N_{10} в широком диапазоне изменения N_{15}/N_{10} ($0,5 \div 2,0$) в общем подтверждена и в опытах с двумя дистанционирующими решетками (рис. 7), хотя диапазон изменения относительных мощностей в этих опытах был существенно меньше ($0,82 \leq N_{15}/N_{10} \leq 1,20$). Это позволяет проводить пересчет полученных закономерностей для относительной мощности $N_{15}/N_{10} = 1,0$ на другие значения N_{15}/N_{10} .

На рис. 8 показана зависимость безразмерной неравномерности температуры от числа Пекле при использовании как одной (ΔT_1), так и двух (ΔT_2) дистанционирующих решеток. Видно, что неравномерности не очень сильно изменяются в области больших чисел Пекле ($Pe > 700$), но резко возрастают с уменьшением Пекле в области $Pe < 300 \div 400$ (темп роста ΔT_1 и ΔT_2 примерно одинаков). Неравномерность ΔT_2 составляет $\sim 0,52\Delta T_1$ при числе $Pe \approx 100$ и $\sim 0,42\Delta T_1$ при числе $Pe \approx 1300$. Изменение $\Delta T_2/\Delta T_1$ в зависимости от Pe примерно линейное. Можно приближенно принять $\Delta T_2 \approx 0,47\Delta T_1$ в

^{*} Промежуточная ячейка между зонами $s/d_1 = 1,25$ и $s/d_2 = 1,46$ рассматривается как условно регулярная ячейка, если ее относительный шаг $s/d = 1,34$ рассчитывать по среднему диаметру $d = (d_1 + d_2)/2$

$$\Delta T_2 = \frac{t_w^{\max} - t_w^{\min}}{\bar{q}R} \lambda_f$$

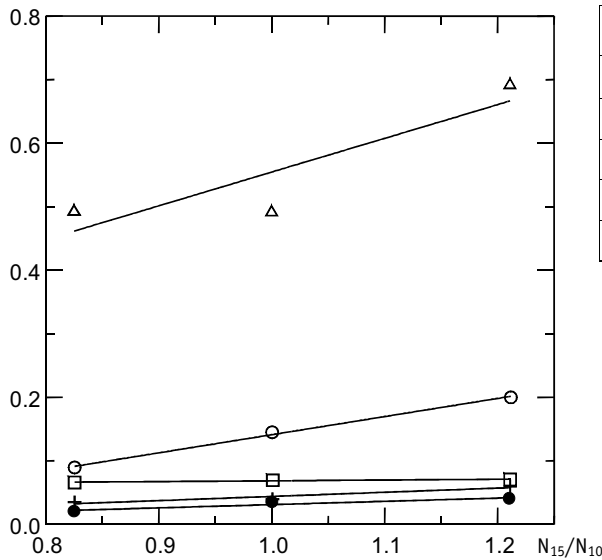


Рис. 7. Зависимости максимальных неравномерностей температуры от скачков энерговыделения, полученные в опытах с двумя дистанционирующими решетками

$$\Delta T = \frac{t_w^{\max} - t_w^{\min}}{\bar{q}R} \lambda_f$$

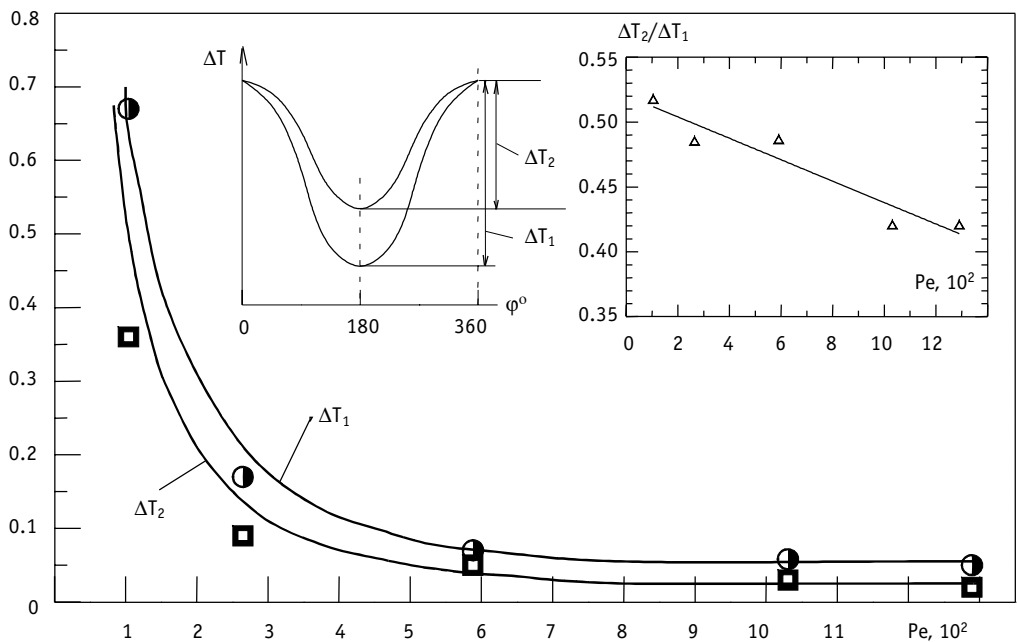


Рис.8. Зависимость безразмерной неравномерностей температуры от числа Пекле при использовании одной (ΔT_1) и двух (ΔT_2) дистанционирующих решеток

исследованном диапазоне изменения чисел Пекле ($100 \leq Pe \leq 1300$).

При анализе рассматриваемого вопроса применительно к активной зоне реактора БРЕСТ-ОД-300 значения ΔT_1 следует брать из номограммы, представленной на рис.6.

Литература

1. Орлов В.В. Новый этап ядерной энергетики и быстрые реакторы, охлаждаемые свинцом // Информационный бюллетень № 3 (10). Ядерное общество СССР, 1991. - С. 6.
2. Адамов Е.О., Орлов В.В. Развитие атомной энергетики на базе новых концепций ядерных реакторов и топливного цикла. // Программа и тезисы докладов конференции «Тяжелые жидко-металлические теплоносители в ядерных технологиях», 5 - 9 октября 1998 г. - Обнинск: ГНЦ РФ-ФЭИ им. академика А.И.Лейпунского. - С.15.
3. Кузина Ю.А., Смирнов В.П., Жуков А.В., Сорокин А.П. Исследование на модельных ТВС температурных полей и теплоотдачи для быстрого реактора со свинцовым охлаждением //Сб. научных трудов научной сессии МИФИ-2000. - М.: МИФИ, 2000. - Т. 8. - С. 108-110.
4. Ефанов А.Д., Жуков А.В., Кузина Ю.А. и др. Экспериментальное и расчетное изучение вопросов теплогидравлики активной зоны быстрых реакторов типа БРЕСТ (свинцовое охлаждение) //Сб. тезисов докладов семинара "Математические модели для исследования и обоснования характеристик оборудования и ЯЭУ в целом при их создании и эксплуатации". - Сосновый Бор, 2000. - С. 117-120.
5. Кузина Ю.А. Проблемы теплогидравлики реакторов с естественной безопасностью // Труды XIII школы-семинара молодых ученых и специалистов под руководством академика РАН А.И.Леонтьева "Физические основы экспериментального и математического моделирования процессов газодинамики и тепломассообмена в энергетических установках", 20 - 25 мая 2001 г. - С.-Петербург. - Т.2. - С. 469-472.
6. Кузина Ю.А., Жуков А.В., Орехов М.В. и др. Экспериментальные данные по полям температуры в модельной ТВС реактора типа БРЕСТ (рекомендации, расчетные формулы) // Сб. тезисов докладов отраслевой конференции "Теплофизика-2001" "Теплогидравлические коды для энергетических реакторов (разработка и верификация)", Обнинск, 29-31 мая 2001 г. - С. 113-115.
7. Жуков А.В., Кузина Ю.А., Сорокин А.П. и др. Экспериментальное изучение на моделях теплообмена в активной зоне реактора БРЕСТ-ОД-300 со свинцовым охлаждением //Теплоэнергетика. - 2002. - № 3. - С. 2-10.
8. Кузина Ю.А., Сила-Новицкий А.Г. Модельные эксперименты и расчеты (код ТИГР-БРС) по изучению полей температуры и скорости в активных зонах реакторов с тяжелым теплоносителем //Теплоэнергетика. - 2002. - № 11.
9. Кузина Ю.А., Жуков А.В., Орехов М.В. Изучение температурных полей твэлов, расположенных на границе подзон с разными диаметрами и энерговыделениями твэлов (для реакторов типа БРЕСТ) // Сб. тезисов докладов VII Международной конференции "Безопасность АЭС и подготовка кадров", 8 - 11 октября 2001 г. - Обнинск. - С. 24-25.
10. Кузина Ю.А., Жуков А.В., Орехов М.В., и др. Температурные поля твэлов в активной зоне реактора БРЕСТ-ОД-300 (эксперименты на моделях) //Сб. научных трудов научной сессии МИФИ-2002. - М., 2002. - Т. 8. - С. 48-49.

Поступила в редакцию 11.11.2002

ing). - Obninsk, 2002. - 13 pages, 3 illustrations, 2 tables. - References, 12 titles.

The generalized hierarchically closed analytical relationships are derived for distribution parameters C_{ks} of the quasi-one-dimensional (drift flux model) form of continuity, energy and momentum equations for two-phase non-equilibrium flow with non-uniform profiles. The main assumptions are superposition method and power approximations of the local phase profiles for derivation of the quadratures of distribution parameters and for their assessment. The complementarity and mirror symmetry properties are presented for parameter distributions for flows with non-uniform parameter profiles.

УДК 621.039.534

Distribution Parameters for the Quasi-One-Dimensional Two-Phase Non-Equilibrium Flow Models. Generalization for Annular Channel and Rod Bundle Flows \ Yu.N. Kornienko; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering). - Obninsk, 2002. - 12 pages, 5 illustrations. - References, 12 titles.

The derived in the previous articles [1,2] relationships for two-phase non-equilibrium flow distribution parameters C_{ks} are generalized for an annulus and pin bundle geometry. The main assumptions are superposition method and power approximations of the local phase profiles for derivation of the quadratures of distribution parameters and for their assessment. There are derived the limiting analytical forms for C_{ks} relationships for symmetrical subchannel in the tight packet pin bundle and also with taking into account the azimuthal profiles of the variables.

УДК 621.039.534

Heat Transfer and Temperature Fields in the Core of Fast BREST Reactor with Lead Cooling \ J.A. Kuzina, A.V. Zhukov, A.P. Sorokin, A.I. Filin, V.P. Smirnov, V.N. Leonov, A.G. Sila-Novitsky; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering). - Obninsk, 2002. - 9 pages, 8 illustrations. - References, 10 titles.

The results of thermohydraulic research for the experimental demonstration lead-cooled fast reactor BREST-OD-300 are considered.

УДК 621.039.534

Investigation of the Acoustic Probe System for Analysis of a Level of Boiling Water Coolant \ V.I. Melnikov, A.V. Dunzev, A.B. Vjugin; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering). - Obninsk, 2002. - 7 pages, 7 illustrations. - References, 7 titles.

The developed acoustic probe system for analysis of a level and amount of liquid phase on the data of a vapor space distribution in control boiling water volume has been investigated. The acoustic probe system allows to determine the state of phase into 8 local volume by probes placed along the height of vessel, and to study dispersing properties of the vapor-liquid water mixture.

The construction of the acoustic device, computer program, laboratory and testing unit experiments are described.