

ТЕМПЕРАТУРНЫЕ РЕЖИМЫ ТВЭЛОВ КОРАБЕЛЬНЫХ ЯДЕРНЫХ УСТАНОВОК С ЖИДКОМЕТАЛЛИЧЕСКИМ ОХЛАЖДЕНИЕМ

А.В. Жуков, А.П. Сорокин, А.Д. Ефанов, Ю.А. Кузина

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



Излагаются результаты комплексных теплогидравлических исследований, полученные для активных зон реакторов с жидкометаллическим охлаждением с учетом специфических особенностей сплава Pb–Bi как теплоносителя для ядерных реакторов. Рассматриваются методы и средства изучения полей температуры и скорости в модельных сборках, разработанных на основе методов теплового моделирования. Представлены экспериментальные данные по теплоотдаче и максимальным неравномерностям температуры в регулярных решетках твэлов и в нестандартных каналах. Даются рекомендации по расчету локальных и средних коэффициентов обмена массой и теплом (конвективная составляющая) для дистанционирования твэлов винтовыми навивками типа «ребро по ребру». Рассматриваются эффекты, вызванные деформацией, дистанционирующими устройствами и частичной блокировкой проходного сечения под теплоноситель в решетках твэлов, охлаждаемых жидкими металлами.

ВВЕДЕНИЕ

Исследования теплообмена и полей температуры в каналах сложной формы применительно к реакторам с жидкометаллическим охлаждением были начаты в теплофизическом отделении ФЭИ в 50–60 годы прошлого столетия при использовании тяжелых теплоносителей (ртути и сплава Pb–Bi), а затем были продолжены на других жидких металлах, нашедших применение в атомной энергетике. Были созданы жидкометаллические стенды с Pb–Bi и ртутью, освоена технология этих теплоносителей, разработаны способы измерения температур на поверхности теплообмена и в теплоносителе, изучены процессы теплообмена в каналах различного поперечного сечения: пучки стержней, кольцевые и плоские зазоры, круглые трубы и т.д. Особое внимание было обращено на изучение температурных полей и теплоотдачи в стержневых и трубных системах как наиболее распространенных системах теплосъема в активных зонах и теплообменниках ЯЭУ с жидкометаллическими теплоносителями. Теплоноситель Pb–Bi широко использовался, в частности, при изучении теплообмена в круглых трубах. Эксперименты на тяжелом теп-

© А.В. Жуков, А.П. Сорокин, А.Д. Ефанов, Ю.А. Кузина, 2007

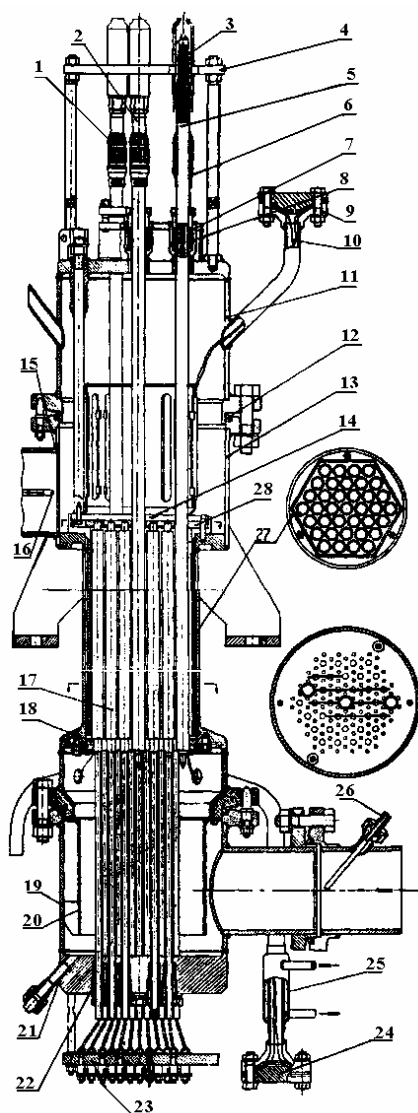


Рис. 1. Конструкция тепловой модели сборки ТВЭЛов реактора с жидкометаллическим охлаждением:

1, 2, 5 – боковой, центральный, угловой поворотные имитаторы ТВЭЛов, 3 – электроподвод нагревателя, 4 – ограничитель, 6 – крепление термопар, 7, 8 – элементы сальника, 9, 24 – уплотнение термопар, измеряющих температуру в ячейках на выходе из модели, 10 – термопары, 11, 13 – верхний коллектор, 12 – прокладки, 14 – решетка с термопарами, 15 – смеситель, 16 – термопарная гильза, 17 – имитатор ТВЭЛ, 18, 28 – нижняя и верхняя центрирующие решетки, 19 – нижний коллектор, 20 – отбойник, 21 – дренаж, 22 – сальники, 23 – изоляционная панель, 24 – замораживатель, 26 – термопарная гильза, 27 – шестигранная обечайка

лоносителя (ртуть) дали первые сведения принципиального характера о процессах теплообмена в решетках ТВЭЛов с жидкометаллическим охлаждением.

Работы проводились группой сотрудников ФЭИ (Ю.И. Орлов, А.В. Жуков, П.А. Ушаков, М.Х. Ибрагимов, Б.Н. Габрианович, И.П. Свириденко и др.) под руководством ныне академика Российской Академии наук В.И. Субботина.

Далее были развернуты прецизионные исследования температурных полей и теплоотдачи применительно к теплоносителю Pb–Bi на моделирующем теплоносителе: сплаве натрий-калий (22%Na + 78%K); проводились также эксперименты для отработки новых методик исследований температурных полей в решетках ТВЭЛов непосредственно на сплаве Pb–Bi (метод точечного источника и т.д.). Развивались расчетные методы (М.П. Леончук, Ю.С. Юрьев, А.П. Сорокин).

Ниже излагаются результаты комплексных теплогидравлических исследований, полученные для активных зон реакторов, как наиболее напряженных узлов ЯЭУ с жидкометаллическим охлаждением, при учете специфических особенностей сплава Pb–Bi, как теплоносителя для ядерных реакторов.

МОДЕЛЬНЫЕ СБОРКИ, ДАТЧИКИ, МЕТОДИКИ. ЖИДКОМЕТАЛЛИЧЕСКИЙ СТЕНД

При использовании тяжелого теплоносителя для ядерных реакторов рассматриваются решетки ТВЭЛов разной геометрии (треугольные, квадратные), с различными способами дистанционирования ТВЭЛов (винтовые ребра, поперечные решетки), с различными шагами расположения ТВЭЛов ($1,10 \leq s/d \leq 1,5$); возможно использование тепловыделяющих сборок с чехлами и без чехлов и т.д. Проблемы теплогидравлики связаны с необходимостью выявления закономерностей сложного продольно-поперечного течения теплоносителя, вызываемого дистанционирующими устройствами, изучения коэффициентов гидравлического сопротивления и тепломассообмена, обусловленных взаимодействием продольных и поперечных потоков теплоносителя.

Вышеотмеченные вопросы изучены применительно к жидкометаллическим потокам (включая сплав Pb–Bi) при сочетании тепловых и гидродинамических опытов, основанных на использовании методов теплового моделирования [1–3] и электромагнитных измерений локальных скоростей жидкометаллического теплоносителя [4, 5].

Конструкция модельныхборок [3]. Модельная сборка воспроизводит изучаемую решетку твэлов, моделируя ТВС реактора (рис. 1) или соответствующую часть бескассетной активной зоны.

Центральным моментом моделирования является выполнение равенства параметра эквивалентной теплопроводности твэла и его имитатора ($\epsilon_{k \text{ твэл}} = \epsilon_{k \text{ мод}}$) и обоснование выбора числа имитаторов твэлов в сборке, а также числа модельныхборок, если изучается их тепловое взаимодействие (в последнем случае моделируется определенная часть активной зоны реактора). При необходимости возможно использование бесчехловых (или перфорированных)борок. Наибольшее число имитаторов твэлов, воспроизводящих бескассетную активную зону транспортной установки, составляет 61.

Термометрические датчики и нагреватели. Термометрические датчики (микротермопары) вмонтированы в поворотные имитаторы твэлов (в том числе с дистанционирующими ребрами), расположенные в характерных зонах модельной сборки, а также в ячейки проходного сечения, и измеряют локальные температуры поверхности имитаторов твэлов и в теплоносителе – рис. 2. Опыты обычно проводятся при постоянном энерговыделении и пересчитываются на любой закон энерговыделения по высоте реактора с использованием принципа суперпозиции [6, 7]. При необходимости осуществляется моделирование переменного по высоте зоны энерговыделения, для чего используется профилированный нагреватель.

Электромагнитный метод измерений локальных расходов (скоростей) жидкометаллических потоков теплоносителя [4, 8]. Для жидкометаллических теплоносителей затруднено применение традиционных методов гидродинамических измерений, основанных на использовании трубок Пито и термоанемометров. Проведение опытов на теплоносителях с умеренными числами Прандтля (вода, воздух) часто вызывает необходимость создания моделей сильно увеличенных размеров (по сравнению с натурными сборками твэлов), что связано с большими материальными затратами на постановку и проведение опытов, и не обеспечивает соответствия штатной технологии изготовления ТВС реакторов. Вместе с тем для теплогидравлического обоснования ядерных реакторов с охлаждением сплавом Pb–Bi большое значение имеет знание локальных гидродинамических характеристик (в частности, локальных расходов) в реальных конструкциях ТВС, что определяет температурное поле в активной зоне реактора.

Необходимость исследования локальных гидродинамических характеристик для трех основных видов течения в элементах реактора – продольного течения (распре-

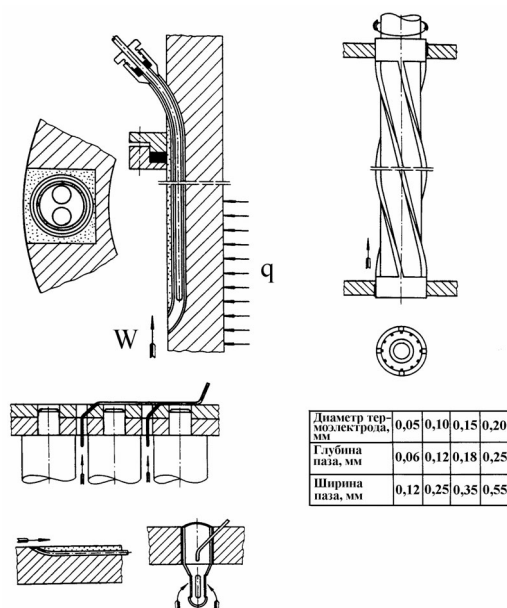


Рис. 2. Измерение температуры поверхности имитаторов твэлов и в жидкости

деление локальных расходов по периметру и длине твэлов), поперечного течения (мас-сообмен в межтвэльном пространстве), продольно-поперечного течения в теплообменном оборудовании ЯЭУ – обусловило необходимость разработки универсального метода измерений локальных гидродинамических характеристик, применимого для любого из перечисленных выше видов течения.

Изучение гидродинамических вопросов удобно проводить на модельных сборках твэлов, несильно отличающихся по размерам от натурных ТВС или полностью соответствующих им, при использовании в качестве теплоносителя той же среды, что и в реакторе (жидкий металл). Целесообразность постановки таких исследований очевидна, т.к. в опытах воспроизводятся, по существу, близкие к натурным гидродинамические условия, а постановка опытов оказывается весьма экономичной. Если гидродинамические измерения в модельных сборках дополнить тепловыми, то будет получена довольно полная информация для теплогидравлического обоснования ядерного реактора. Такой метод исследований разработан в ФЭИ коллективом сотрудников под руководством А.В. Жукова.

В трубку из стали X18H10T (рис. 3) вставлен постоянный магнит, размещенный в экранирующих кольцах. Ось магнита направлена по диаметру трубки перпендикулярно движению теплоносителя. На внешней поверхности трубки в районе торца магнита имеется прорезь, заполненная изолятором. В изоляторе зафиксированы взаимно перпендикулярные две пары электродов, реагирующие на продольную и поперечную составляющие скорости. Центральный угол между электродами $2\Delta\phi$ равен $3-7^\circ$. Для измерения полей скорости в модельных ТВС осуществляется поворот трубки с датчиком и его продольное перемещение вместе с трубкой.

Жидкометаллический стенд [3]. Гидродинамические и тепловые эксперименты с модельными сборками активных зон и теплообменников реакторов проводятся на жид-

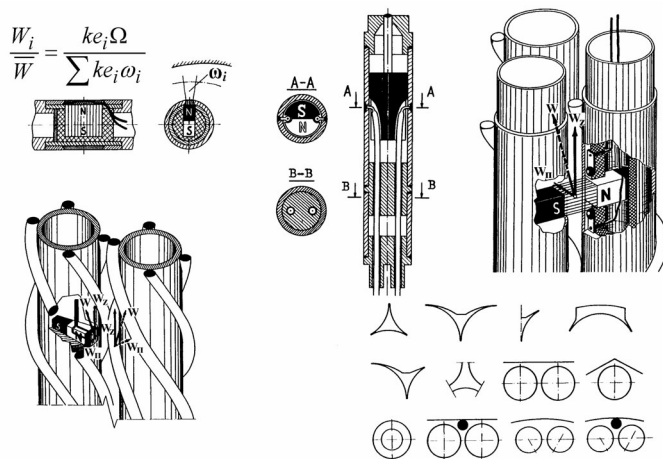


Рис. 3. Электромагнитные датчики локального действия и изученные каналы применительно к ЯЭУ

кометаллическом стенде 6-Б (теплоноситель – натрий, сплав натрий–калий), вошедшем в каталог стендов и реакторов нулевой мощности, изданный СЭВ [9]. В этом стенде, наиболее известном из литературы и имеющем большую мощность по сравнению с другими исследовательскими стендами, используется сплав натрий–калий (22% Na + 78% K) как моделирующая жидкость по отношению к сплаву Pb–Bi. Исследовательские стенды со сплавом Pb–Bi, на которых проводятся непосредственные эксперименты для реакторов с этим теплоносителем, имеют аналогичную конструкцию.

Стенд состоит из трех контуров: первый контур – натрий–калиевый, второй – натри-

евый, третий – натрий калиевый. Первый и второй контуры – основные; они предназначены для проведения непосредственных экспериментов с теплогидравлическими моделями активных зон реакторов и теплообменниками металл–металл. Третий контур (вспомогательный) предназначен для охлаждения холодных ловушек первого и второго контуров. Оборудование стенда является характерным для работы с жидкими металлами (подробнее см. в [3]).

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Теплоотдача и поля температур в регулярных решетках твэлов. Сведения по расчету коэффициентов теплоотдачи и максимальных неравномерностей температуры твэлов с жидкометаллическим охлаждением (в том числе сплавом Pb–Bi) получены для решеток твэлов в широких интервалах изменения определяющих параметров (шаг решеток твэлов $1,0 \leq s/d \leq 2,0$, число Пекле $1 \leq Pe \leq 4000$, число Прандтля $0,007 \leq Pr \leq 0,03$, параметр эквивалентной теплопроводности твэлов $0,02 \leq \varepsilon \leq 16$) [7, 10]. На рис. 4, 5 приводятся некоторые характерные результаты опытов по коэффициентам теплоотдачи. Данные по теплоотдаче в четырехугольной решетке твэлов (рис. 4б), полученные при использовании непосредственно тяжелого теплоносителя, подробно изложены в [11].

Опытные данные обобщаются зависимостью, построенной на использовании предельных данных для ламинарного режима течения [7, 10]. Следует отметить формулу [12]

$$Nu = 0,58 \left[1,103(s/d)^2 - 1 \right]^{0,55} Pe^{0,45}, \quad 1,1 \leq s/d \leq 1,5; \quad 400 \leq Pe \leq 4000, \quad (1)$$

предложенную при непосредственном участии Ю.И. Орлова и сыгравшую значительную

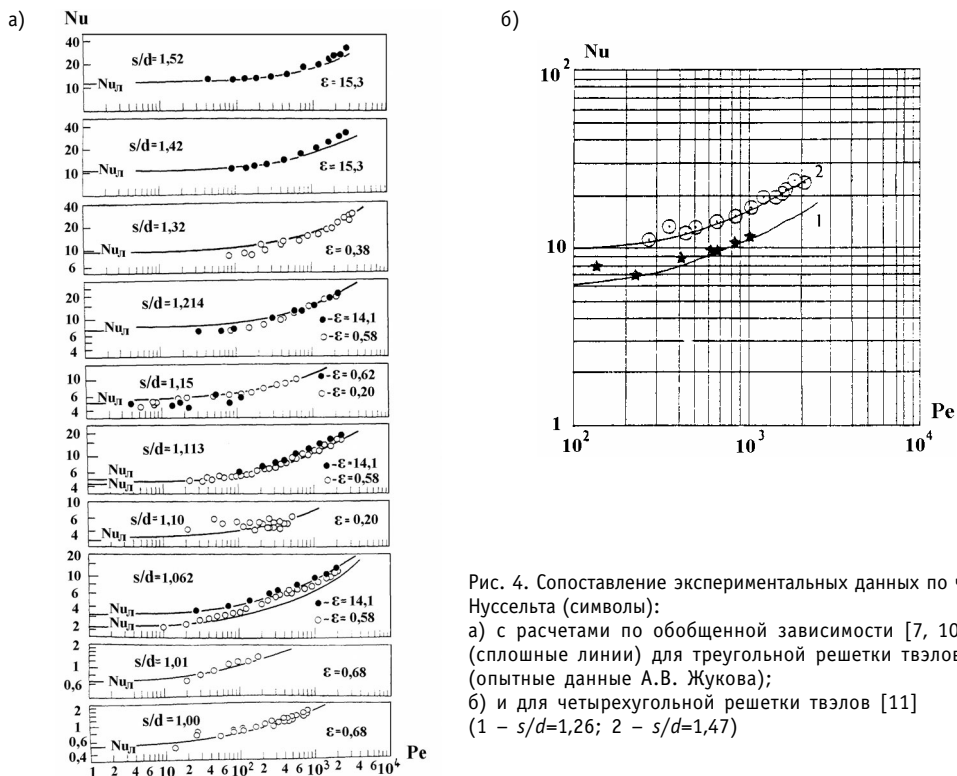


Рис. 4. Сопоставление экспериментальных данных по числам Нуссельта (символы): а) с расчетами по обобщенной зависимости [7, 10] (сплошные линии) для треугольной решетки твэлов (опытные данные А.В. Жукова); б) и для четырехугольной решетки твэлов [11] (1 – $s/d=1,26$; 2 – $s/d=1,47$)

роль при теплогидравлическом обосновании активных зон реакторов транспортных установок.

Эффект переменного энерговыделения в температурных напорах «стенка-жидкость» при использовании сплава Pb–Bi. Коэффициент теплоотдачи при переменном энерговыделении в нижней части активной зоны реактора выше, а в верхней

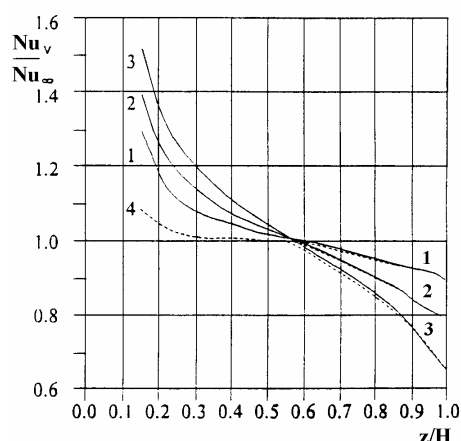


Рис. 5. Распределение относительных чисел Нуссельта по высоте активной зоны для $s/d=1,3$ и $Re=1600$ в функции значения k : 1 — 1,1; 2 — 1,2; 3 — 1,3; 4 — $q=const$

части ниже, чем при постоянном энерговыделении (рис. 5). Представляет опасность занижение коэффициента теплоотдачи в конце зоны энерговыделения при $q = var$, т.к. это связано с завышением температурных напоров «стенка-жидкость» по сравнению с оценками, не учитывающими эффект переменного энерговыделения в отношении теплоотдачи. Оценка максимальной температуры твэла, произведенная с использованием формул для коэффициентов теплоотдачи при $q = const$, дает более низкие значения температуры по сравнению с действительными (при переменном энерговыделении). Данный эффект может быть чувствителен для реакторов с сильно изменяющимся энерговыделением и теплоносителем, обеспечивающим большие температурные напоры «стенка-жидкость»

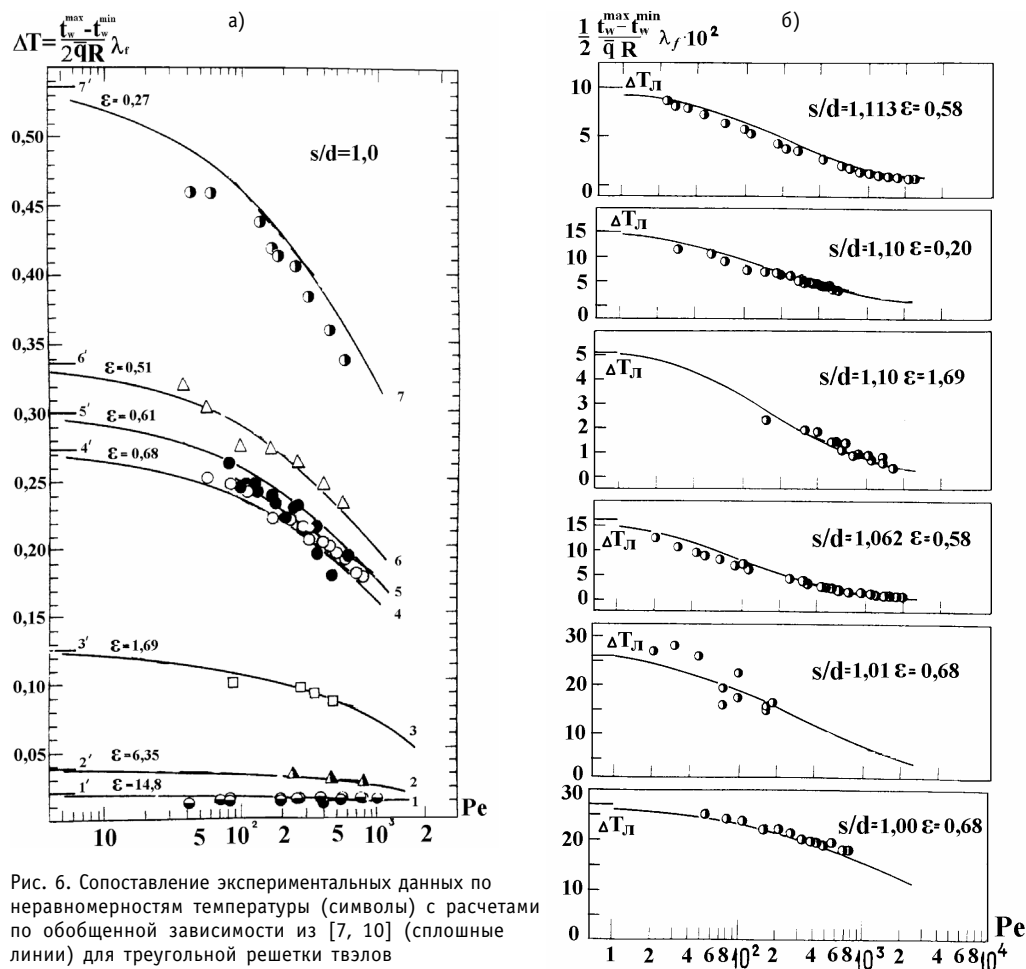
(что характерно для сплава Pb–Bi). Получены рекомендации для оценки этого эффекта [7, 11, 13].

Максимальные неравномерности температуры в регулярных решетках твэлов и в нестандартных каналах [10, 12]. Систематизация максимальных неравномерностей температуры по периметру твэлов регулярной решетки представлена на рис. 6а, б, где приводится сопоставление экспериментальных данных с обобщенной зависимостью из [7, 10], справедливой для любых цилиндрических твэлов, обтекаемых жидкометаллическим теплоносителем в широком интервале изменения чисел Пекле (в обобщенной зависимости используются предельные значения по неравномерностям температуры для ламинарного режима течения).

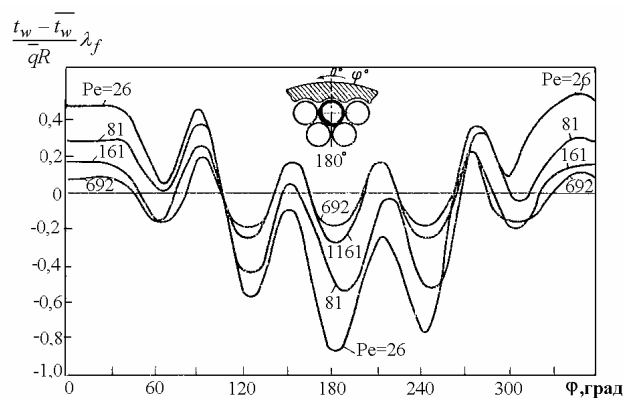
Температурные поля периферийных твэлов (рис. 7) характеризуются сложным распределением температуры, определяемым геометрией периферийной зоны, условиями энерговыделения и другими причинами [12].

Межканальный теплообмен [5, 14]. Зазоры между твэлами, связывающие каналы в единую систему, обеспечивают обмен массой, импульсом и энергией между каналами (рис. 8), который осуществляется конвективным переносом, турбулентной диффузией и молекулярным (электронным в жидких металлах) переносом, а также за счет теплопроводности твэлов (эффект весьма заметен для твэлов реакторов, охлаждаемых сплавом Pb–Bi).

Если обмен массой (теплом) в решетках твэлов, дистанционируемых проволочными навивками типа «ребро по оболочке», подчиняется периодическому (синусоидальному) закону, что определяет периодический (синусоидальный) закон изменения локальных коэффициентов межканального обмена по высоте зазоров между твэлами, то при дистанционировании твэлов «ребро по ребру», в зазорах между твэлами возникают противоположно направленные потоки теплоносителя (рис. 8), и обмен массой (теплом) по высоте зазоров подчиняется более сложному, чем синусоидальный, периодическому закону (эпюры обмена массой и теп-



лом см. на рис. 8). Исследования позволили установить определяющие параметры и дать рекомендации по расчету локальных и средних коэффициентов обмена массой и теплом (конвективная составляющая) для дистанционирования твэлов винтовыми навивками типа «ребро по ребру» [5, 14]:



$$\mu_{\text{конв}ij}^T = \pm \frac{V_{\text{max}}}{V_{\text{ц.я}}} \sin^2 2 \left(\frac{2\pi Z}{h} - \alpha_{ij} \right);$$

$$\mu_{\text{конв}}^T = \frac{1}{3h} \Phi_*^T(x) \Psi(\text{Re});$$

$$\mu_{\text{конв}}^T = \gamma \mu_{\text{конв}}^T, \quad \gamma = 0,7;$$

$$\Phi_*^T(x) = 2,16 - 3,16e^{-1210(x-1)^4} + 1;$$

$$\Psi(\text{Re}) = 1,085 - 0,754 \exp(-0,132 \cdot 10^{-3} \text{Re})$$

$$1,01 \leq x = s/d \leq 1,4;$$

$$5 < h/d < 65,5; \quad 5 \cdot 10^3 \leq \text{Re} \leq 10^5.$$

Исследования других составляющих межканального обмена теплом (турбулентная и молекулярная диффузия, теплопроводность твэлов) позволили замкнуть (наряду с использованием коэффициентов гидравлического сопротивления) систему констант для теплогидравлического расчета активных зон реакторов, охлаждаемых сплавом Pb-Bi.

Деформация решетки твэлов [7, 14, 15]. Деформация решетки твэлов при работе реактора с жидкометаллическим охлаждением может иметь разнообразные формы: изгиб и скручивание твэлов, деформация вытеснителей, распухание и оваллизация твэлов, стохастические отклонения параметров и т.д. При этом может происходить смещение твэлов пучка до касания оболочками твэлов и образования увеличенного зазора между твэлами.

В отдельных случаях может иметь место смещение (прогиб) твэлов. Могут возникать даже ячейки с плотной упаковкой твэлов. В целом деформация твэльной решетки имеет случайный характер. Эффекты формоизменения в процессе кампании обусловлены распуханием и пластичной деформацией оболочек и чехлов ТВС.

Изучены температурные поля и теплообмен твэлов при деформации каналов, вызванной одиночным или групповым смещением твэлов (одиночное смещение твэла вдоль чехла ТВС и по нормали к чехлу ТВС; в направлении под углом к твэлам регулярной зоны, смещение одиночного твэла в канале, групповое смещение двух, трех или четырех твэлов в характерных зонах ТВС, прогибом одного или нескольких твэ-

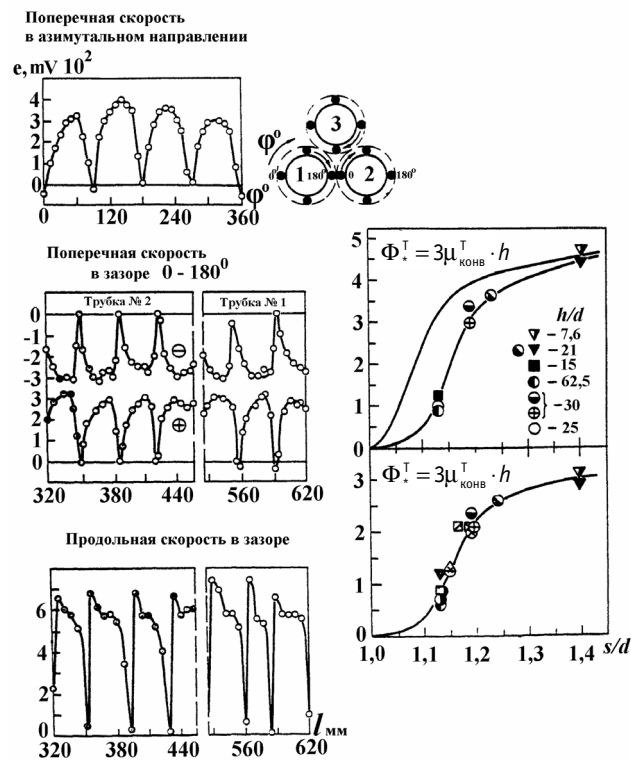


Рис. 8. Межканальный конвективный обмен при дистанционировании твэлов «ребро по ребру»

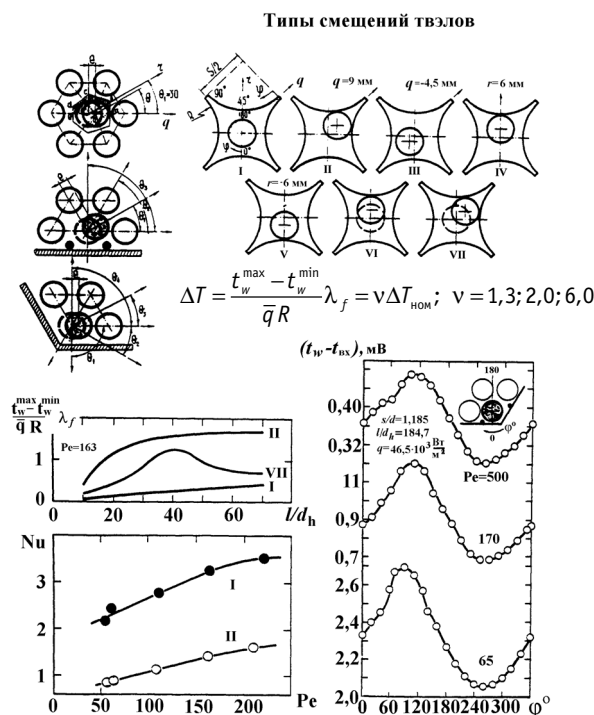


Рис. 9. Температурные поля и теплоотдача в деформированных решетках твэлов

лов, формоизменением пучка и чехла ТВС и другими факторами. Конечно, деформация приводит к резкому росту неравномерностей температуры и падению теплоотдачи (рис. 9).

Необходимо иметь в виду, что полученные данные для исследованных вариантов представляют собой некоторые базовые (предельные) данные, которые удобно использовать для осуществления предельных переходов при изучении рассматриваемой проблемы. Поскольку в реальных ТВС изменение геометрии каналов носит статистический характер и все многообразие конкретных геометрических условий вряд ли может быть воспроизведено и изучено в экспериментах, то необходимо найти некоторый универсальный параметр, который позволил бы получить обобщенную зависимость для оценок неравномерностей температуры при различных вариантах деформации решетки твэлов с учетом статистического характера изменения проходных сечений каналов.

Таким параметром может служить обратная относительная площадь деформированной ячейки с максимальным проходным сечением [14, 15], что позволило обобщить все многообразие полученных экспериментальных данных единой зависимостью

$$\Delta T = \frac{t_w^{\max} - t_w^{\min}}{qR} \lambda_f = K + M \exp(-mPe), \quad 20 \leq Pe \leq 700. \quad (2)$$

Наряду с этой зависимостью развиты аналитические и численные подходы к решению различных задач, связанных с деформацией решеток твэлов и чехлов ТВС в активных зонах реакторов с жидкометаллическим охлаждением, которыми можно воспользоваться для расчетных оценок применительно к реактору с теплоносителем Pb-Bi.

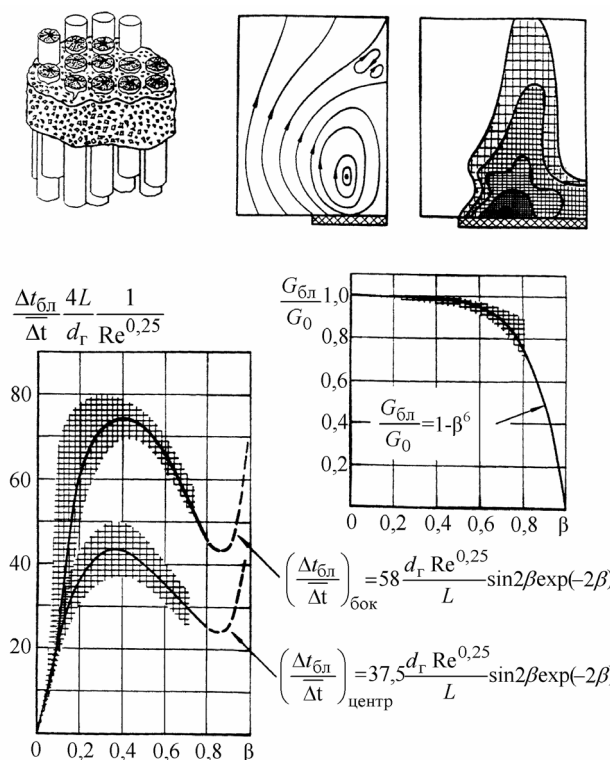


Рис. 10. Частичные блокировки проходного сечения ТВС: схемы, результаты исследований

Сборки твэлов с частичной блокировкой проходного сечения под теплоноситель.

Частичная блокировка проходного сечения ТВС ядерного реактора с жидкометаллическим охлаждением (рис. 10) вызывает изменение поля скорости, давления и температуры теплоносителя в ТВС. В области блокировки происходит перераспределение расхода и давления в потоке, возникают рециркуляционные течения за блокадой. Это сопровождается ростом гидравлического сопротивления и уменьшением расхода теплоносителя через ТВС. Торможение потока теплоносителя обуславливает рост общего подогрева теплоносителя. Ухудшение теплосъема приводит к росту температуры в области блокады. Все это позволяет рассматривать блокировки ТВС как потенциальные источники нежелательных ситуаций в активной зоне реактора, связанные с перегревом твэлов и медленным разрушением их оболочек.

Необходимо знать и оценивать возникающие теплогидравлические процессы в области блокады решеток твэлов, обтекаемых сплавом Pb–Bi, чему был посвящен ряд работ, обосновавших расчет рассматриваемого явления, обуславливающего возможное отклонение режима работы активной зоны от номинального.

На рис. 10 показано поведение расходов и подогревов теплоносителя в функции степени блокады проходного сечения под теплоноситель (обобщенные формулы), полученный на основании многочисленных исследований решеток твэлов с блокадами как в отечественной, так и зарубежной практике. Подробный обзор экспериментальных исследований с анализом соответствующих расчетных программ и обобщением результатов дается в [16, 17].

Эффекты в температурных полях твэлов, обусловленные дистанционирующими устройствами в активных зонах реакторов, охлаждаемых тяжелым теплоносителем (Pb, сплав Pb–Bi). Если в быстрых натриевых реакторах наблюда-

ются некоторые перегревы поверхности твэлов в районе дистанционирующих устройств (под проволочными навивками или в точках касания с дистанционирующими решетками [7]), что обусловлено низкой эквивалентной теплопроводностью твэлов (численные значения параметра эквивалентной теплопроводности твэлов в этом случае лежат в диапазоне $0,02 \leq \varepsilon \leq 0,2$), то при использовании в реакторе тяжелого теплоносителя, при соответствующей композиции твэлов, перегревы малы или вообще не наблюдаются и даже могут иметь место некоторые понижения температуры поверхности твэла в районе расположения дистанционирующей решетки (рис. 11а). Коэффициенты теплоотдачи при этом резко возрастают в районе дистанционирующей решетки [11]. Данный эффект представляет собой большой интерес и, по-видимому, связан с относительно высокой теплопроводностью твэлов, охлаждаемых тяжелым теплоносителем (численное значение параметра эквивалентной теплопроводности ε в этом случае оказывается на порядок выше, чем у твэлов натриевых реакторов), а также с некоторым увеличением скорости теплоносителя в районе дистанционирующей решетки (исследования проводились при перекрытии проходного сечения решетками на ~10 и 20%).

Перегревы стенки под дистанционирующими ребрами твэлов транспортных установок могут быть оценены по формуле [7]

$$\frac{\Delta t_p \lambda_f}{qR} = 0,066 - 5 \cdot 10^{-5} Pe, \quad 40 \leq Pe \leq 400; \quad \varepsilon \cong 1+2; \quad 1,05 \leq s/d \leq 1,13.$$

Влияние степени перекрытия дистанционирующей решеткой проходного сечения ТВС (ε_p) на температурное поле начального теплового участка показано на рис. 11б. Здесь речь идет о расположении твэлов в регулярной зоне по вершинам квадратов применительно к реакторам высокой безопасности и экономичности, охлаждаемым тяжелым теплоносителем [16]).

ПОКАНАЛЬНАЯ МЕТОДИКА И РАСЧЕТНЫЕ КОДЫ

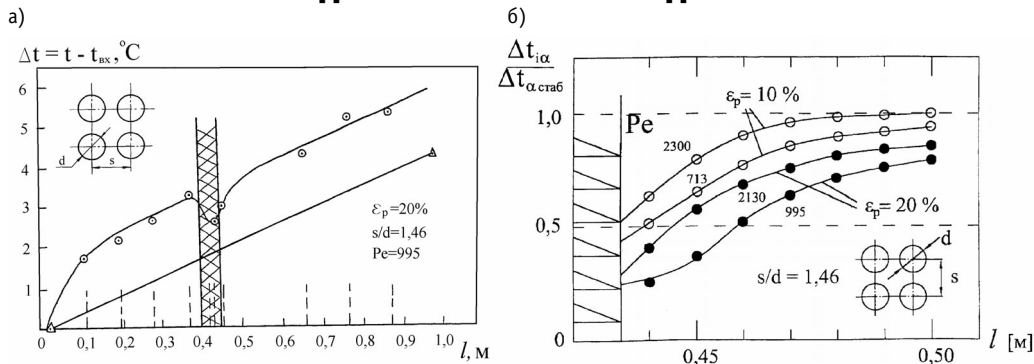


Рис. 11. Температурное поле по длине твэла, обтекаемого тяжелым теплоносителем при дистанционировании твэлов поперечной решеткой (а) и температурное поле на начальном тепловом участке для различной степени перекрытия проходного сечения дистанционирующей решеткой (б)

Покаканальная методика расчета температурных режимов ТВС (А.П. Сорокин) разработана применительно к активным зонам реакторов, охлаждаемым любым теплоносителем, в том числе и жидкометаллическим (а, следовательно, и сплавом Pb-Bi), базируется на использовании вышеприведенного экспериментального материала (коэффициенты теплоотдачи и коэффициенты межканального тепломассообмена, коэффициенты гидравлического сопротивления и формы каналов, константы для деформированных решеток твэлов и ТВС, находящихся в тепловом взаимодействии друг с другом, переходные функции для скачков энерговыделения и данные для ТВС с частичной блокировкой проходного сечения и т.д.), хорошо отработана на активных зонах реакторов с

жидкометаллическим охлаждением, дает надежные конечные результаты и достаточно проста в своем применении. Методика опубликована в ряде работ, в частности, в [7, 10, 14], поэтому нет необходимости в ее изложении. Отметим лишь, что в расчетах учитывается вся совокупность каналов в ТВС и в межпакетном пространстве, а в случае расчета активной зоны в целом рассматривается группа твэлов при последующем обегании всего пространства активной зоны реактора. Коэффициенты теплопередачи через чехлы ТВС рассчитываются с учетом теплопроводности чехлов и коэффициентов теплообмена для разных категорий каналов ТВС (подробнее см. в [5, 10, 14]).

Решается система балансовых уравнений количества движения и энергии при задании системы констант по межканальному обмену при использовании сведений, приведенных выше, а более подробные результаты даются в [5, 7]. С использованием поканальной методики разработаны следующие расчетные теплогидравлические коды: ГИД, ТЕМП, ТЕМП-М, МИФ, МИД (нестационарный случай). Их подробное описание дается в [7, 14].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный комплекс теплогидравлических исследований тепловыделяющих сборок активной зоны, сочетавший тепловые и гидродинамические эксперименты с развитием методов теплогидравлического расчета, позволил получить обширные данные для обоснования температурных режимов ядерных установок с охлаждением сплавом свинец-висмут или чистым свинцом.

Литература

1. Жуков А.В., Сорокин А.П., Титов П.А., Ушаков П.А. Проблемы теплогидравлики в реакторах, охлаждаемых свинцом // Атомная энергия. – 1992. – Т. 72. – Вып. 2. – С. 142-151.
2. Ушаков П.А. Приближенное тепловое моделирование цилиндрических тепловыделяющих элементов / В кн.: Жидкие металлы. – М.: Атомиздат, 1967.
3. Жуков А.В., Сорокин А.П., Свириденко Е.Я., Худаско В.В. Экспериментальное и расчетное моделирование теплогидравлики теплообменных аппаратов ЯЭУ. Модельные сборки, датчики, методики. Жидкометаллический стенд: Учебн. пособие. – Обнинск: ИАТЭ, 1992.
4. Субботин В.И., Жуков А.В., Свириденко Е.Я. и др. Экспериментальное и теоретическое обоснование электромагнитного метода измерений скоростей жидких металлов в каналах / Доклад на II Чехословацко-советском симпозиуме «Теплопередача и гидродинамика в активных зонах и парогенераторах быстрых реакторов». – Нове-Место, ЧССР, 1973.
5. Жуков А.В., Сорокин А.П., Матюхин Н.М. Межканальный обмен в ТВС быстрых реакторов: теоретические основы и физика процесса. – М.: Энергоатомиздат, 1989.
6. Минашин В.Е., Шолохов А.А., Грибанов Ю.И. Расчет температуры в активной зоне реактора при произвольном законе распределения тепловыделения по высоте зоны // Атомная энергия. – 1967. – Т. 22. – Вып. 5. – С. 362-366.
7. Методические указания и рекомендации по теплогидравлическому расчету активных зон быстрых реакторов, РТМ 1604.008-88 / Под ред. А.В. Жукова. – Обнинск: ФЭИ, 1989.
8. Жуков А.В., Свириденко Е.Я., Сорокин А.П. Датчики для измерения локальных скоростей (расходов) жидкометаллического теплоносителя в модельных стержневых сборках ЯЭУ / Методы и средства измерения тепловых параметров: Сб. трудов ГНЦ РФ-ФЭИ им. А.И. Лейпунского. – Обнинск: ФЭИ, 1996.
9. Каталог стендов, реакторов нулевой мощности и других экспериментальных установок. – М.: Изд. СЭВ, КНТС-2, 1978. – С. 20-22.
10. Жуков А.В., Кириллов П.Л., Матюхин Н.М. и др. Теплогидравлический расчет ТВС быстрых реакторов с жидкометаллическим охлаждением. – М.: Энергоатомиздат, 1985.
11. Zhukov A. V., Sorokin A. P., Smirnov V. P., Papandin M. V. Heat Transfer in Lead-Cooled Fast Reactor (LCFR) / Proceedings of ARS'94 International Topical Meeting on Advances Reactors Safety (Hyatt Regency Pittsburg, PA, April 17 – 24, 1994). – V. 1. – P. 66-69.
12. Субботин В.И., Ибрагимов М.Х., Ушаков П.А., Бобков В.П., Жуков А.В., Юрьев Ю.С. Гидроди-

намика и теплообмен в атомных энергетических установках (основы расчета). – М.: Атомиздат, 1975.

13. Жуков А.В., Сорокин А.П., Папандин М.В., Смирнов В.П. Влияние переменного энерговыделения на коэффициент теплоотдачи в квадратных решетках//Атомная энергия. – 1992. – Т. 74. – Вып. 3. – С. 194-198.

14. Жуков А.В., Сорокин А.П., Матюхин Н.М. Межканальный обмен в ТВС быстрых реакторов: расчетные программы и практическое приложение. – М.: Энергоатомиздат, 1991.

15. Казачковский О.Д., Жуков А.В., Сорокин А.П., Матюхин Н.М. Температурные поля в формоизмененных ТВС быстрых реакторов//Атомная энергия. – 1988. – Т. 65. – Вып. 2.

16. Жуков А.В., Матюхин Н.М., Сорокин А.П. Теплогидравлические характеристики модельных ТВС реакторов при частичной блокировке проходного сечения (ТВЭЛы с проволочными навивками)//Известия вузов. Ядерная энергетика. – 1997. – № 5. – С. 65-73.

17. Жуков А.В., Сорокин А.П., Матюхин Н.М. Исследование полей скорости и температуры в тепловыделяющих сборках реакторов с частичной блокировкой проходного сечения/Труды Международной конф. «Теплофизика 98». – Обнинск: ФЭИ, 1998. – Т. 1. – С. 115-131.

18. Орлов В.В., Субботин В.И., Адамов Е.О. и др. Реализация концепции свинцового охлаждения в реакторах БРС-1000 и БРС-300/В кн.: Докл. VII Всесоюзного семинара по проблемам физики реакторов. – М.: ЦНИИ Атоминформ, 1991. – С. 19-21.

Поступила в редакцию 1.09.2006

УДК 621.039.534

Temperature Regimes of Pins for Ship Nuclear Reactors with Liquid-Metal Cooling \ A.V. Zukov, A.P. Sorokin, A.D. Efanov, J.A. Kuzina; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher School. Nuclear Power Engineering). – Obninsk, 2007. – 13 pages, 11 illustration. – References – 18 titles.

Results of complex thermohydraulic researches obtained for reactor cores with liquid-metal coolant are stated taking into account specific characteristics of alloy Pb-Bi used as coolant for nuclear reactors. Methods and techniques of studying of temperature and velocity fields in the model assemblies developed on the basis of methods of thermal modeling are considered. Experimental data on heat transfer and maximal temperature non-uniformities in regular pin lattices and in non-standard channels are presented. Recommendations for calculation of local and average factors of mass and heat exchange (convective component) for wire wrapped pins («an edge on an edge») are given. The effects caused by deformation, spacer devices and partial blocking of through passage section in pin lattices cooled by liquid metal are considered.

УДК 621.039.534

Conceptual Development Works of the Accelerator-Driven Systems with Lead-Bismuth Coolant \ E.A. Zemskov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher School. Nuclear Power Engineering). – Obninsk, 2007. – 10 pages, 2 tables, 5 illustrations. – References – 12 titles.

A brief review of realized at SSC RF-IPPE designs of the accelerator-driven systems (ADS) using lead-bismuth eutectic as a coolant and target is presented. The technical characteristics of manufactured target complex MK-1 for proton accelerator LANSCE (LANL, USA) are given. The prototype model of the ADS for transmutation of minor actinides is considered. The concept of a cascade electro-nuclear installation with an accelerator of electrons is posed.

УДК 621.039.52

The State and Problems of Computation-Methodical Support of Designed Reactor Installations with Lead-Bismuth Coolant \ O.G. Komlev, N.N. Novikova, M.M. Trevgoda, E.V. Filimonov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher School. Nuclear Power Engineering). – Obninsk, 2007. – 13 pages, 1 illustration. – References – 15 titles.

The paper presents a brief review of the state and basic problems of computation-methodical support of designing the reactor installations with lead-bismuth coolant regarding validation of neutron-physical, thermal-hydraulic and radiation characteristics.

УДК 621.039.534

Coagulation Model of Bubbles Injected by Jet Injector into Heavy Liquid Metal Flow \ V.S. Fedotovskiy, T.N. Verestchagina, Yu.I. Orlov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher School. Nuclear Power Engineering). – Obninsk, 2007. – 11 pages, 4 illustrations. – References – 8 titles.

A mathematical model of bubbles coagulation in the process of outflow of fine-dispersed gas-liquid flow from the jet injector into the channel with coolant flow is presented. The model allows estimating the efficiency of the injector method for gas mixture injection into heavy liquid metal coolant with the technological aim. Mechanisms of gradient, inertial and turbulent coagulations resulting in an evolution of the bubbles sizes spectrum along the channel are considered. Computation dependences of the bubbles sizes spectrums, an average bubble size and the size of specific interphase surface on the distance from the injector are presented.

УДК 621.039.51

Experimental and Numerical Investigations into Thermalhydraulics of the Model of Liquid Metal-Cooled Target System TS-1 \ G.P. Bogoslovskaya, A.D. Efanov, E.F. Ivanov, Yu.D. Levchenko, Yu.I. Orlov, A.P. Sorokin, V.S. Fedotovskiy; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy.