

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ И РАСЧЕТНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕПЛОВЫХ И ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В МОДЕЛИ ЖИДКОМЕТАЛЛИЧЕСКОГО МИШЕННОГО КОМПЛЕКСА МК-1

Г.П. Богословская, А.Д. Ефанов, Е.Ф. Иванов, Ю.Д. Левченко,

Ю.И. Орлов, А.П. Сорокин, В.С. Федотовский

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



Представлены результаты гидродинамических и тепловых экспериментов, выполненных в ГНЦ РФ-ФЭИ на моделях оконной мишени ускорительно-управляемой системы. В реальной установке поток сплава свинец-висмут должен обеспечивать необходимый теплосъем с мембраны и теплоотвод из объема мишени. Мишень представляет собой кольцевой канал, в котором поток теплоносителя поворачивает на 180° около мембраны и входит в центральную трубу с профилирующей решеткой.

Гидродинамические измерения выполнялись на воздушном стенде. Измерения скорости потока проводились с использованием проволочных термоанемометров, расхода – профилированных сопел и перепадов давления с помощью микроанометров и электрических преобразователей перепадов давления. Температурные поля измерялись хромель-копелевыми термопарами.

В тепловой модели мишени использовался эвтектический натрий-калиевый сплав. Поле температур в теплоносителе измерялось подвижным термопарным зондом, температура на поверхности мембраны – подвижной термопарой.

Представлены результаты стандартной задачи по теплообмену в модели мишени, в которой приняли участие специалисты из Японии, Испании, Италии, России и Китая.

Полученные данные использованы для отработки конструкции, верификации расчетных кодов, анализа термонапряжений и прочности элементов конструкции.

ВВЕДЕНИЕ

Работы по обоснованию конструкции мишенного комплекса ускорительно-управляемой системы начались в ГНЦ РФ-ФЭИ под руководством Б.Ф. Громова в конце девяностых годов прошлого столетия [1].

Мишенный комплекс МК-1 является составной частью экспериментальной установки, создаваемой в Лос-Аламосской Национальной Лаборатории (США) для проведения испытаний в пучке протонов ускорителя LANSCE. В качестве материа-

ла мишени используется сплав свинец–висмут (Pb–Bi). Объемы ионопровода и мишени разделены тонкостенной металлической мембраной. При ядерном взаимодействии пучка протонов с материалом мишени в ней генерируется поток высокоэнергетических нейтронов. Этот процесс сопровождается объемным энерговыделением в 600 кВт, создавая высоконапряженные условия работы мембраны и других элементов конструкции мишени. Поток сплава должен обеспечивать необходимый теплосъем с мембраны и теплоотвод из объема мишени в стационарных, переходных и аварийных условиях.

Обоснование работоспособности мишени основано на расчетных и экспериментальных исследованиях [2, 3]. Экспериментальные исследования гидродинамических и тепловых процессов проводились в ГНЦ РФ-ФЭИ на специальных моделях. Контуры проточных частей экспериментальных моделей мишени полностью соответствовали конструкции мишени. Модели выполнены в масштабе 1:1.

Стандартная задача по теплообмену в модели мишени была организована в рамках совещания Международной рабочей группы по теплогидравлике усовершенствованных ядерных реакторов Международной ассоциации гидравлических исследований. В проведении расчетных исследований принимали участие специалисты из Японии, Испании, Китая, Италии и России [4–7]. Сравнительный анализ результатов расчета показал, что наблюдается расхождение рассчитанных по различным кодам распределений температуры мембраны и теплоносителя и экспериментальных данных.

Результаты использованы для отработки конструкции, верификации компьютерных кодов, анализа термонапряжений и прочности элементов конструкции.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ МОДЕЛИ МИШЕНИ

Гидродинамическая модель. Исследования гидродинамических процессов в мишени проводились на воздушном стенде на полномасштабных моделях. Экспериментальные модели были спроектированы и изготовлены разъемными. Комбинации разъемных частей обеспечивали возможность проведения измерений как на всей модели, так и в отдельных элементах проточной части.

Поток воздуха в проточной части модели мишени имел неравномерное распределение статического давления в исследуемых сечениях каналов. В связи с этим основным преобразователем скорости являлся зонд, состоящий из двух капилляров диаметром 0,8×0,1 мм. Поперечное сечение рабочей части зонда имело размеры 2,4×0,8 мм. Зонды калибровались на специальной аэродинамической установке с равномерным полем скорости низкотурбулентного потока.

Продольная составляющая воздуха регистрировалась проволоочными термоанемометрами. Для измерения расходов применялись устройства в виде профилированных сопел. Перепады давления по длине участков контура модели мишени измерялись с помощью микроанометров или электрических преобразователей перепадов давления.

Модель ГДМ-4 включала половину длины кольцевого канала, поворот проточной части модели на 180 град., центральную трубу с профилирующей решеткой.

В проточной части модели в стенках четырех характерных сечений имелись по четыре отверстия диаметром 1,3 мм для измерения давлений в потоке воздуха. Расстояние между имитатором разделительной мембраны и профилирующей решеткой модели могло изменяться в диапазоне 0–10 мм.

Тепловая модель мишени. Для исследования тепловых процессов в мишени использовался эвтектический натриево–калиевый сплав (78% К; 22% Na). Теоретическим основанием для использования этого теплоносителя служит тот факт,

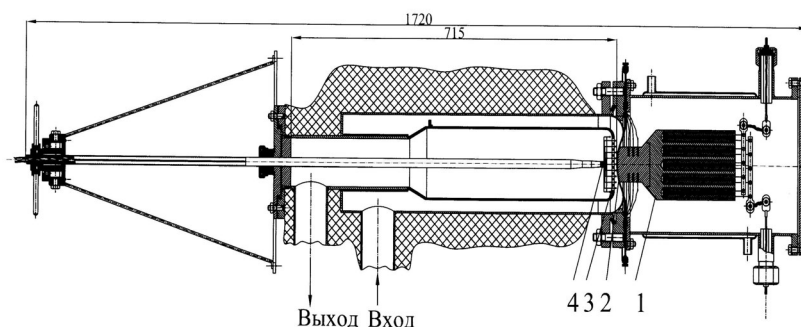


Рис.1. Продольный вид тепловой модели мишени: 1 – медный блок с нихромовыми нагревателями; 2 – мембрана мишени; 3 – решетка с профилирующими отверстиями; 4 – термопарный зонд

что значения чисел Прандтля сплавов Na–K ($Pr = 0,031$ при температурах опытов) и Pb–Bi ($Pr = 0,03$ при рабочих температурах в мишени) практически совпадают. Кроме того, технология проведения эксперимента при использовании сплава Na–K значительно проще, чем в опытах с теплоносителем Pb–Bi.

Продольный разрез тепловой модели мишени дан на рис. 1. Мембрана в виде профильного диска толщиной 1,5 мм изготовлена из нержавеющей стали. К мембране припаян медный стержень диаметром 65 мм, с помощью которого осуществлялся нагрев мембраны. На поверхности мембраны, со стороны, омываемой теплоносителем, сделан полукруглый паз глубиной 0,6 мм, в котором перемещался капилляр диаметром $0,6 \times 0,1$ мм. Внутри капилляра была расположена хромель-копелевая термопара. Расстояние от центра спаев термопары до поверхности мембраны равнялось примерно 0,2 мм. В опытах была достигнута плотность теплового потока с поверхности мембраны $q_f = 86 \text{ Вт/см}^2$.

Нагревательный узел представлял собой медный блок, в котором были просверлены 19 отверстий диаметром 19 мм и глубиной 165 мм, где и размещались нагреватели. Нагревательный блок содержал 4 нихромовые спирали диаметром 4 мм, установленные в керамических втулках.

Поле скоростей потока теплоносителя в области вершины мембраны и в центральной трубе модели мишени формировалось профилирующей решеткой. В центре решетки имелось отверстие диаметром 10 мм. В центральной части решетки пористость решетки равнялась 0,5, в периферийной зоне 0,15.

Для измерения температур потока сплава Na–K в центральной трубе модели применялся подвижный зонд с расположенными на нем 21 хромель-копелевыми термопарами. Термопары располагались по двум взаимно перпендикулярным диаметрам центральной трубы. Радиальные координаты спаев термопар соответствовали центрам отверстий профилирующей решетки. Спаи термопар были расположены на огибающей линии, повторяющей профиль мембраны.

Исследуемые теплогидравлические режимы представлены в табл. 1.

ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЕ И ТЕПЛОВЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Гидравлические потери в контуре мишени. Коэффициенты гидравлического сопротивления рассчитывались по измеренным падениям давления по длине всего контура модели мишени или отдельных участков с учетом работы расширения воздуха.

Весь контур модели мишени условно разделен на три основных участка: входной, выходной и участок поворота профилирующей решетки. Было установлено экспериментально, что режим течения (число Рейнольдса) незначительно влияет

Таблица 1

Теплогидравлические режимы испытаний моделей мишени и работы мишени

| Характеристика | Мишень мишенного комплекса МК-1 | Гидродинамическая модель (ГДМ-1 и ГДМ-4) | Тепловая модель (ТМ) |
|----------------------------|--|--|---|
| Рабочая среда | Pb–Bi | воздух | Na–K |
| Энерговыведение в мембране | Плотность теплового потока с вершины мембраны $(q_f)_{\max} = 64 \text{ Вт/см}^2$ Полная мощность $Q_f =$ кВт | Изотермический поток воздуха | Плотность теплового потока с поверхности мембраны $q_f = 86 \text{ Вт/см}^2 = \text{const}$ Полная мощность $Q_f = 2.63 \text{ кВт}$ |
| Энерговыведение в потоке | $\approx 600 \text{ кВт}$ | | — |
| Входная температура | 320°C | $25 \pm 1^\circ\text{C}$ | 35°C |
| Выходная температура | 220°C | | $35 + (1 \div 2)^\circ\text{C}$ |
| Расход | 15.0 м³/ч | $< 1100 \text{ м}^3/\text{ч}$ | 7 м³/ч |
| Число Pr | 0,03 | Не учитывается | 0,031 |
| Число Re | 177 000 | 40 000 – 180 000 | Re = 23750 |
| Число Pe | 5310 | Не учитывается | Pe = 700 |

на значение коэффициента гидравлического сопротивления. Численно коэффициент гидравлического сопротивления определялся линейной экстраполяцией зависимости $\zeta = f(\text{Re})$, полученной в экспериментах. Для числа $\text{Re} = 177000$, характерного для мишени, значение коэффициента гидравлического сопротивления равнялось 71,0.

Для выравнивания скоростей потока перед поворотом потока к мембране была установлена шайба в кольцевом пространстве. После установки шайбы значение ζ стало равным 75,2. При этом значении ζ гидравлические потери в натурной мишени составят 0,034 МПа при расходе жидкого сплава Pb–Bi 15 м³/ч. Таким образом, значения гидравлических потерь, полученные в экспериментах на модели мишени, оказались меньшими, чем проектные для мишени ($\approx 0,05 \text{ МПа}$). Отметим, что основные гидравлические потери в мишени были сосредоточены на участке поворота потока теплоносителя к мембране и в профилирующей решетке (65%). Остальные гидравлические потери на входном и выходном участках были примерно равны между собой.

Оптимизация конструкции входного коллектора мишени. Боковой подвод теплоносителя к коллектору приводит к формированию неравномерности скоростей потока в азимутальном направлении на выходе из коллектора. Неравномерность может сохраняться на всей длине кольцевого пространства.

Были измерены скорости потока воздуха на середине кольцевого канала, а также в сечении, удаленном от поворота проточной части модели к мембране на 4–5 мм. Распределения скоростей потока воздуха, полученные на модели ГДМ-1 при $\text{Re} = 87400$, показаны на рис. 2а. Видно, что профили скорости несимметричны относительно вертикальной оси. Заметно проявлялись теневые области в потоке после дистанционирующих ребер.

Выравнивание профиля скорости потока воздуха было достигнуто с помощью серповидной шайбы, которая устанавливалась перпендикулярно к направлению потока на входе в кольцевой зазор модели. Для снижения влияния дистанционирующих ребер на распределение скоростей расстояние между задней кромкой ребер и входом участка поворота проточной части модели было увеличено до 65 мм. Профиль скорости, полученный после установки шайбы, дан на рис. 2б. Здесь для наглядности результатов масштабом являлась среднеинтегральная ско-

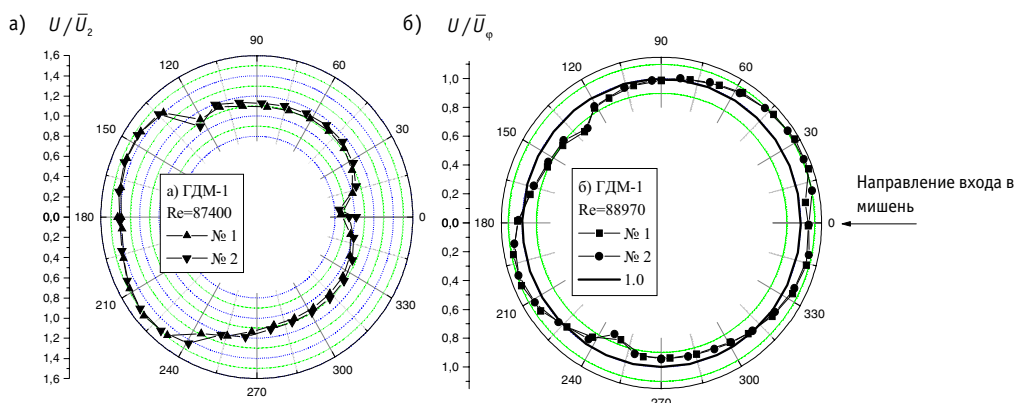


Рис. 2. Азимутальные распределения скоростей потока воздуха на середине кольцевого канала модели мишени ГДМ-1 в сечении перед поворотом к мембране до (а) и после (б) установки выравнивающей решетки

рость $\bar{U}_\varphi = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} U d\varphi$. Видно, что максимальное превышение локальной скорости над средним значением составило 11%.

ПРОФИЛИ СКОРОСТИ ПОТОКА ВОЗДУХА В ЦЕНТРАЛЬНОЙ ТРУБЕ МОДЕЛИ МИШЕНИ

В опытах использовалась модель ГДМ-4.

Исследование полей скорости потока в центральной трубе модели проводилось для верификации расчетных кодов и проверки эффективности решетки при формировании необходимого профиля течения сплава.

В первом опыте исследовалось распределение скоростей потока воздуха вдоль оси центральной трубы. Результаты представлены на рис. 3а. Масштабом для скоростей являлась средняя скорость потока воздуха в центральной трубе \bar{U}_4 . Продольная координата «z» отсчитывалась от поверхности профилирующей решетки со стороны выхода из модели. На выходе из центрального отверстия решетки была зарегистрирована скорость потока сплава, превышавшая в 4,35 раза скорость при среднем расходе сплава. На длине первых 50 мм центральной трубы относительная скорость потока U/\bar{U}_4 снижалась

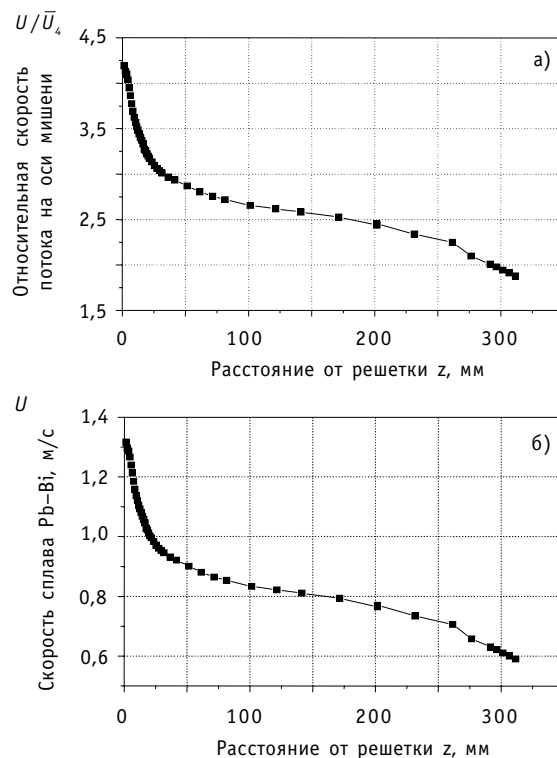


Рис.3. Результаты измерений скоростей потока воздуха на оси центральной трубы модели мишени и соответствующие скорости жидкого металла Pb–Bi в мишени (ГДМ-4; Re = 170800): а) — U/\bar{U}_4 ; б) $U_4 = 0,314$ м/с

до значения 2.8. На рис. 3б даны скорости потока сплава Pb–Bi в мишени, рассчитанные, исходя из опытных данных, полученных на модели мишени. При средней скорости сплава в центральной трубе $U_4=0,314$ м/с максимальная скорость на выходе из отверстия решетки диаметром 10 мм составляет 1,36 м/с. На расстоянии 255 мм от решетки скорость вдоль оси мишени уменьшалась до 0,71 м/с.

Радиальные профили скорости были получены для 5 поперечных сечений центральной трубы модели мишени, отстоявших от профилирующей решетки на 20, 50, 100, 160 и 255 мм. Все полученные профили скорости были практически симметричными относительно оси центральной трубы. Но следует отметить, что в сечениях при $z \geq 50$ мм профили скорости были монотонными. Наблюдалась немонотонность профиля скорости при $z = 20$ мм и отрицательные значения скоростей вблизи стенки трубы можно объяснить влиянием струйных течений из отдельных отверстий решетки. В центральной части поперечного сечения трубы сохранялись повышенные скорости. Например, в сечении с $z = 255$ мм скорость потока на оси центральной трубы примерно вдвое превышала известное из литературы стабилизированное значение. Таким образом, решетка модели мишени формировала поле скоростей с высокими значениями их вблизи оси центральной трубы.

Пульсации скорости потока сплава в центральной трубе модели мишени. Профилирующая решетка с линейными размерами отверстий 5÷10 мм является источником повышенной турбулентности потока сплава. Турбулизация потока способствует выравниванию полей скорости и температуры в зоне объемного энерговыделения. Профилирующая решетка является в гидродинамическом смысле тонкой (толщина меньше удвоенного минимального диаметра отверстий, $\delta < 10$ мм) и установлена в сложной проточной части контура мишени, вблизи поворота и мембраны. Пористость решетки неравномерна вдоль радиуса. Поворот и мембрана создают радиальные составляющие вектора скорости потока, набегающего на решетку. В результате этого, даже приближенный расчет гидродинамики потока вблизи решетки является проблематичным.

Локальное безразмерное среднеквадратичное значение пульсации скорости потока рассчитывали в виде σ_u/\bar{U}_4 и σ_u/\bar{U} . Распределение $\sigma_u/\bar{U}_4 = f(z)$ вдоль оси центральной трубы дано на рис. 4а. Немонотонность кривой является результатом сложного взаимодействия эффектов струйных течений потока и переменной пористости профилирующей решетки. Максимум интенсивности пульсаций скорости соответствовал продольной координате $z \approx 20$ мм. С увеличением координаты z амплитуды пульсаций скорости уменьшались, достигая минимума на расстоянии $z = 125\div 150$ мм от решетки. Возрастание интенсивности пульсаций на участке $z > 150$ мм объяснялось влиянием ступенчатого изменения пористости решетки (с 0,5 до 0,15), как источника повышенной турбулентности потока. С приближением к вершине мембраны $z \rightarrow -10$ мм интенсивность турбулентности потока возрастала от минимального значения при $z = 2$ мм. Наблюдался высокий уровень интенсивности турбулентных пульсаций, составлявший от 0,2 до 0,6 среднерасходной скорости потока в центральной трубе.

Зависимости $\sigma_u/U = f(z)$ даны на рис. 4б. Характер кривой по сравнению с рис. 4а не изменился, но максимальное значение интенсивности пульсации скорости оказалось вблизи вершины мембраны. По-видимому, причина этого факта заключалась в снижении скоростей и неустойчивости потока вблизи вершины мембраны.

Таким образом, важным свойством поля скоростей потока сплава в зоне объемного энерговыделения мишени является высокая интенсивность пульсаций скорости потока.

Температурное поле в модели мишени исследовалось при постоянной плотности теплового потока с поверхности мембраны, равном 86 Вт/см^2 . Это значение превышало на 30% значение локального теплового потока с вершины мембраны мишени. Законы изменения и величины тепловых потоков в модели и мишени были различными. Поэтому результаты исследований предназначены для верификации проектных кодов и выявления особенностей температурных полей в потоке теплоносителя.

В поперечных сечениях центральной трубы модели мишени, отстоявших от поверхности мембраны на расстояния от 300 до 1 мм были измерены мгновенные значения температуры в потоке жидкого металла.

Из сопоставления всех радиальных распределений температур следовало, что в центральной трубе формировался узкий «факел» горячего теплоносителя (рис. 5). По мере продвижения теплоносителя происходило быстрое размывание «факела». Перегрев теплоносителя на оси составлял $29,2^\circ\text{C}$ на расстоянии 15 мм от вершины поверхности мембраны; 11°C – на расстоянии 60 мм; 9°C – 100 мм; 5°C – 200 мм; $2,5^\circ\text{C}$ – 300 мм. Важным экспериментальным

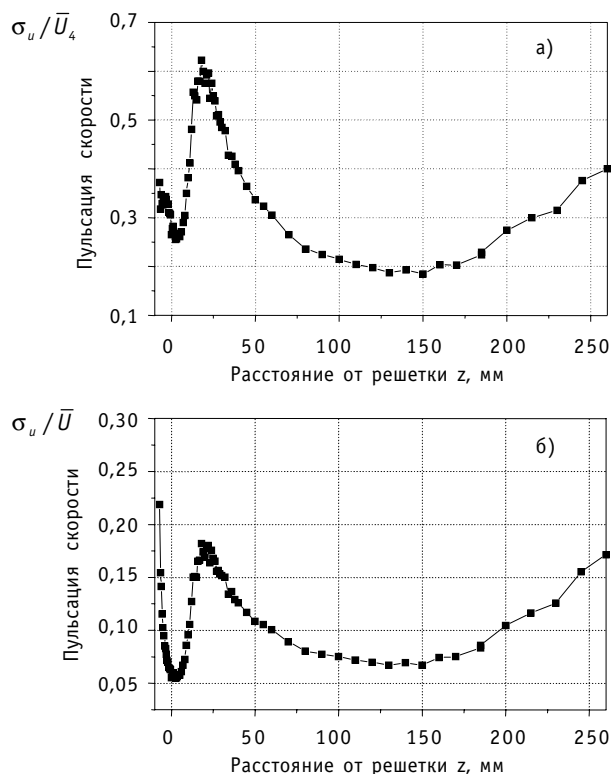


Рис. 4. Распределение пульсаций скорости на оси модели (модель ГДМ-4 $Re = 167000$): а) $\sigma_u / \bar{U}_4 = f(z)$; б) $\sigma_u / \bar{U} = f(z)$

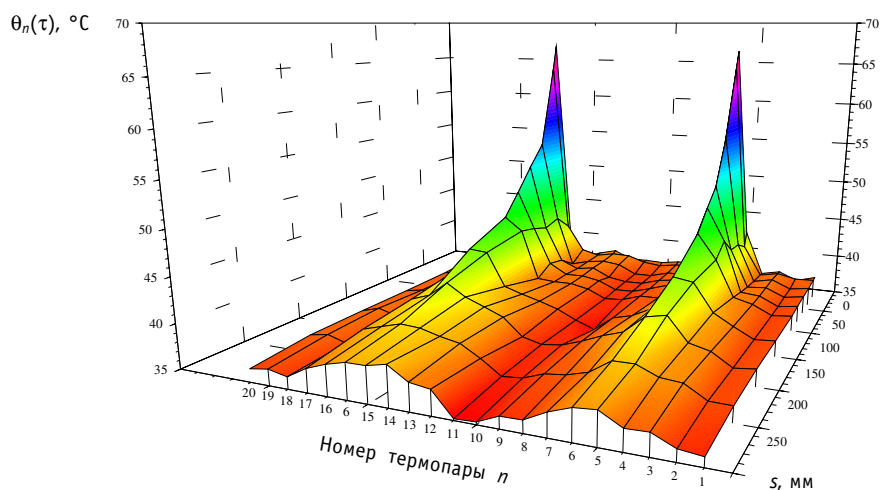


Рис. 5. Объемное представление температурного поля теплоносителя в мишени

фактом, согласовавшимся с результатами гидродинамических исследований, было обнаружение значительных флуктуаций температуры теплоносителя. Так, на расстоянии 15 мм от поверхности мембраны они достигали $(13\div 18)^\circ\text{C}$, что составляло примерно 50% от подогрева теплоносителя. При этом флуктуации температуры теплоносителя в отверстиях, смежных с центральным, были значительно меньшими и составляли $(3\div 5)^\circ\text{C}$. В потоке с высоким уровнем турбулентности осуществлялось интенсивное перемешивание теплоносителя и выравнивание радиального профиля температур.

При минимальном расстоянии от вершины мембраны 1 мм термопара регистрировала среднеквадратическое значение пульсаций температуры потока теплоносителя до 7°C . Температура потока возрастала с приближением к центру мембраны. Таким образом, характерным свойством температурного поля в модели мишени являлся уровень амплитуд пульсаций на оси центральной, соизмеримый с локальным подогревом жидкости.

Анализ изменения температуры на оси мембраны показывает (рис. 6), что в точке вершины мембраны среднеквадратическое значение пульсаций температуры σ_t имело наибольшее значение, составляя $4\div 5^\circ\text{C}$. При движении к периферии обогреваемого круга мембраны s_t убывали. Распределения мощности сигнала мембранной термопары по частотной оси являлись типичным низкочастотным спектром с полосой порядка $(0\div 1)$ Гц.

Таким образом, установленные в опытах значительные амплитуды пульсаций температуры поверхности мембраны требуют анализа прочностных характеристик мембраны мишени при установленных в опытах циклических температурных нагрузках.

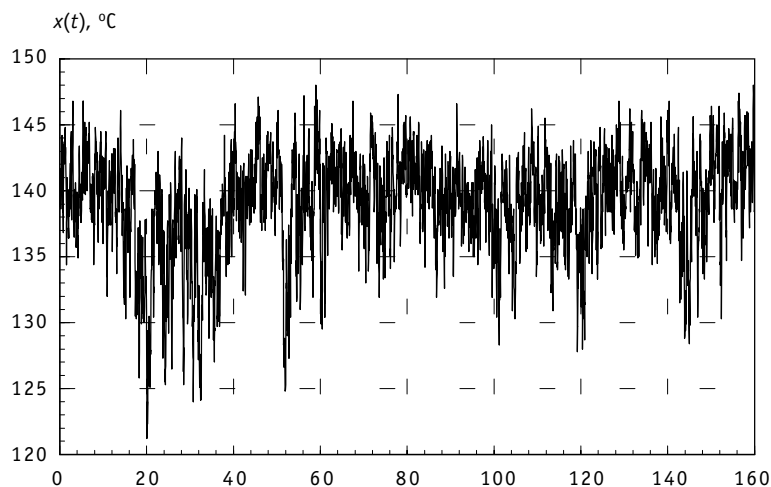


Рис. 6. Температура мембраны $x(t) = \theta_{24}(t)$ при $y = 0$ мм; $\theta_{22} = 33,0^\circ\text{C}$; $\bar{x}(t) = 139^\circ\text{C}$, $\sigma_x(t) = 3,9^\circ\text{C}$

РЕЗУЛЬТАТЫ СТАНДАРТНОЙ ЗАДАЧИ

В расчетных исследованиях по стандартной задаче приняли участие специалисты из Японии [4], Испании [5], Китая [6], Италии и России [7]. Наряду с трехмерной, использовалась и двухмерная аппроксимация задачи (табл. 2).

Сравнение расчетных и экспериментальных данных показало, что имеется значительное расхождение как рассчитанного по различным кодам распределений температуры мембраны, так и расчетного и экспериментального распределений (рис. 7). Для точного прогнозирования температуры мембраны нужны более точ-

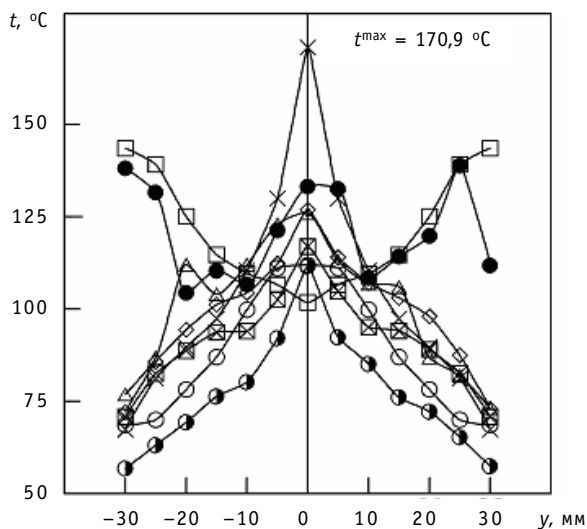


Рис. 7. Распределение температуры на поверхности мембраны, полученное экспериментально и в результате расчетов по различным кодам (y - расстояние от оси мембраны): ● - эксперимент; ▲ - FLUENT RNG; □ - STAR-CD; ◇ - AQUA-TM; ○ - AQUA-ASM; ● - FLUENT-RSM; ○ - PHOENICS 3.2; x - ANSYS version 5.7.1

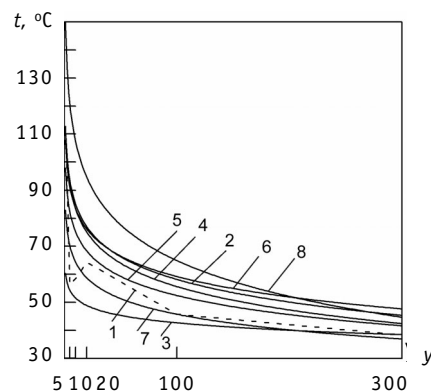


Рис. 8. Распределение температуры теплоносителя по оси модели мишени, измеренное термопарой, расположенной на оси термпарного зонда, и рассчитанное по различным кодам: 1 - эксперимент; 2 - FLUENT RNG; 3 - STAR-CD; 4 - AQUA-TM; 5 - AQUA-ASM; 6 - FLUENT RCM; 7 - PHOENICS 3.2; 8 - ANSYS версия 5.7.1

ные подходы к моделированию профилирующей решетки и условий энерговыделения на поверхности мембраны. Расчетные и экспериментальные значения температуры теплоносителя практически совпадают у всех исследователей, за исключением значений на оси канала. Причиной расхождения значений на оси канала, вероятно, является отсутствие симметрии реального течения во внутренней трубе. На рис. 8 показаны расчетные и экспериментальные распределения температуры теплоносителя по оси модели.

Кроме моделей турбулентности, представленных в табл. 2, участниками расчетов были сделаны попытки применить и другие модели. Следует отметить, что не все исследованные модели турбулентности генерировали турбулизацию потока вследствие взаимодействия струй за профилирующей решеткой, что привело к су-

Таблица 2

Коды и модели, использованные при выполнении тестовых расчетов

| Группа исследователей | Mikhin V. I. ⁷ , Vecchi M. ⁶ [5] | Chen H.Y. ¹ [4] | Pena A. ² , Castro A. ³ [3] | | Takata T. ⁴ , Yamaguchi A. ⁴ , Hashimoto A. ⁵ [2] | |
|-----------------------|--|----------------------------|---|------------------|--|--------------------|
| Компьютерный код | ANSYS version 5.7.1 | Phoenics 3.2 | FLUENT (version 5.5) [6] | STAR-CD [5] | AQUA | FLUENT version 4.8 |
| Разработчик кода | ANSYS Inc. | CHAM, | FLUENT Inc | CDL | JNS | FLUENT Inc |
| Размерность | 2 | 2 | 3 | 2 | 3 | 3 |
| Модель турбулентности | RNG $k-\epsilon$ | LVEL | $k-\epsilon$ | RNG $k-\epsilon$ | ASM | RSM |
| Модель геометрии | Решетка с отверстиями | Модель пористой среды | | | Трехмерная | Двумерная |

1 - Nuclear Reactor Thermohydraulic Laboratory, China Institute of Atomic Energy, China; 2 - The University of the Basque Country, Dpt. Nuclear Engineering & Fluid Mechanics, Spain; 3 - LAESA, Zaragoza, Spain; 4 - Japan Nuclear Cycle Development Institute, Japan; 5 - NDD Corporation, Japan; 6 - ENEA, Italy; 7 - SSC RF-IPPE, Russia.

ществленным расхождениям между результатами расчетов и экспериментов.

В результате постановки и проведения стандартной задачи была создана база данных для отработки конструкции, верификации расчетных кодов, анализа термонапряжений и прочности элементов конструкции.

Литература

1. Громов Б.Ф., Ефимов Е.И., Леончук М.П. и др. Мишенный комплекс МК-1/ Пояснительная записка к техническому рабочему проекту, ГИЦ РФ-ФЗИ, № 559.1. ПЗ., 1999.
2. Boronin A.A., Ivanov Ye.F., Levchenko Yu.D., Orlov Yu.I., Sorokin A.P., Fedotovskiy V.S., Yefanov A.D. Study of thermal and Hydrodynamic Process in Experimental Target Model of NC-1 Liquid Metal Target System // American Nuclear Society, Accelerator Applications/Acceleration, Driven Transmutation Technology and Applications 01 (AccApp/ADTTA 01), Reno, Nevada, 2000.
3. Ефанов А.Д., Орлов Ю.И., Сорокин А.П., Иванов Е.Ф., Богословская Г.П. Тепловые эксперименты на модели мишени для ускорительно-управляемой системы//Атомная энергия. – 2002. – Т. 93. – Вып. 5. – С. 384.
4. Takata T., Yamaguchi A., Hachimoto A. Benchmark calculation of the thermal experiments in the ADS target model/In: Meeting of Internat. Working Group on Thermohydraulics of Advanced Nuclear Reactors (Obninsk, Russia, 17-19 July, 2001). – P. 251-269.
5. Pena A., Castro A., Esteban G.A. e. a. Benchmark activities of UPV/EHU and LAESA concerning the TS-1 target system experiments/Meeting of International Working Group on Thermohydraulics of Advanced Nuclear Reactors «Thermal Hydraulics for Fast Reactors with Different Coolants» (Obninsk, Russia, 17-19 July, 2001). – Obninsk: SSC RF-IPPE, 2003. – P. 236-250.
6. Chen H.Y. Calculation results of the benchmark problem/In: Meeting of Internat. Working Group on Thermohydraulics of Advanced Nuclear Reactors (Obninsk, Russia, 17-19 July, 2001). – P. 270.
7. Mikhlin V.I., Vecchi M. Results of testing the ANSYS (part FLOTRAN) code in the ADS-target-model thermo-hydraulics calculations. ENEA, Italy (Bologna), December 2001.

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.

Yadernaya energetika» (Communications of Higher School. Nuclear Power Engineering). – Obninsk, 2007. – 10 pages, 2 tables, 8 illustrations. – References – 7 titles.

Results of hydrodynamic and thermal experiments on the models of window target of accelerator driven system carried out in the State Scientific Center of Russian Federation – Institute for Physics and Power Engineering are presented in the paper.

In real facility lead-bismuth flow should provide the needed heat removal from the membrane, as well as from the target volume. The target is an annular channel, in which coolant flow turns through 180 degrees near the membrane and enters the central tube with the distributing grid installed.

Hydrodynamic measurements were performed in air test facility. Flow velocity was measured with the use of hot wire anemometers; flow rate was controlled by specially contoured nozzles, pressure drop – by micro manometers and electrical converters. Temperature fields were measured by chromel-copel thermocouples.

Eutectic sodium-potassium alloy was used as a coolant in the thermal model. Temperature field in the coolant was controlled by mobile thermocouple probe, temperature at the membrane surface was measured by mobile thermocouple.

The paper also presents results of benchmark problems on the target model heat transfer. Specialists from Japan, Spain, Italy, Russia, and China participated in the benchmark.

The data obtained in experiments and calculations may be used in improvement of target structure, in verification of numerical codes, in analysis of thermal stresses and strength characteristics of structural elements.

УДК 621.039.534

Hydrodynamics of Header Systems of Nuclear Power Plants \B.N. Gabrianovich, V.N. Del'nov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher School. Nuclear Power Engineering). – Obninsk, 2007. – 9 pages, 3 illustrations. – References – 18 titles.

Experimental studies on hydrodynamics of flowing part of header systems of nuclear power plants were carried out. The results of these studies on cylindrical and plane distributing header systems of different types are presented.

УДК 621.039.76

Problems and Approaches to Management of Spent Nuclear Fuel of Liquid-Metal-Coolant Reactors of Nuclear Submarines \A.V. Zrodnikov, A.N. Zabudko, S.V. Ignatiev, S.A. Nikolaev, D.V. Pankratov, I.E. Somov, G.P. Suvorov, G.I. Toshinskiy, Yu.G. Dragunov, V.S. Vakhrushin, V.S. Stepanov, S.K. Trantin, V.A. Vasilenko, V.P. Zhuravlev, B.V. Filatov, R.D. Filin; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher School. Nuclear Power Engineering). – Obninsk, 2007. – 10 pages, 2 illustrations. – References – 13 titles.

The problems on treatment of liquid metal cooled reactor spent fuel were considered and main approaches to solve them were formulated. The latter can be realized as an independent projects to be funded through Russian governmental budget, as well bilateral and multilateral funding by countries-donors within international collaboration on complex utilization of nuclear submarines and rehabilitation of radiation contaminated sites at North-West region of Russian Federation.

УДК 621.039.73

Immobilization of High-active Wastes into Mineral-like Materials by SHS Process \E.E. Konovalov, S.V. Yudinsev, B.S. Nikonov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher School. Nuclear Power Engineering). – Obninsk, 2007. – 11 pages, 3 tables, 6 illustrations. – References – 11 titles.

Experimental investigations have been carried out on high temperature treatment of materials (modeling different types of high active wastes) with incorporation of radionuclides in the