

А.Д. Ефанов, А.П. Сорокин, А.В. Жуков, Е.Ф. Иванов

Государственный научный центр Российской Федерации - Физико-энергетический институт
им. А.И. Лейпунского, Обнинск, Россия

ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕПЛООБМЕНА В ЖИДКИХ МЕТАЛЛАХ ПРИМЕНИТЕЛЬНО К ЯДЕРНЫМ РЕАКТОРАМ

АННОТАЦИЯ

Представлены и анализируются результаты исследований теплообмена для одно- и двухфазных потоков в каналах сложной формы (тепловыделяющие сборки твэлов, теплообменники) и камерах смешения в ядерных реакторах с жидкометаллическим охлаждением, выполненных в ГНЦ РФ-ФЭИ.

1. ВВЕДЕНИЕ

Проблема теплогидравлики жидких металлов возникла в 50-х годах в связи с развитием работ для реактора со свинцово-висмутовым теплоносителем и быстрых реакторов (БР), охлаждаемых натрием. Организаторами и научными руководителями теплофизических исследований жидких металлов в ФЭИ были А.И. Лейпунский и В.И. Субботин. Первые опыты по теплообмену выполнялись на ртути. В дальнейшем ртуть широко использовалась для моделирования теплообмена в реакторах со сплавом свинец-висмут, поскольку эти теплоносители имеют близкие числа Прандтля. Одновременно теплоотдача исследовалась на сплаве свинец-висмут. Позднее были созданы стенды со щелочными металлами для измерений температурных режимов тепловыделяющих сборок твэлов (ТВС) БР в опытах с моделями. В настоящее время ГНЦ РФ-ФЭИ располагает уникальными стендами для исследований теплообменных и массообменных процессов применительно к реакторам с жидкометаллическим охлаждением, многими гидродинамическими стендами.

Параллельно с развитием экспериментальной базы развивались общепфизические и прикладные исследования [1-3]. Прежде всего потребовались разработки методов измерений, датчиков – микротермопар и способов их заделки в теплопередающих стенках, специальных датчиков динамического и полного напора, уточненных характеристик трубок Престона для измерений касательных напряжений на стенках. Была создана методика электромагнитного измерения векторов локальных скоростей жидкого металла. Экспериментально была доказана возможность моделирования гидродинамики несжимаемости сред (воды, жидких металлов) в опытах с воздухом. Указанные методики позволили выполнить широкий круг экспериментов фундаментального и прикладного характера. Так, П.Л. Кириллову и П.А. Ушакову впервые удалось экспериментально доказать квазиуниверсальность профилей скорости теплоносителей и температуры жидких металлов на нормальных к стенкам сложных

каналов. Эта универсальность показала, что обмен импульсом и теплом в азимутальном направлении мал по сравнению с обменом по нормальям, и была положена в основу развития полуэмпирических методов расчетов.

Теплообмен в жидких металлах имеет ряд особенностей. Например, для них характерны большие подогревы по длине каналов относительно разности температур между теплоотдающей стенкой и теплоносителем. Поэтому температурные режимы в ТВС определяются в основном не коэффициентами теплоотдачи, а локальными подогревами жидкого металла, зависящими, в частности, от распределения локальных расходов. Неучет неравномерной температуры по сечению модельных ТВС привел на первых этапах исследований к существенным ошибкам в значениях коэффициентов теплоотдачи в "бесконечных" решетках твэлов. По той же причине исследования теплообмена в пучках "методом теплообменника" при небольшом числе трубок носят частный характер. При правильном определении локальных расходов и температур коэффициенты теплоотдачи в теплообменниках мало отличаются от значений, полученных для ТВС.

2. ТЕПЛООБМЕН В КАНАЛАХ СЛОЖНОЙ ФОРМЫ (СБОРКИ ТВЭЛОВ И ТЕПЛООБМЕННИКИ)

При изучении локальных теплогидравлических характеристик, горячих пятен, неравномерностей температуры при наличии нестандартных ячеек было показано, что весьма существенную роль играет межканальный обмен теплоносителем. Комплексные исследования межканального обмена массой и теплом в пучках гладких и оребренных твэлов, твэлов со спиральной дистанционирующей проволокой навивкой дали возможность создать методики расчетов, рекомендовать соответствующие формулы [4-8].

Вопросы теплогидравлики ТВС активных зон исследовательских быстрых реакторов БР-10, БОР-60, энергетических быстрых реакторов БН-350, БН-600, проектов быстрых реакторов БН-800, БН-1600, реакторов с охлаждением сплавом свинец-висмут, реакторов космического назначения с натрий-калиевым охлаждением изучались на разномасштабных моделях, в том числе с учетом возможных деформаций элементов активных зон. В результате были созданы коды для расчета температурных полей в активных зонах жидкометаллических реак-

торов, например, поканальный код МИФ, учитывающий разные виды дистанционирования ТВЭЛов, формоизменение ТВС, неравномерность энерговыделения, тепло- и массообмен между ячейками.

В настоящее время большое внимание уделяется комплексности в проведении исследований – наряду с проведением экспериментов уделяется внимание разработке новых расчетных теплогидравлических кодов и проведению верификационных тестов. Проведенный на базе ГНЦ РФ-ФЭИ бенчмарк по теплообмену в модельных сборках стержней с жидкометаллическим охлаждением применительно к теплогидравлике быстрых реакторов с охлаждением свинцом типа БРЕСТ [9, 10] позволил выполнить анализ расчетных и экспериментальных теплогидравлических характеристик в неоднородной по геометрии и тепловыделению 25 стержневой модельной сборке (15 стержней с относительным шагом $s/d_1 = 1,25$ и 10 стержней с $s/d_2 = 1,46$), обтекаемой натрий-калиевым эвтектическим сплавом, с квадратным расположением стержней при наличии дистанционирующей решетки для режимов, отличающихся скачком энерговыделения по подзонам.

Полученные специалистами из различных стран с использованием расчетных теплогидравлических кодов BRS-TVS.R (Россия), SPIRAL, AQUA (Япония), FLUENT (Испания), STAR-CD (Нидерланды), MATRA, CFX (Республика Корея) расчетные результаты по подогревам теплоносителя в целом согласуются с экспериментальными данными, за исключением периферийных областей (рис. 1). Результаты экспериментов и расчетов по различным кодам, касающиеся температуры оболочки измерительного стержня, согласуются в пределах погрешности экспериментальных данных (рис. 2). Также наблюдается согласие для температурного напора стенка – жидкость. В целом можно считать, что согласие тепловых расчетных и экспериментальных характеристик является удовлетворительным. Конечно, необходимы дальнейшие исследования по сопоставлению локальных характеристик, которые, подчас, сильно расходятся.

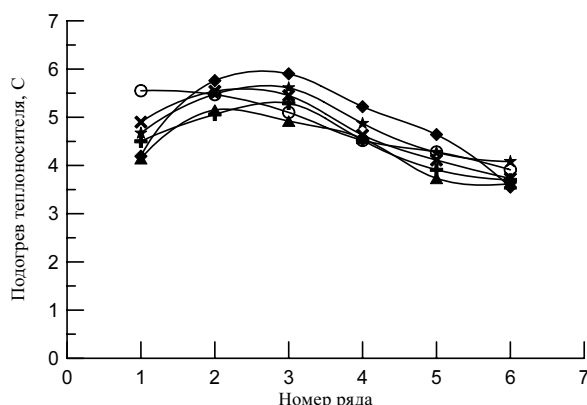


Рис. 1. Подогревы теплоносителя на выходе из модельной сборки как средние величины по рядам имитатора ТВЭЛов (третий опытный режим): \circ – экспериментальные данные, \times – код BRS-TVS.R, $+$ – код SPIRAL и AQUA, \blacktriangle – код FLUENT, \star – код STAR-CD, \blacklozenge – код MATRA

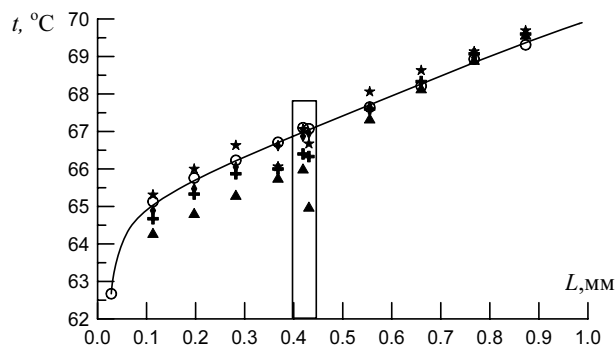


Рис. 2. Сравнение температурного поля по длине измерительного имитатора ТВЭЛ в обработке по зоне с $s/d_1=1,25$ (третий опытный режим): \circ – экспериментальные данные, $+$ – код SPIRAL, \blacktriangle – код FLUENT, \star – код STAR-CD, \blacklozenge – код MATRA

Аксиальная скорость теплоносителя вокруг измерительного имитатора ТВЭЛ довольно хорошо моделируется кодами, кроме области дистанционирующей решетки. Не достигнуто точное моделирование довольно сложной конструкции решетки, что не позволяет описать обменные характеристики в районе ее местоположения.

Выделены основные моменты, которые могут влиять на точность описания теплогидравлических характеристик в модельной сборке. К ним относятся: эффекты перемешивания между соседними ячейками регулярной квадратной решетки (особенно в зоне расположения дистанционирующей решетки) и в периферийных ячейках, более точное описание входных и выходных параметров (влияние коллекторов, входные профили температуры и скорости), граничные условия, использование мельчайших расчетных сеток для тесных ячеек и ячеек, содержащих элементы дистанционирующей решетки, использование различных моделей турбулентности. Каждый код проявил свои преимущества и недостатки, для каждого кода есть возможность повысить точность описания теплогидравлических характеристик в ТВС в пределах используемых ими расчетных методов.

Проведенные совместно с ОКБМ расчетно-экспериментальные исследования теплогидравлики промежуточных теплообменников БР способствовали развитию представлений о сложных процессах, происходящих в теплообменниках, и принятию решения об использовании в проекте БН-800 таких же теплообменников, что и в БН-600 (с той же поверхностью теплопередачи) [11]. Накоплен большой экспериментальный материал о влиянии на теплогидравлические процессы блокировок части проходных сечений ТВС, являющийся хорошей базой для проверки расчетных методик [12].

3. ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕПЛООБМЕНА В ЖИДКИХ МЕТАЛЛАХ В ДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССАХ

В 90-е годы прошедшего века акцент в исследованиях теплообмена в реакторах с жидкометаллическим охлаждением сместился в сторону переходных и аварийных процессов. Были получены новые ре-

зультаты в обоснование безопасности БР. Эксперименты на моделях с одиночными ТВС показали, что возникновение и развитие кипения жидкого металла в сборках определяется различными факторами – геометрией контура, гидродинамическими сопротивлениями различных его составляющих, геометрией пучка и длиной участка энерговыделения, параметрами теплоносителя, состоянием поверхности теплообмена [13]. Особенности процесса кипения в системе параллельных ТВС явились возникновение межканальной неустойчивости течения, изменение условий охлаждения сборок [14]. Гидродинамическое взаимодействие контуров с течением времени приводит к значительному увеличению амплитуды колебаний расхода теплоносителя в них и к возможному "запиранию" или инверсии расхода теплоносителя, к росту температуры теплоносителя и оболочки тепловыделяющих элементов и к возникновению кризиса теплообмена.

Пока еще мало уделялось внимания пульсациям температуры в сложных проточных частях БР с интегральной компоновкой. Эта проблема имеет большое прикладное значение, поскольку известны случаи выхода из строя отдельных узлов реакторов вследствие влияния циклических термонапряжений, она не может быть решена без целого цикла поисково-фундаментальных исследований. К таким исследованиям относятся теоретические работы о процессах передачи пульсации в потоках теплоносителей на твердые стенки, экспериментальная проверка расчетных моделей, работы по созданию кодов для расчета пульсации температуры, развитию методов измерений температуры на теплоотдающих поверхностях.

Новые результаты по этой задаче получены в экспериментах на модели мишени ускорительно-управляемой системы [15], которая представляла осесимметричную конструкцию (рис. 3), в которой теплоноситель подавался снизу вверх в горизонтальный внешний кольцевой канал модели, поворачивался, ударяясь о поверхность мембраны, и уходил через профилированную входную решетку во внутренний канал, возвращаясь через расположенный в нижней части патрубков на вход циркуляционного насоса. Тепловой поток на поверхности мембраны создавался с помощью медного стержня по методу "теплого клина". Распределение температуры по диаметру центральной трубы, а также в пространстве между мембраной и профилирующей решеткой было измерено в вертикальном и горизонтальном направлениях с помощью подвижного термопарного зонда. Наблюдался узкий "факел" высокотемпературного теплоносителя, движущегося от мембраны по оси внутреннего канала, отмечены значительные пульсации температуры теплоносителя (рис. 4). Переменную по радиусу мембраны температуру вблизи поверхности мембраны со стороны потока измеряли с помощью подвижной термопары, расположенной в капилляре в специальном канале, выполненном на поверхности мембраны со стороны теплоносителя. Были получены данные для мгновенной температу-

ры поверхности мембраны, характеризующиеся высоким уровнем пульсаций температуры (рис. 5).

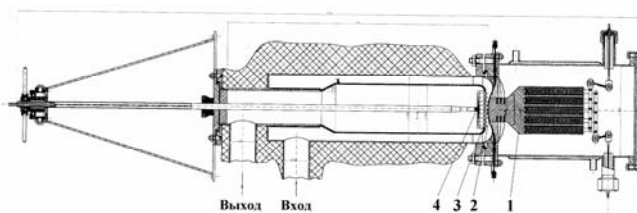


Рис. 3. Продольный вид тепловой модели мишени: 1 – медный блок с нихромовыми нагревателями; 2 – мембрана мишени; 3 – решетка с профилирующими отверстиями; 4 – термопарный зонд

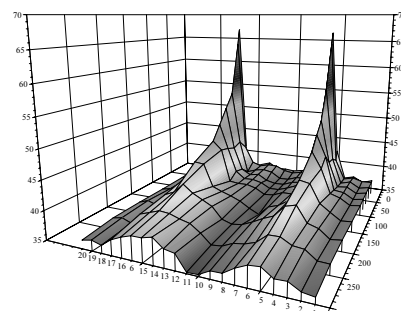


Рис. 4. Объемное представление температурного поля мишени

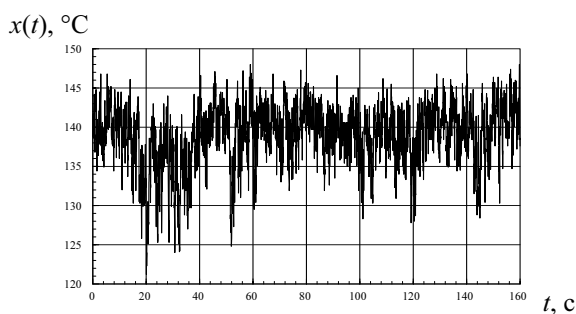


Рис. 5. Температура мембраны $x(t) = \theta_{24}(t)$ при $y=0$ мм; $\theta_{22}=33.0$ °C; $\overline{x(t)}=139$ °C, $\sigma_{x(t)}=3,9$ °C

Проведенный в ГНЦ РФ-ФЭИ бенчмарк по теплообмену в модели мишени показал значительное расхождение рассчитанных по различным кодам (AQUA, FLUENT, STAR-CD, ANSYS, PHOENICS) распределений температуры мембраны и теплоносителя, как и рассчитанных и экспериментальных данных [16]. Для точного прогнозирования температуры мембраны и теплоносителя нужны более точные подходы к моделированию профилирующей решетки, а также турбулизации потока вследствие взаимодействия струй за профилирующей решеткой.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Несмотря на широкий спектр выполненных исследований теплофизическое обоснование жидкометаллических реакторов нельзя считать исчерпанным. Появились новые расчетно-экспериментальные возможности. Назрела необходимость развития новых методов расчета локальных турбу-

лентных характеристик сложных потоков в каналах и в больших объемах с учетом крупномасштабных вихревых течений, влияния стратификации теплоносителей. На этой базе можно усовершенствовать существующие и создать новые расчетные коды. Следует отметить, что серьезной проблемой является отвод остаточного тепловыделения реактора посредством естественной конвекции в верхней камере с использованием специальных погружных теплообменников. Такие устройства относятся к системам пассивного отвода тепла при аварийных остановах быстрых реакторов, используются в проектах БР. Российский опыт их исследования еще невелик, но без этого вряд ли можно будет обойтись в реакторах следующего поколения. Поэтому целесообразно уже сейчас заниматься проблемами моделирования аварийного теплоотвода естественной конвекцией в верхних камерах БР, выявлением влияния различных критериев подобия и других факторов на теплогидравлические процессы.

Пока будут развиваться БР, исследования теплообмена в жидких металлах в обоснование новых конструкций активных зон, узлов реакторов и теплообменного оборудования будут актуальны.

Проведен анализ экспериментальных данных по профилям скорости и температуры в пограничном слое при естественной конвекции, что позволило установить характерные масштабы, которые дают основу для обобщения экспериментальных данных.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Жидкие металлы:** Сб. статей под ред. П.Л. Кириллова, В.И. Субботина, П.А. Ушакова. М.: Атомиздат, 1967.
2. **Гидродинамика** и теплообмен в атомных энергетических установках (основы расчета) / В.И. Субботин, М.Х. Ибрагимов, П.А. Ушаков и др. М.: Атомиздат, 1975.
3. **Теплогидравлический** расчет ТВС быстрых реакторов с жидкометаллическим охлаждением / А.В. Жуков, П.Л. Кириллов, Н.М. Матюхин и др. М.: Энергоатомиздат, 1985.
4. **Методические** указания и рекомендации по теплогидравлическому расчету активных зон быстрых реакторов / А.В. Жуков, А.П. Сорокин, П.Л. Кириллов и др.; Под ред. А.В. Жукова, А.П. Сорокина. / Обнинск: ОНТИ ФЭИ, 1988.
5. **Жуков А.В., Сорокин А.П., Матюхин Н.М.** Межканальный обмен в ТВС быстрых реакторов. М.: Энергоатомиздат, 1989.
6. **Кириллов П.Л., Юрьев Ю.С., Бобков В.П.** Справочник по теплогидравлическим расчетам (ядерные реакторы, теплообменники, парогенераторы) / Под общей ред. П.Л. Кириллова // М.: Энергоатомиздат, 1990.
7. **Жуков А.В., Сорокин А.П., Матюхин Н.М.** Межканальный обмен в ТВС быстрых реакторов: расчетные программы и практическое приложение. М.: Энергоатомиздат, 1991.
8. **LMFR core thermohydraulics: Status and Prospects.** TECDOC-1157, IAEA, Vienna, June 2000.
9. **Specification** of the benchmark problem "Hydrodynamics and heat transfer in the model pin bundles with liquid metal coolant" / A.V. Zhukov, J.A. Kuzina, A.P. Sorokin // "Hydrodynamics and heat transfer in reactor components cooled by liquid coolant in single/two-phase" (working material), IAEA, TWG-FR/125, Vienna, Austria, 2005. P.138-172.
10. **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.
11. **Митенков Ф.М., Головкин В.Ф., Ушаков П.А., Юрьев Ю.С.** Проектирование теплообменных аппаратов АЭС / Под ред. Ф.М. Митенкова. // М.: Энергоатомиздат, 1988.
12. **Zhukov A.V., Sorokin A.P., Matjukhin N.M., Bogoslovskaya G.P.** Thermohydraulic Characteristics of Blockaged Model Subassembly (Wire Wrapped Fuel Pins) // 6-th International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics, Operation and Safety, (NUTHOS-6), October 4-8, 2004, Nara-Ken New Public Hall, Nara, Japan.
13. **Исследования** теплообмена и устойчивости кипения жидкометаллического теплоносителя в контуре естественной циркуляции / А.Д. Ефанов, А.П. Сорокин, Е.Ф. Иванов и др. // Теплоэнергетика, 2003, №3, С. 20-26.
14. **Экспериментальные** исследования кипения жидкого металла в параллельных каналах в условиях естественной циркуляции / Иванов Е.Ф., Сорокин А.П., Иванов В.В. и др. // Препринт ФЭИ-3023, Обнинск: ОНТИ ГНЦ РФ-ФЭИ, 2004.
15. **Specification** of the Benchmark Problem thermal experiments in the ADS target model / Yu. Orlov, A. Sorokin, G. Bogoslovskaya et al. // Thermal Hydraulics for Fast Reactors with Different Coolants, Proceedings of the 10th International Meeting of the IAHR Working Group on Advanced Nuclear Reactors Thermal Hydraulics, Obninsk, Russia, July 17-19, 2001. Obninsk: ONTI IPPE, 2003. P. 207-235.
16. **Сравнительный** анализ результатов бенчмарка по теплогидравлике модели мишени ускорительно-управляемой системы / А.П. Сорокин, Г.П. Богословская, В.И. Михин и др. // Атомная энергия. 2003. Т.95. Вып.5. С. 346-353.