

Распределение температуры в модели периферийной области тепловыделяющей сборки с жидкометаллическим теплоносителем*

П.Д. Лобанов, А.И. Светоносков, М.П. Токарев

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск

E-mail: lobanov@itp.nsc.ru

Приводятся результаты экспериментальных исследований распределения температуры внешней стенки и теплоносителя в упрощенной модели периферийной области тепловыделяющей сборки (ТВС), представляющей собой две параллельные ячейки. Экспериментальная установка оснащена тремя имитаторами ТВЭЛов диаметром 10 мм и длиной 500 мм. Мощность каждого имитатора ТВЭЛа составляла до 2000 Вт (4 кВт/м). В ходе работы ТВЭЛы поочередно подключались к источнику питания, что позволило определить особенности распределения температуры в модели с неравномерным энерговыделением. Для измерений использовались подвижная термопара и ИК-камера. Проведено сравнение данных, полученных для водяного теплоносителя и сплава свинец – висмут. Показано, что основные закономерности распределения температуры в целом схожи для разных теплоносителей.

Ключевые слова: эксперимент, жидкий металл, тепловыделяющая сборка, температура.

Введение

Повышение эффективности и безопасности АЭС возможно за счет оптимизации конструкций существующих энергоблоков АЭС на тепловых нейтронах и создания нового типа реакторов на быстрых нейтронах с жидкометаллическими теплоносителями. Для совершенствования ядерно-энергетических комплексов нового поколения необходимы детальные измерения локальных гидродинамических характеристик и теплообмена в элементах АЭС.

Исследование теплопередачи в каналах с жидкометаллическими теплоносителями были выполнены Кутателадзе, Боришанским, Мартинелли и Лайоном [1–3] в середине XX века. Позднее опубликованы экспериментальные результаты по теплообмену между пучками стержней в треугольной упаковке и жидким металлом [4–9]. Приведенная база данных была использована для обоснования реакторных установок с натриевым теплоносителем [10, 11].

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 22-19-00587).

Для быстрых реакторов, использующих свинец или сплав свинец – висмут в качестве теплоносителя, приведенной информации недостаточно. Связи с этим необходимо учитывать изменения температуры, скорости, плотности теплового потока и других параметров в модельных экспериментах с тяжелыми жидкометаллическими теплоносителями. Большой цикл работ по изучению характеристик тепловыделяющей сборки (ТВС) быстрых реакторов был выполнен в АО «ГНЦ РФ — ФЭИ» [12, 13]. Для измерения коэффициентов межканального взаимодействия были разработаны тепловые и электромагнитные методы, метод фреоновго трассера, а также датчики для измерений температуры и расхода по высоте ТВС. Проведены комплексные исследования межканального обмена массой и теплом в пучках гладких и оребренных ТВЭЛов, а также со спиральной проволоочной навивкой. Измерен поперечный перенос массы в сборке стержней [12] при течении жидкометаллического теплоносителя, особенности теплообмена [10]. На основе этих измерений предложены формулы для коэффициентов взаимодействия между ячейками путем теплопроводности, турбулентной диффузии [13]. В качестве теплоносителя в этих исследованиях использовались натрий, натрий – калий, свинец – висмут. Получены данные для расчета коэффициентов теплообмена на основе исследований пучков ТВЭЛов в диапазоне вариации основных параметров, определяемых геометрией канала и критериями подобия.

Теплообмен в модельных сборках с квадратной компоновкой стержней и жидкометаллическим (натрий – калий) охлаждением исследован в [14]. Эксперименты проводились при наличии дистанционирующей решетки (ДР) в потоке. Использовались имитаторы ТВЭЛов с диаметрами 12 и 15 мм, относительный шаг 1,34 и 1,25. Производились термодинамические измерения во всех ячейках потока. С использованием электромагнитного метода измерялись скорости теплоносителя.

В работах [15, 16] содержатся результаты комплексного исследования теплообмена при течении жидкого металла в 19-стержневой сборке стержней гексагональной упаковки. Эксперименты выполнялись с использованием эвтектического сплава свинец – висмут. Сборка стержней включала три ДР. Расход теплоносителя был в диапазоне $1 \div 10 \text{ м}^3/\text{ч}$ (расходная скорость до 2 м/с), подводимая ко всем 19 стержням мощность — $50 \div 426 \text{ кВт}$, температура теплоносителя на входе составляла 200 или 300 °С.

Целью настоящей работы являлось проведение экспериментальных исследований распределения температуры в двух смежных ячейках модели периферийной области ТВС с жидкометаллическим теплоносителем при условиях неравномерного энерговыделения на имитаторах ТВЭЛов, позволившее создать неоднородное поле температур в ячейках.

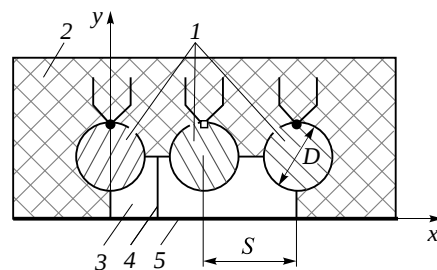
Экспериментальный стенд и методы измерения

Создан циркуляционный стенд для изучения закономерностей течения жидкометаллического теплоносителя в модельной сборке стержней, состоящей из трех электрически обогреваемых имитаторов ТВЭЛов, расположенных в ряд. В целом геометрия поперечного сечения канала соответствует приведенной в работе [17], однако геометрические параметры отличаются. Стенд оснащен циркуляционным насосом, расходомером, подводщими линиями и рабочим участком. Расход теплоносителя задавался с помощью изменения частоты электродвигателя, вращающего насос.

Для поддержания температуры элементов стенда он был помещен в изолированный объем, в котором с помощью электрообогреваемых тэнов поддерживалась постоянная температура ($T = 150 \text{ °С}$). Для предотвращения колебаний температуры с высокой

Рис. 1. Схема рабочего участка.

1 — ТВЭЛы, 2 — теплоизолятор, 3 — сечение канала,
4 — линия смещения термопары,
5 — фольга из нержавеющей стали.



амплитудой подаваемая на тэны–обогреватели воздуха мощность контролировалась ПИД-регуляторами. Благодаря этому колебания температуры элементов стенда не превышали $\pm 0,3^\circ\text{C}$.

Схема рабочего участка представлена на рис. 1. Для уменьшения тепловых потерь имитаторы ТВЭЛов 1 были помещены в корпус из теплоизоляционного материала 2. Имитаторы ТВЭЛов оснащены индивидуальными источниками электропитания, что позволяет провести исследования при неравномерном энерговыделении в соседних ячейках. Для подачи электрической мощности использовался источник питания WSD-20H50 (до 10000 Вт). Это позволяет определить некоторые закономерности межканального обмена, контролируя распределение температуры в потоке и на стенке рабочего участка. Диаметр каждого имитатора ТВЭЛов $D = 10$ мм, расстояние между ними $S = 14$ мм. Высота рабочего участка 500 мм.

Эксперименты проводились в турбулентном режиме течения теплоносителя при числе Рейнольдса потока теплоносителя, определяемом по гидравлическому диаметру, до 13800. Поток жидкости был организован в сечении рабочего участка 3. Ряд контрольных экспериментов был проведен в неподвижной жидкости.

Для предотвращения перегрева имитаторов ТВЭЛов их температура в области, не омываемой потоком жидкости, контролировалась с помощью индивидуальных термопар. Эти три термопары были подключены к промышленному контроллеру ТРМ-138. Положения термопар показаны на рис. 1.

Температура внешней стенки рабочего участка измерялась с помощью инфракрасной камеры Fluke T32. Производилась предварительная калибровка показаний прибора при известной изменяемой температуре теплоносителя. Тепловизор устанавливался на штатив. Внешняя стенка рабочей секции 5 была изготовлена из фольги из нержавеющей стали. Толщина стенки 0,3 мм. Внешняя поверхность была окрашена черной матовой краской. Чтобы фольга не прогибалась потоком теплоносителя, штатно устанавливались ребра толщиной 36 мм. Размер области измерения тепловизора 35×28 мм. Центр области измерений располагался на расстоянии 400 мм от оси входного коллектора.

Измерения профилей температуры и скорости производились с помощью термопары внешним диаметром 1 мм с электроизолированным спаем. Применялась термопара хромель–алюмель (тип К). Перемещение термопары в сечении рабочего участка производилось с помощью координатного устройства. Ручка управления координатным устройством была выведена за пределы обогреваемого объема.

Эксперименты со свинцово-висмутовым теплоносителем были проведены при значениях числа Рейнольдса потока, определенного по гидравлическому диаметру, $Re = 5000, 10000, 13800$. Дополнительно были проведены экспериментальные исследования с использованием воды в той же самой геометрии при $Re = 5000$ и 10000 [18]. При проведении экспериментов для воды и жидкометаллического теплоносителя поддерживались температуры 25 и 150°C соответственно.

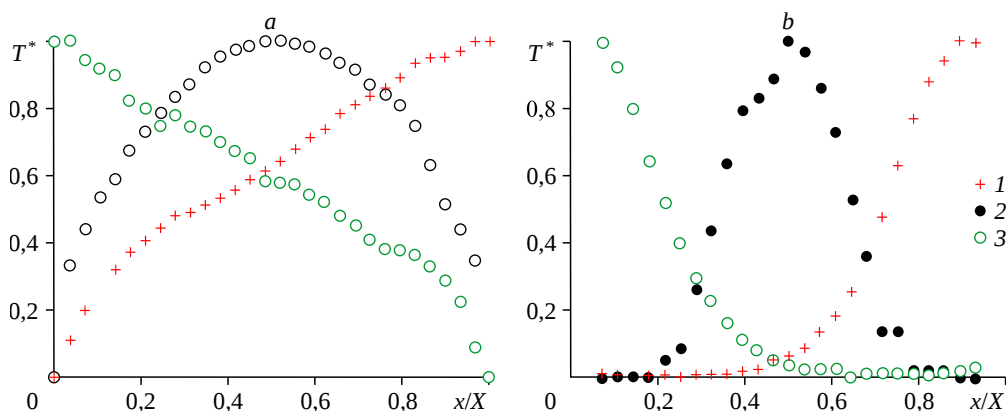


Рис. 2. Распределение средней температуры стенки для свинцово-висмутовой (а) и водяного (б) теплоносителей.

1 — обогрев имитатора ТВЭЛа, расположенного справа, 2 — обогрев имитатора ТВЭЛа, расположенного в центре, 3 — обогрев имитатора ТВЭЛа, расположенного слева.

Результаты экспериментов

Результаты обработки термограмм, полученных в верхней части рабочего участка при нагреве центрального и периферийных имитаторов ТВЭЛов, расположенных справа и слева от центрального, представлены на рис. 2. Для каждого случая было получено не менее 10 термограмм. Данные приведены в безразмерном виде. Здесь x — расстояние от левого края тестового участка, X — ширина тестового участка ($X = 2S = 28$ мм). Безразмерная температура T^* рассчитывалась следующим образом:

$$T^* = \frac{T - T_{\min}}{T_{\max} - T_{\min}},$$

где T — температура в данной точке, $T_{\max}$, $T_{\min}$ — максимальная и минимальная температуры по профилю соответственно. Рассчитанная таким образом безразмерная температура для разных чисел Рейнольдса практически не различается. Поэтому для обобщения выбраны данные, полученные при $Re = 10000$. При использовании воды в качестве рабочей жидкости наблюдается существенное отличие распределения температуры в ячейке, содержащей нагретый ТВЭЛ, от противоположного. Для жидкометаллического теплоносителя эта тенденция выражена слабее.

Измерения профилей температуры производились по центру одной из ячеек по линии 4, показанной на рис. 1. Измерения выполнялись при нагреве центрального и периферийных имитаторов ТВЭЛов. Для жидкометаллического теплоносителя общая выделяемая мощность на каждом из них составляла 282 Вт. Для водяного теплоносителя мощность обогрева могла повышаться до 2000 Вт (в импульсном режиме).

Полученные данные представлены на рис. 3 в безразмерном виде. Здесь y — расстояние от внешней стенки рабочей зоны, Y — глубина ячейки. Термопара располагалась на расстоянии $Z/Dh = 45$ от начала рабочего участка (Z — расстояние от входа в канал, Dh — гидравлический диаметр канала). Относительную температуру рассчитывали, как и в предыдущем случае.

В целом для случаев нагрева центрального и периферийного имитаторов ТВЭЛа наблюдается аналогичная тенденция с минимальной температурой на внешней стенке

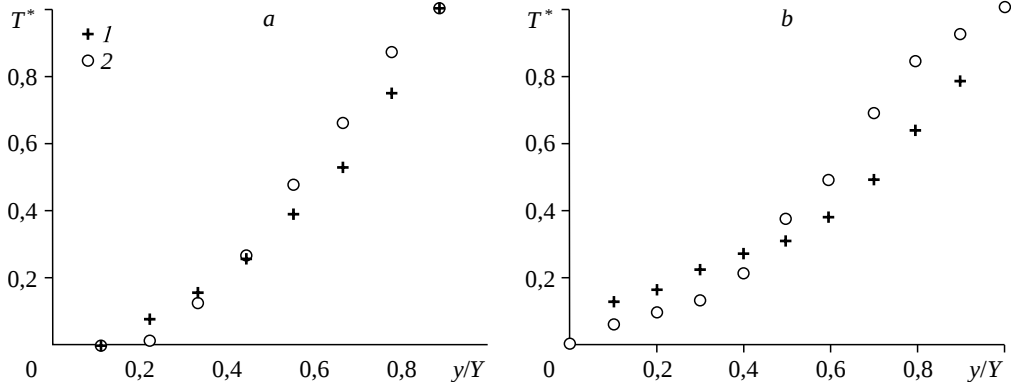


Рис. 3. Распределение средней температуры для свинцово-висмутового (а) и водяного (б) теплоносителей.

1 — обогрев имитатора ТВЭЛа, расположенного в центре,
2 — обогрев имитатора ТВЭЛа, расположенного справа.

рабочего участка и максимальной температурой в глубине ячейки. При расположении имитатора нагретого ТВЭЛа вне ячейки фиксировалась практически постоянная температура по всей длине профиля, что мало отличалось от погрешности измерения и могло свидетельствовать о достаточно слабом переносе температуры между ячейками.

Выводы

Получены данные о закономерностях распределений температуры тонкой стенки рабочего участка и жидкометаллического теплоносителя при течении в трехстержневой модели ТВС. Дополнительные эксперименты были проведены с использованием воды в качестве рабочей жидкости. Измерения выполнены при варьировании расходов теплоносителей ($Re < 13800$), мощности обогрева имитаторов ТВЭЛов до 4 кВт/м и при специальным образом организованном неравномерном обогреве имитаторов ТВЭЛов. Полученные данные могут быть использованы для верификации расчетных кодов, основанных на методах машинного обучения.

Список литературы

1. Кутателадзе С.С., Боришанский В.М., Новиков И.И. Теплообмен в жидких металлах // Атомная энергия. 1958. Т. 4, № 5. С. 422–436.
2. Martinelli R.C. Heat transfer to molten metals // Trans. Am. Soc. Mech. Engrs. 1947. Vol. 69, No. 8. P. 947–959.
3. Lyon R.N. Liquid metal heat transfer coefficient // Chem. Eng. Prog. 1951. Vol. 47. P. 75–79.
4. Бобков В.П., Виноградов В.Н., Козина Н.В. Анализ данных и рекомендации по теплопередаче жидкими металлами в пучках стержней // Атомная энергия. 1988. Т. 65, № 6. С. 423–426.
5. Боришанский В.М., Фирсова Е.В. Теплообмен в отдельных пучках стержней с металлическим натрием, протекающим в продольном направлении // Атомная энергия. 1964. Т. 16, № 5. С. 457–458.
6. Боришанский В.М., Фирсова Е.В. Теплообмен в продольном потоке пакета трубок для макаронных изделий из металлического натрия // Атомная энергия. 1964. Т. 14, № 6. С. 584–585.
7. Боришанский В.М., Готовский М.А., Фирсова Е.В. Теплопередача к жидким металлам в продольно омываемых пучках стержней // Атомная энергия. 1969. Т. 27, № 6. С. 549–552.
8. Mikityuk K. Heat transfer to liquid metal: Review of data and correlations for tube bundles // Nucl. Eng. Des. 2009. Vol. 239, No. 4. P. 680–687.
9. Roelofs F., Gopala V.R., Jayaraju S., Shams A., Komen E. Review of fuel assembly and pool thermal hydraulics for fast reactors // Nucl. Eng. Des. 2013. Vol. 265. P. 1205–1222.
10. Кириллов П.Л., Ушаков П.А. Теплообмен жидких металлов: особенности, методы исследований и основные зависимости // Теплоэнергетика. 2001. № 1. С. 49–56.

11. **Sesonske A.** Heat transfer in liquid-metal cooled fast reactors // *Advances in nuclear science and technology*. N.Y.: Academic Press, 1972. P. 175–201.
12. **Жуков А.В., Сорокин А.П., Матюхин Н.М.** Межканальный обмен в ТВС быстрых реакторов: Теоретические основы и физика процесса. М.: Энергоатомиздат, 1989. 180 с.
13. **Кириллов П.Л., Ушаков П.А.** Теплообмен жидких металлов в пучках стержней // *Теплоэнергетика*. 2001. № 2. С. 40–45.
14. **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, № 5. С. 336–348.
15. **Pacio J., Daubner M., Fellmoser F., Litfin K., Wetzel Th.** Experimental study of heavy-liquid metal (LBE) flow and heat transfer along a hexagonal 19-rod bundle with wire spacers // *Nucl. Eng. Des.* 2016. Vol. 301. P. 111–127.
16. **Pacio J., Litfin K., Batta A., Viellieber M., Class A., Doolaard H., Roelofs F., Manservigi S., Menghini F., Böttcher M.** Heat transfer to liquid metals in a hexagonal rod bundle with grid spacers: Experimental and simulation results // *Nucl. Eng. Des., Thermal-Hydraulics of Innovat. Nucl. Systems*. 2015. Vol. 290. P. 27–39.
17. **Шестаков М.В., Токарев М.В.** Модуляция меандрирования течения в зазоре модели периферийной ячейки тепловыделяющей сборки // *Теплофизика и аэромеханика*. 2023. Т. 30, № 6. С. 1041–1053.
18. **Lobanov P., Svetonosov A.** Coolant temperature distribution in the model of the fuel assembly peripheral area // *E3S Web. Conf.* 2023. Vol. 459. P. 07013-1–07013-4.

*Статья поступила в редакцию 23 июля 2024 г.,
принята к публикации 8 ноября 2024 г.*