

Краткие сообщения

03

Экспериментальное моделирование течения жидкометаллического теплоносителя в Т-образном смесителе

© О.Н. Кашинский, П.Д. Лобанов, А.С. Курдюмов, Н.А. Прибатурин

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе,
630090 Новосибирск, Россия

Институт проблем безопасного развития атомной энергетики,
Москва, Россия

e-mail: kashinsky@itp.nsc.ru

(Поступило в Редакцию 13 октября 2015 г.)

Приведены результаты экспериментального исследования структуры температурного поля при течении жидкометаллического теплоносителя в Т-образном смесителе. Эксперименты проведены с использованием сплава Розе в качестве рабочей жидкости. Для определения распределения температуры стенки рабочего участка использована инфракрасная термография. Показана значительная неравномерность распределения температуры стенки в зоне смешения потоков жидкости различной температуры. Характер распределения температуры существенно зависит от соотношения расходов горячей и холодной жидкостей. Полученные результаты могут послужить базой для верификации термогидравлических расчетных кодов для течений жидких металлов.

Повышение эффективности и безопасности работы ядерных реакторов требует постоянного совершенствования расчетных кодов, описывающих теплогидравлические характеристики таких реакторов. Разработка и верификация таких кодов невозможна без экспериментальных данных о структуре течения в конструктивных элементах реакторов. Дальнейшее развитие атомной энергетики связано с активным использованием жидкометаллических теплоносителей. Физические свойства этих теплоносителей существенно отличаются от свойств воды, используемой в реакторах типа ВВЭР. Детальные исследования термогидравлики течений жидкометаллических теплоносителей проводились несколько десятилетий назад как в России, так и за рубежом [1,2]. К сожалению, в последние годы такие исследования проводятся в очень ограниченном объеме (см., например, [3,4]). В то же время развитие расчетных кодов (см., например, [5]) невозможно без новой экспериментальной информации о структуре течений жидкометаллических теплоносителей.

В задачу настоящей работы входило экспериментальное исследование процесса смешения жидкометаллического теплоносителя различной температуры в Т-образном тройнике с целью получения надежных опытных данных о структуре поля течения. Эксперименты проводились на специальном стенде, рабочим участком которого являлся Т-образный тройник, изображенный схематически на рис. 1, а. Рабочий участок представлял собой отрезок вертикальной трубы из нержавеющей стали с внутренним диаметром 20 мм и толщиной стенки 1 мм. К нему был приварен боковой отвод из трубы с внутренним диаметром 8 мм. Длина вертикального участка 450 мм. Рабочий участок являлся

частью гидравлического контура. Подача жидкости в основную трубу и боковой отвод производилась из двух сосудов, расположенных в верхней части контура. Подвод жидкости из верхних сосудов к рабочему участку производился через трубопроводы, в которые были вмонтированы вентили для регулировки расходов жидкости. После рабочего участка жидкость сливалась в нижний бак.

Измерения температуры жидкости в основном баке и верхних сосудах производились с помощью термометров сопротивления типа ДТС055. Измерение температуры потоков жидкости непосредственно перед рабочим участком выполнялось с помощью термопар типа К, вмонтированных в нержавеющие трубки диаметром 3 мм. Зазор между термопарой и стенкой трубки заполнялся высокотеплопроводным компаундом для уменьшения инерционности измерителя.

В качестве рабочей жидкости–теплоносителя — использовался сплав Розе (50% висмута, 25% свинца и 25% олова). Температура плавления этого сплава около 94°C, плотность 9.1 г/см³. По физическим свойствам этот сплав в жидком состоянии близок к свинцовому теплоносителю, который является основным тяжелым жидкометаллическим теплоносителем [1].

Все элементы экспериментального контура (нижний бак, верхние сосуды, трубопроводы, регулирующие вентили) были снабжены электрическими нагревателями, снабженными термопарами и регуляторами. Это позволяло поддерживать температуру этих элементов на требуемом уровне.

Перед началом эксперимента жидкость закачивалась из нижнего бака в верхние сосуды, в которых производился ее нагрев до заданных уровней T_g и T_x .

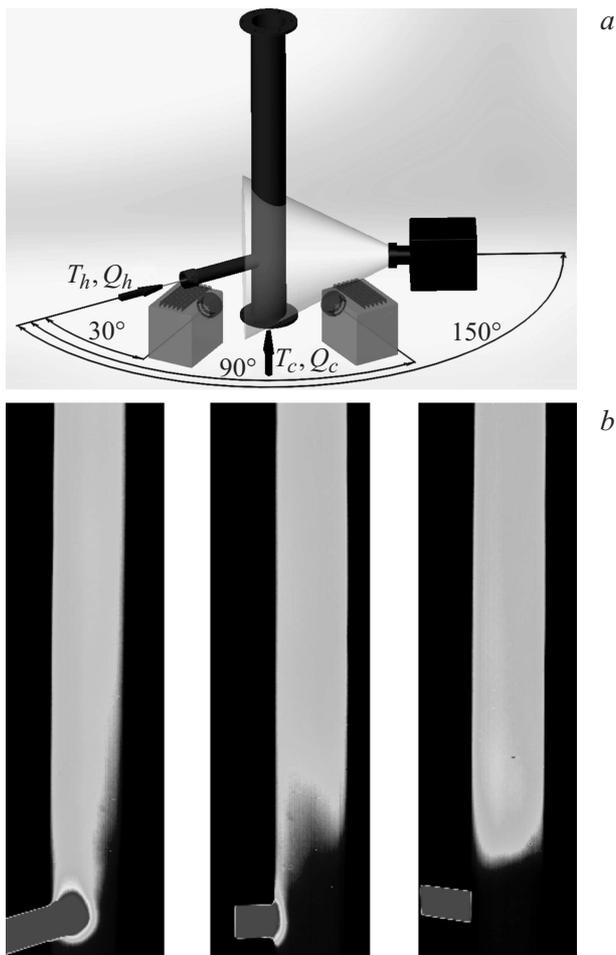


Рис. 1. Схема проведения экспериментов (а) и примеры получаемых изображений (б).

Одновременно все элементы контура прогревались до уровня T_h . После этого открывались запорные вентили и производился слив потоков жидкости различной температуры через рабочий участок. Когда слив жидкости прекращался, она вновь закачивалась в верхние сосуды, и цикл повторялся.

Наружная стенка рабочего участка была покрыта черной матовой краской для обеспечения коэффициента излучения, близкого к единице. Измерение температуры наружной стенки рабочего участка производилось с помощью инфракрасной камеры типа Titanium 570. Для уменьшения теплоотдачи с окружающей средой рабочий участок был заключен в кожух (на рис. 1 не показан), через который продувался горячий воздух с температурой 120°C . Съемка производилась через окна в кожухе.

Для получения поля температуры рабочего участка съемка производилась с трех положений, схематически показанных на рис. 1, а. Расположение оси камеры по угловой координате соответствовало значениям азимутального угла 30° , 90° и 150° . Измерения проводились при различных значениях расходов жидкости через

основную трубу и боковой отвод. При одном и том же значении Q_g и Q_x проводилось несколько циклов эксперимента. Запись инфракрасного изображения производилась в течение всего времени стационарного режима в каждом цикле.

Характерные видео кадры, полученные с трех различных ракурсов съемки, приведены на рис. 1, б. Ясно видна неравномерность распределения мгновенной температуры стенки в зоне смешения потоков жидкости различной температуры.

В результате цифровой обработки видеофайлов, полученных в результате съемки инфракрасной камерой, были получены осредненные по времени распределения температуры стенки по поверхности рабочего участка. Распределения температуры для режима с $Q_g = 298 \text{ g/s}$ и $Q_x = 470 \text{ g/s}$ приведены на рис. 2. φ — азимутальный угол, Z — расстояние по вертикали от оси бокового отвода до соответствующего поперечного сечения смесителя. В данном режиме максимальная температура регистрируется на участке стенки, противоположной точке ввода горячей жидкости.

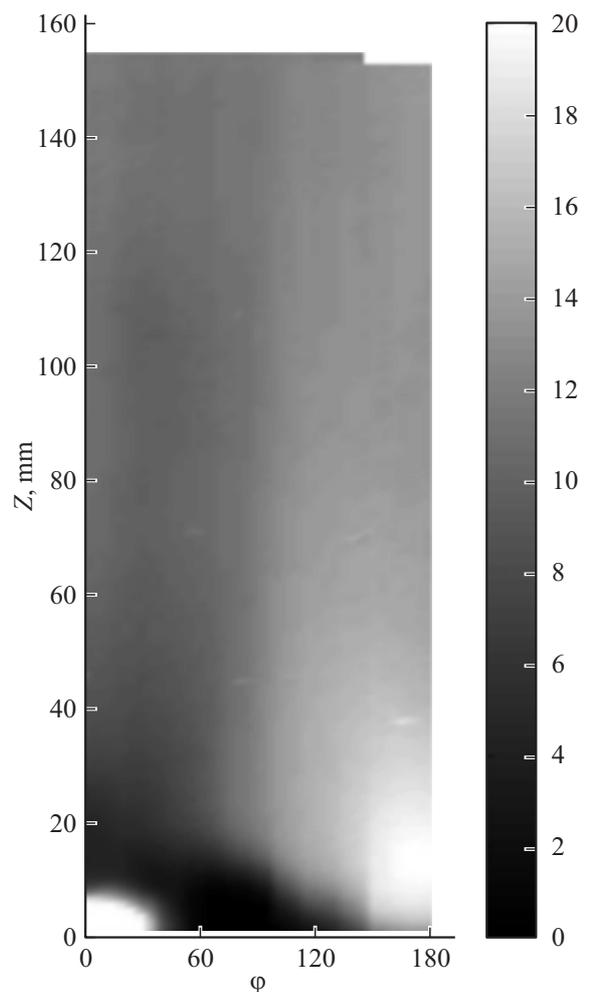


Рис. 2. Термограмма осредненной температуры в области смешения $Q_x = 470 \text{ g/s}$, $Q_g = 298 \text{ g/s}$.

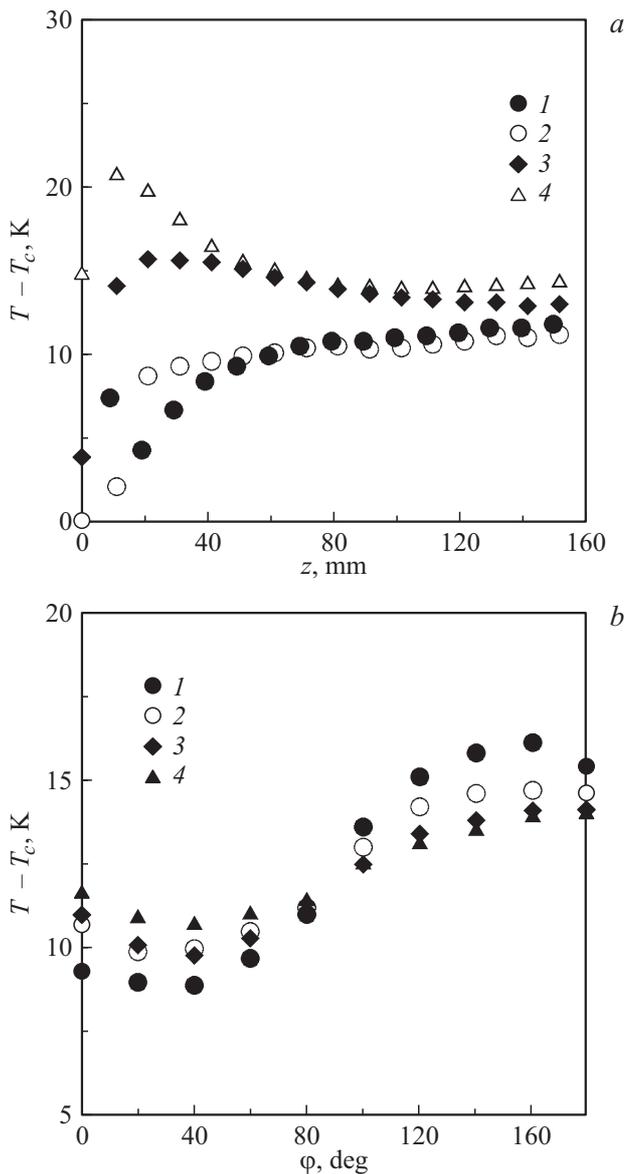


Рис. 3. *a* — распределение температуры стенки при постоянной угловой координате j : 1 — 0° , 2 — 60° , 3 — 120° ; 4 — 180° ; *b* — распределение температуры стенки по угловой координате в зависимости от расстояния от точки смешения z : 1 — 50, 2 — 75, 3 — 100, 4 — 124 мм.

На рис. 3, *a* приведены распределения температуры стенки по высоте рабочего участка при постоянных значениях угловой координаты. Существенное изменение температуры происходит при значениях Z от 0 до 50 мм. При $\phi = 60^\circ$ температура стенки при $Z = 0$ равна температуре холодной жидкости, тогда как при $\phi = 180^\circ$ в этом сечении по высоте температура стенки выше на 20°C . Распределения температуры стенки по угловой координате приведены на рис. 3, *b* для сечений с различными значениями Z . Во всех случаях происходит повышение температуры стенки с увеличением угла ϕ до 180° . С увеличением расстояния по оси от точки смешения зависимость от угловой координаты становится

слабой, что свидетельствует о перемешивании потоков жидкости различной температуры.

Представленные экспериментальные данные демонстрируют характер распределения температуры стенки в зоне смешения потоков при течении жидкометаллического теплоносителя. Они могут служить основой для верификации расчетных кодов, используемых в термогидравлических расчетах элементов конструкций соответствующего оборудования.

Список литературы

- [1] Боршанский В.М., Кутателадзе С.С., Новиков И.И., Федьинский О.С. Жидкометаллические теплоносители. М.: Атомиздат, 1967. 300 с.
- [2] Двайер О. Теплообмен при кипении жидких металлов. М.: Мир, 1980. 518 с.
- [3] Ефанов А.Д., Сорокин А.П., Иванов Е.Ф. и др. // Теплоэнергетика. 2007. № 3, С. 43–51.
- [4] Tarantino M., Agostini P., Venamati G. et al. // J. Nucl. Mater. 2011. Vol. 415. P. 433–448.
- [5] Алипченков В.М., Беликов В.В., Веретенцев В.А. и др. Тр. VI Российской нац. конф. по теплообмену. 27–31 октября 2014 г. М. Секция КС-3. С. 1–4.