

УДК 536.2

## Моделирование течения жидкометаллического теплоносителя в Т-образном смесителе

О.Н. Кашинский<sup>1</sup>, П.Д. Лобанов<sup>1</sup>, А.С. Курдюмов<sup>1</sup>, Н.А. Прибатурин<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск

<sup>2</sup>Институт проблем безопасного развития атомной энергетики, Москва

E-mail: lobanov@itp.nsc.ru

Приведены результаты экспериментального исследования структуры температурного поля в сечении трубы при течении жидкометаллического теплоносителя в Т-образном смесителе. Эксперименты проводились с использованием сплава Розе в качестве рабочей жидкости. Для определения распределения температуры стенки рабочего участка использовалась инфракрасная термография, для определения распределения температуры в сечении канала использовалась подвижная термопара. Показана значительная неравномерность распределения температуры в зоне смешения потоков жидкости различной температуры как на стенке трубы, так и в расплаве теплоносителя.

**Ключевые слова:** жидкометаллический теплоноситель, неизотермическое смешение, эксперимент, профили температуры.

Повышение эффективности и безопасности работы ядерных реакторов требует постоянного совершенствования теплогидравлических расчетных кодов. 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 энергетических реакторах водородного типа. Детальное изучение термодинамики течений жидкометаллических теплоносителей проводилось несколько десятилетий назад как в России, так и за рубежом [1]. К сожалению, в последние годы такие исследования осуществляются в очень ограниченном объеме (см., например, [2–4]). В то же время развитие расчетных кодов (см., например, [5]) невозможно без новой экспериментальной информации о структуре течений жидкометаллических теплоносителей, полученной с использованием современной экспериментальной техники.

В задачу настоящей работы входило экспериментальное исследование процесса смешения жидкометаллического теплоносителя в Т-образном тройнике с целью получения надежных опытных данных о распределении температуры на стенке смесителя и в перемешиваемом потоке.

Эксперименты проводились на специальном стенде. Расплав помещался в бак, снабженный нагревателями и теплоизоляцией. С помощью насоса расплав через трубопровод закачивался в два верхних теплоизолированных сосуда. В каждом из этих сосудов

были смонтированы датчики уровня, термометры и перемешивающие устройства. На выходе верхних сосудов устанавливались запорные вентили. Через трубопроводы жидкость поступала в рабочий участок, затем сливалась в нижний бак. Для регулировки расходов использовались регулирующие вентили.

Рабочим участком контура являлся Т-образный тройник, схема которого изображена на рис. 1. Он представлял собой отрезок вертикальной трубы из нержавеющей стали с внутренним диаметром 20 мм и толщиной стенки 1 мм, к которому был приварен под прямым углом боковой отвод из трубы внутренним диаметром 8 мм на расстоянии 80 мм от входа холодной жидкости. Длина вертикального участка составляла 450 мм. Рабочий участок являлся частью гидравлического контура. Непосредственно перед Т-образным смесителем имеются прямые участки подводящих трубопроводов длиной 12,5 калибров основного и бокового подводов, служащие для стабилизации обоих потоков жидкости. Рассмотрим систему координат, в которых представлены итоговые данные. Отсчет вертикальной оси  $Z$  ведется от оси симметрии бокового подвода по направлению течения потока, отсчет азимутального угла  $\varphi$  ведется от центра бокового подвода против часовой стрелки. Сечения, в которых проводились термопарные измерения, обозначены как RX-0, положения точек RX ( $X = 1, 2...5$ ) соответствуют углам  $\varphi = 0, 45, 90, 135$  и  $180$  градусов.

Измерение температуры жидкости в основном баке и верхних сосудах проводилось с помощью термометров сопротивления типа М222. Измерение температуры потоков жидкости непосредственно перед рабочим участком выполнялось с помощью термопар типа К, смонтированных в нержавеющей 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  $94\text{ }^{\circ}\text{C}$ , плотность —  $9,1\text{ г/см}^3$ . По физическим свойствам в жидком состоянии он близок к свинцовому теплоносителю, который является основным тяжелым жидкометаллическим теплоносителем.

Все элементы экспериментального контура (нижний бак, верхние сосуды, трубопроводы, регулирующие вентили) были оборудованы 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, где она нагревалась до заданных уровней температуры «горячей» ( $T_h = 150\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) и «холодной» ( $T_c = 120\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) жидкости. Одновременно все элементы контура прогревались до уровня  $T_c$ . После этого открывались запорные вентили и производился слив потоков жидкости различной температуры через рабочий участок. При анализе полученного сигнала было выделено две области: область нестационарного распределения температурных

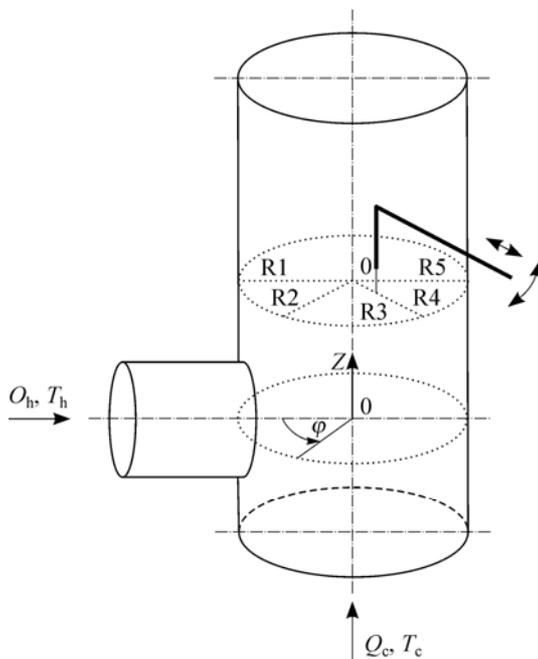


Рис. 1. Схема рабочего участка.

Рис. 2. Термографическое изображение.

параметров и стационарный участок. Продолжительность нестационарного теплового режима в зависимости от расходов в холодном и горячем подводах лежала в пределах 2–10 с, продолжительность стационарного участка — до 60 секунд. При обработке информации полученные в нестационарном участке данные игнорировались. Приведены результаты измерений только в стационарном участке при постоянных расходных характеристиках. 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 проводилось с помощью инфракрасной камеры типа Flir Titanium 570. Для уменьшения теплоотдачи в окружающую среду рабочий участок был заключен в кожух, через который продувался горячий воздух с температурой 120 °С. Съемка проводилась через три окна в кожухе, с которых во время эксперимента удалялся изолирующий материал.

Для измерения профилей температуры жидкости в потоке использовалась медь-константановая термопара типа Т, изготовленная из термопарных проводов, покрытых тефлоновой изоляцией, производства фирмы OMEGA. Холодный спай термопары, электрически изолированный, помещался в жидкость перед рабочим участком, которая имела температуру  $T_c$ . Провода горячего спая были вмонтированы в державку, установленную на координатном механизме. Горячий спай перемещался по радиусу трубы. Для уменьшения тепловой инерции этот спай не был заделан в корпус и имел электрический контакт с жидкостью. Выходное напряжение термопары, работающей в дифференциальном режиме, подавалось на дифференциальный усилитель с коэффициентом усиления 2500. Выходное напряжение усилителя подавалось на АЦП инструментальной платы Е 440.

На рис. 2 приведено мгновенное распределение температуры стенки по поверхности рабочего участка, полученное с помощью тепловизора. В рассматриваемом режиме струя горячей жидкости движется вдоль области стенки, на которой находится боковой отвод.

На рис. 3 приведены профили температуры в потоке на различных расстояниях от точки ввода горячей жидкости. Расход расплава составлял 470 и 300 г/сек для основного и бокового подводов соответственно. В каждом сечении измерялись профили вдоль радиусов, соответствующих различным значениям азимутального угла  $\varphi$ . Координата  $y$  соответствует расстоянию от стенки трубы. Схема расположения линий, вдоль которых измерялись профили, приведена на рис. 1. Видно, что на малом расстоянии от сечения

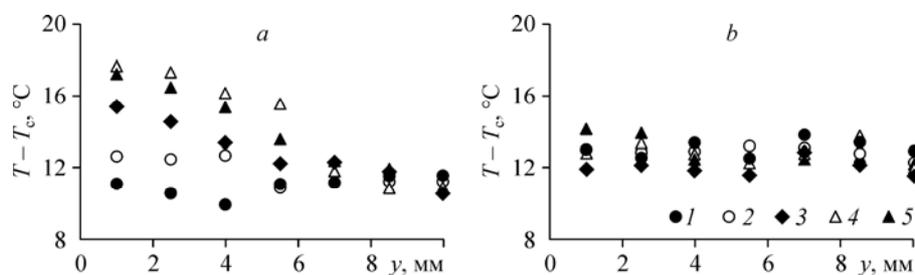
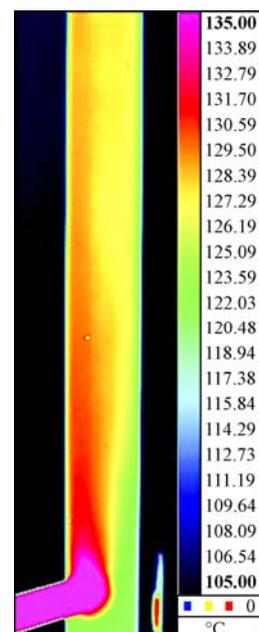


Рис. 3. Радиальные профили температуры.

$Z = 50$  (a), 150 (b) мм; R1-0 (1), R2-0 (2), R3-0 (3), R4-0 (4), R5-0 (5).

ввода горячей жидкости структура температурного поля является существенно не осесимметричной. По мере удаления от сечения ввода горячей жидкости неравномерность распределений при различных значениях  $\varphi$  сглаживается.

Представленные экспериментальные данные демонстрируют распределение температуры жидкости 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. **Боришанский В.М., Кутателадзе С.С., Новиков И.И., Федынский О.С.** Жидкометаллические теплоносители. М.: Атомиздат, 1967. 300 с.
2. **Ефанов А.Д., Сорокин А.П., Иванов Е.Ф., Богословская Г.П., Иванов В.В., Волков А.Д., Сорокин Г.А., Зуева И.Р.** Теплообмен при кипении жидкого металла в системе каналов в режиме естественной конвекции // Теплоэнергетика. 2007. № 3. С. 43–51.
3. **Tarantino M., Agostini P., Benamati G., Cocoluto G., Gaggini P., Labanti V., Venturi G., Class A., Liftin K., Forgione N. et al.** Integral Circulation Experiment: Thermal-hydraulic simulator of a heavy liquid metal reactor // J. of Nuclear Materials. 2011. Vol. 415. P. 433–448.
4. **Мельников И.А., Разуванов Н.Г., Свиридов В.Г., Свиридов Е.В., Шестаков А.А.** Исследование теплообмена жидкого металла при течении в вертикальной трубе с неоднородным обогревом в поперечном магнитном поле // Теплоэнергетика. 2013. № 5. С. 52–60.
5. **Алипченков В.М., Беликов В.В., Веретенцев В.А., Колобаева П.В., Мосунова Н.А.** Тр. 6-й Росс. нац. конф. по теплообмену (CD), 27–31 октября 2014 г., Москва, Секция КС-3, С. 1–4.

*Статья поступила в редакцию 23 апреля 2015 г.,  
после доработки — 21 мая 2015 г.*