

УДК 532.539.5

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СМЕШЕНИЯ ПОТОКОВ ЖИДКОСТИ С РАЗЛИЧНОЙ ТЕМПЕРАТУРОЙ В ТРОЙНИКОВОМ СОЕДИНЕНИИ

Л. А. Большов*, Н. А. Прибатурин*,**, О. Н. Кашинский**,
П. Д. Лобанов**, А. С. Курдюмов**

* Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН,
115191 Москва, Россия

** Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН,
630090 Новосибирск, Россия
E-mails: bolshov@ibrae.ac.ru, pribaturin@itp.nsc.ru, kashinsky@itp.nsc.ru,
lobanov@itp.nsc.ru, kurdumov@itp.nsc.ru

Представлены результаты экспериментального исследования смешения потоков жидкости с различной температурой в тройниковом соединении трубопроводов. В экспериментах использовались жидкости, физические свойства которых существенно различались. Получены распределения средней и пульсационной температур на поверхности стенки тройникового соединения, описана структура температурного поля в области смешения потоков холодной и горячей жидкостей.

Ключевые слова: тройниковое соединение, смешение потоков, температура, эксперимент.

DOI: 10.15372/PMTF20200307

Исследование смешения двух потоков жидкости с различными температурами в тройниковом соединении, являющегося сложной теплофизической проблемой, представляет большой практический и теоретический интерес. Данные, полученные в экспериментах по смешению жидкостей, также активно используются для верификации расчетных кодов. Для тройникового соединения трубопроводов со смешением потоков характерны процессы турбулентного перемешивания и вихреобразования, сопровождающиеся пульсациями давления, температуры и скорости. Вследствие этого на стенке тройникового соединения возникают циклические термические напряжения, которые могут стать причиной появления трещин в стенках трубопроводов. Температурная неоднородность поверхности трубопроводов является одной из основных причин повреждения энергетического оборудования [1]. Расчет температурных полей — важная задача с точки зрения обеспечения безопасности энергетического оборудования.

Исследование смешения потоков жидкости с различной температурой привело к разработке эталонного теста OECD/NEA [2]. В этом тесте было проведено детальное экспериментальное исследование гидродинамики и теплообмена в тройнике при подаче в него потоков холодной и горячей воды. В настоящее время появилось большое количество рас-

четных работ, выполненных на основе данных, содержащихся в спецификации данного теста. Например, в работах [3, 4] для расчета течения использовался метод LES. В рамках этого теста достаточно точные результаты получены при использовании расчетных кодов Cabaret, CONV-3D и Nek5000 [3].

В ряде экспериментальных работ рассматривался процесс смешения потоков жидкостей с различными температурами в тройниковых соединениях. Исследование смешения изотермических жидкостей в тройниках с помощью сеточного датчика выполнено в работе [5], авторы которой провели также вычисления процесса смешения с использованием кода ANSYS CFX [6]. В работе [7] вычисления проведены с использованием модели Ланжевена для дисперсии частиц. В работе [8] представлены данные тепловизионного исследования изменения температуры в зоне смешения на плоской модели тройникового соединения, измерены частоты пульсаций температуры через инфракрасную прозрачную стенку соединения, с помощью прямого преобразования Фурье построены спектральные кривые пульсаций.

Следует отметить, что в настоящее время все экспериментальные данные получены для жидкостей с ограниченным диапазоном значений числа Прандтля (вода, реже воздух). Однако вследствие сложной структуры течения и теплообмена в области смешения потоков необходимы исследования в более широком диапазоне значений числа Прандтля. Это позволяет изучить влияние толщин теплового и гидродинамического пограничных слоев на перемешивание потоков жидкости с различной температурой.

В настоящей работе представлены результаты экспериментального исследования смешения разнотемпературных потоков жидкостей с различными значениями числа Прандтля (глицерин, вода, металлический сплав Розе). Начальное условие эксперимента — мгновенный контакт холодного и горячего теплоносителей в тройниковом соединении. В ходе эксперимента проводились измерения температуры и ее пульсаций на поверхности Т-образного соединения и внутри области смешения потоков жидкости.

Стенд для проведения эксперимента состоит из системы трубопроводов, рабочего участка, баков с рабочими жидкостями и измерительной аппаратуры (рис. 1). Рабочая жидкость находилась в основном баке, снабженном электрическим нагревателем и тепловой изоляцией. Внутри бака находились перемешивающее устройство и термометр. В верхней части установки расположены два бака для создания потока жидкости с различными температурами. Каждый из этих баков содержал электрический нагреватель, датчик температуры и перемешивающее устройство. В одном из баков был смонтирован теплообменник. В основном баке проводился предварительный нагрев рабочей жидкости, после чего она закачивалась в верхние баки с помощью центробежного насоса. Стабилизация температур жидкости в этих баках на требуемых уровнях проводилась с помощью электрических нагревателей и теплообменника.

Рабочим участком контура являлась вертикальная труба 7 с внутренним диаметром 30 мм, к которой перпендикулярно присоединена труба 9 диаметром 15 мм. Жидкость из верхнего бака 3 подавалась в тройниковое соединение через трубу 8, жидкость из сосуда 2 подавалась через трубу 9. На этих трубах были смонтированы запорные и регулирующие вентили. Жидкость после смешения подавалась в сливную трубу, на выходе из которой установлен запорный вентиль. Все элементы экспериментальной установки были изготовлены из материалов, выдерживающих высокую температуру.

Трубопроводы, соединяющие баки и рабочий участок, снабжены индивидуальными нагревателями, которые во время эксперимента поддерживают температуру, равную температуре холодной жидкости. Подводящие к Т-образному смесителю трубы изготовлены из меди и также снабжены системой термостабилизации, которая поддерживает температуру труб на уровне температуры холодной и горячей рабочих жидкостей для основного

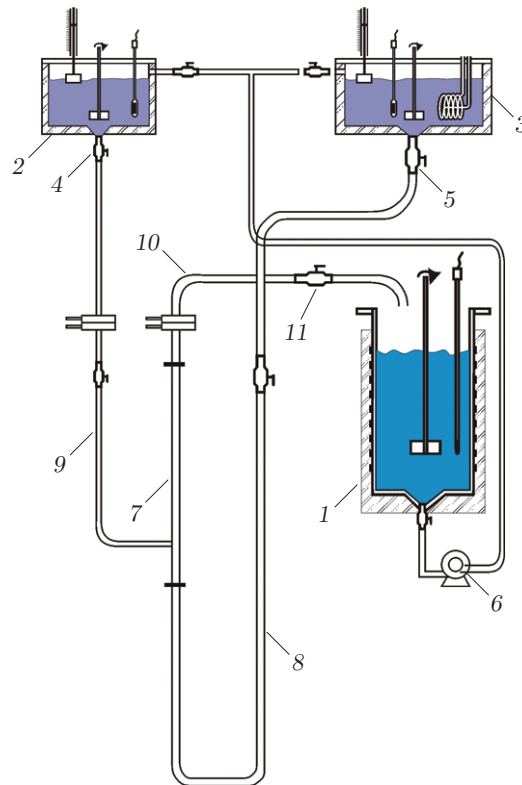


Рис. 1. Схема экспериментальной установки:

1 — основной бак, 2 — бак с горячей жидкостью, 3 — бак с холодной жидкостью, 4, 5 — вентили, 6 — центробежный насос, 7 — участок смешения, 8 — труба, по которой подводится холодная жидкость, 9 — труба, по которой подводится горячая жидкость, 10 — сливная труба, 11 — запорный вентиль

и бокового подводов соответственно. Непосредственно перед Т-образным смесителем имеются прямые участки подводящих трубопроводов длиной 12,5 калибров, служащие для стабилизации обоих потоков жидкости. Тестовые измерения показали, что значения среднеквадратичных пульсаций скорости на входе в тройник составляют 10–15 % величины среднемассовой скорости жидкости.

Т-образный смеситель состоит из двух нержавеющей труб, сваренных под прямым углом (рис. 2). Толщина стенок основной и подводящей труб равна 1 мм. Для предотвращения больших перепадов температуры вблизи стенок рабочего участка смеситель помещался в бокс, через который непрерывно прокачивался горячий воздух. Температура воздуха соответствовала температуре холодной жидкости. Наличие такой тепловой рубашки является необходимым условием проведения эксперимента и обеспечивает выполнение граничного условия третьего рода с известным коэффициентом внешней теплоотдачи $\alpha \approx 25 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ на внешней поверхности Т-образного смесителя.

Эксперименты проводились в циклическом режиме. Сначала проводился предварительный нагрев рабочей жидкости в нижнем баке. Затем жидкость закачивалась в верхние сосуды. Температуры жидкостей в верхних баках доводились до требуемых значений температуры холодной жидкости T_c и температуры горячей жидкости T_h . Перед началом эксперимента включалась измерительная аппаратура, фиксирующая показания температур на стенке Т-образного смесителя и в области смешения жидкостей. Затем открывался запорный вентиль холодной жидкости и в вертикальной трубе формировалось основное течение в направлении снизу вверх. Через некоторое время, необходимое для установле-

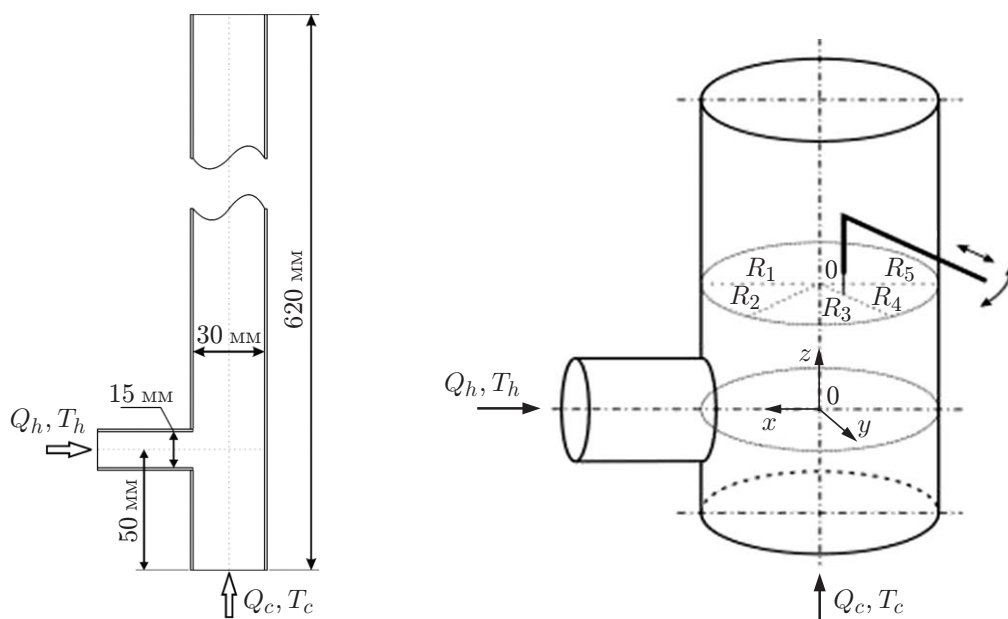


Рис. 2. Схема тройникового соединения и система координат

ния этого течения, открывался запорный клапан горячей жидкости и начинался процесс смешения в Т-образном соединении. Измерения прекращались при полном сливе рабочей жидкости из верхних баков в нижний бак. После этого жидкость вновь закачивалась в верхние баки и проводился следующий цикл эксперимента. В течение цикла проводилось непрерывное измерение температур жидкости в верхних и нижнем баках и перед входом в смеситель, а также расходов основного и дополнительного потоков. Время одного экспериментального цикла составляло $600 \div 800$ с. Такая схема эксперимента была выбрана с целью стабилизации течений и исключения влияния возмущающего фактора, связанного с работой насоса.

В ходе эксперимента непрерывно контролировались и фиксировались следующие параметры: температура рабочей жидкости во всех баках; температура жидкости в запорных и контрольных клапанах; температура стенок труб, по которым горячая и холодная жидкости подводились к области смешения; температуры горячей и холодной жидкостей непосредственно перед Т-образным тройником.

Точность, с которой поддерживались заданные значения температуры жидкостей в баках в течение одного цикла, определяется гистерезисом системы термостатирования и составляет $\pm 1,5$ °С, погрешность измерения расходов по данным градуировки составляет $\pm 2,5$ %.

В зоне смешения горячего и холодного потоков измеряются температура и пульсации температуры на поверхности канала и внутри трубы после смешения потоков жидкости с различной температурой, а также распределение значений этих параметров по осевой, азимутальной и поперечной координатам.

Система координат также показана на рис. 2. Параметры области измерения распределения температуры на поверхности Т-образного смесителя имели следующие значения: протяженность области измерения по координате z — 180 мм, развертка по угловой координате φ — от -90° до 90° . Отсчет по вертикальной координате z начинался от верхней границы трубки подвода горячей жидкости.

Измерение температуры на внешней стенке трубы в области смешения потоков проводилось с помощью метода инфракрасной термографии и тепловизоров Flir Titanium 570M

и Fluke T32. Тепловизионные измерения выполнялись с трех позиций, расположенных под углом 60° относительно друг друга и оси рабочего участка. Измерения проводились на рабочем участке на высоте от -20 до 160 мм (см. рис. 2).

Измерение температуры жидкости в области смешения выполнялось с помощью мобильной термопары с диаметром проводов $0,12$ мм. Использовался спай медь — константан. Термопара закреплялась в Г-образную державку. Рабочий спай термопары располагался навстречу потоку. С помощью координатного механизма проводилось поперечное перемещение рабочего спаи термопары в выделенном сечении области смешения вдоль оси симметрии. Минимальное расстояние от спаи термопары до внутренней поверхности трубы смесителя составляло 1 мм, максимальное расстояние от термопары соответствует длине оси трубы в области смешения. Шаг изменения положения термопары равен 2 мм. Азимутальная координата точки измерения температуры жидкости изменялась путем поворота блока термопары.

В качестве рабочей жидкости в экспериментальной установке использовались вода, глицерин при повышенной температуре и жидкометаллический сплав Розе ($50\% \text{ Bi} - 25\% \text{ Pb} - 25\% \text{ Sn}$) с температурой плавления 94°C .

Температура жидкости в основном холодном потоке жидкости составляла 30°C в экспериментах для воды, 60°C для глицерина и 120°C для сплава Розе. Во всех случаях температура жидкости горячего потока была больше температуры основного потока приблизительно на 30°C .

Средняя скорость жидкости V_0 основного потока определялась по расходу холодной жидкости в основной трубе. Параметр r , равный отношению расхода горячего потока Q_h к расходу холодного потока Q_c , определял отношение расходов горячей и холодной жидкостей.

На рис. 3, 4 показаны распределения температуры на стенке в зоне смешения для воды и глицерина соответственно. Положение точки ввода горячей жидкости в холодный поток соответствует величине полярного угла $\varphi = -90^\circ$ и вертикальной координате $z = 0$. На термограммах видно, что в случае течения воды с малым расходом наблюдается режим, при котором наиболее высокая температура регистрируется вблизи точки ввода горячей жидкости. В этом случае реализуется режим течения струи вдоль стенки. При увеличении расхода горячей воды увеличивается интенсивность перемешивания горячей жидкости в потоке (см. рис. 3, б). При максимальном значении расхода жидкости реализуется режим сталкивающихся струй и максимальное значение температуры наблюдается в области, расположенной напротив области ввода горячей жидкости (см. рис. 3, в).

При смешении двух потоков глицерина ситуация несколько отличается от описанной выше. При малых расходах наблюдается существенная стратификация горячего и холодного потоков на расстояниях до 300 мм от области начала смешения. С увеличением расхода горячей жидкости пристенная стратификация исчезает, более того, термограмма распределения температуры на стенке свидетельствует об отсутствии горячих зон (см. рис. 4, б). При дальнейшем увеличении расхода горячей жидкости, как и в случае течения воды, наблюдался режим сталкивающихся струй с максимальной температурой в области, расположенной напротив зоны ввода горячей жидкости.

На рис. 5, 6 показаны распределения температуры в поперечном сечении области смешения, определяемой плоскостью координат x и y , при различных значениях аксиальной координаты z . По вертикальной оси отложена разность значений текущей температуры и температуры холодного потока $T - T_c$. Положение области ввода горячей жидкости соответствует координатам $x = 20$ мм, $y = 0$.

На рис. 5 видно, что в случае расхода горячего потока, соответствующего $r = 0,42$, горячая жидкость перемещается преимущественно в центральной части трубы. С уве-

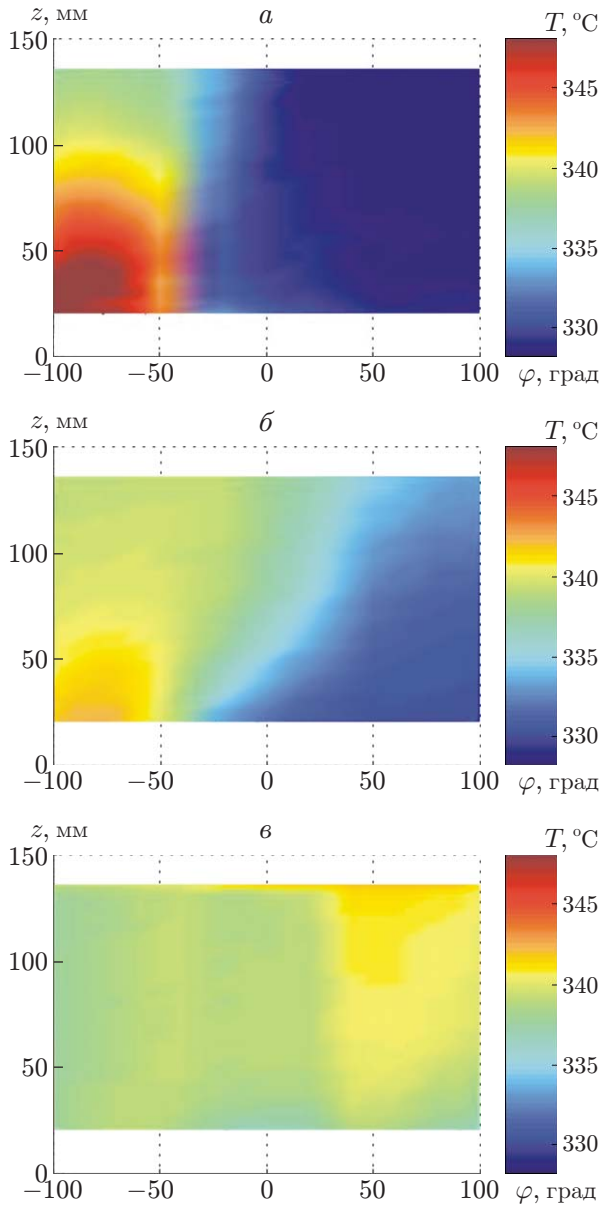


Рис. 3

Рис. 3. Распределение температуры стенки в зоне смешения для воды при $V_0 = 0,37$ м/с и различных значениях отношения расходов горячей и холодной жидкостей:

a — $r = 0,17$; $б$ — $r = 0,31$; $в$ — $r = 0,48$

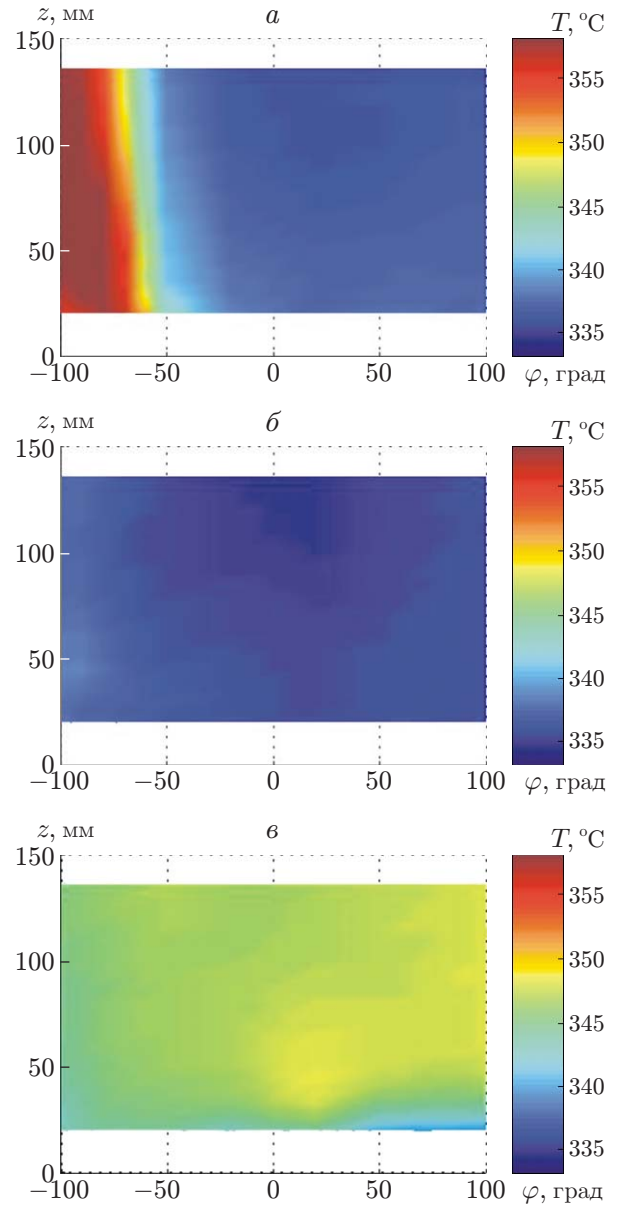


Рис. 4

Рис. 4. Распределение температуры стенки в зоне смешения для глицерина при $V_0 = 0,34$ м/с и различных значениях отношения расходов горячей и холодной жидкостей:

a — $r = 0,07$; $б$ — $r = 0,28$; $в$ — $r = 0,63$

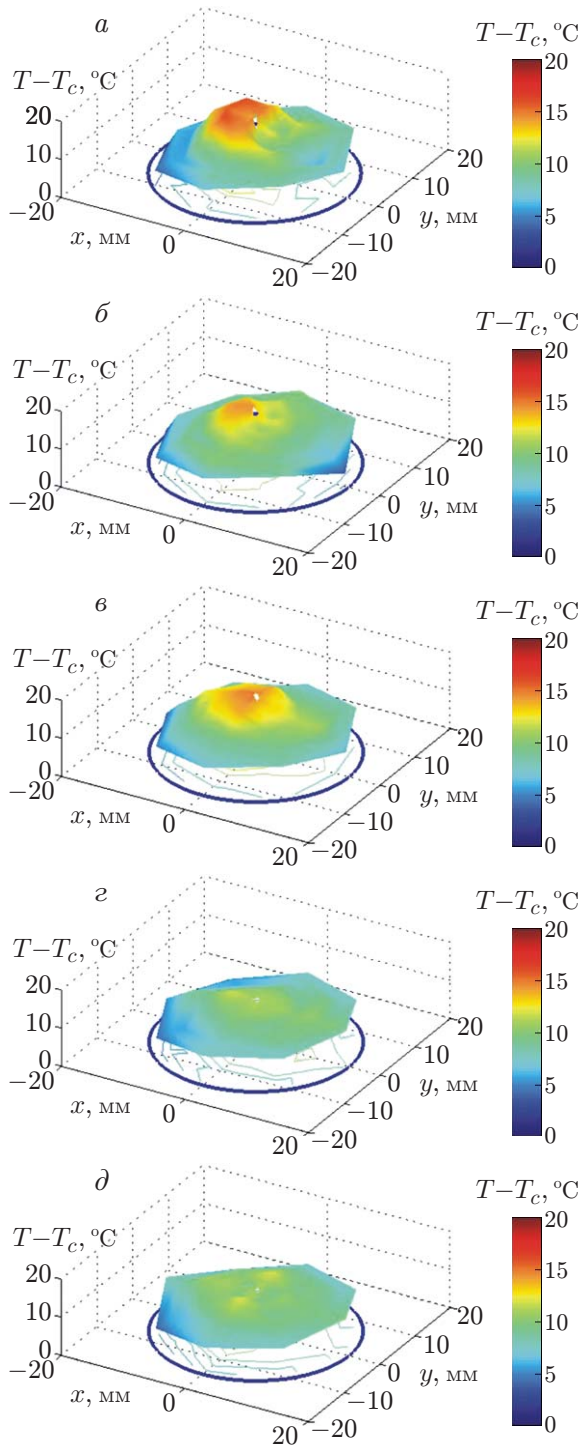


Рис. 5

Рис. 5. Распределение температуры в области смешения при $V_0 = 0,34$ м/с, $r = 0,42$ и различных значениях аксиальной координаты z :
 а — $z = 50$ мм, б — $z = 100$ мм, в — $z = 150$ мм, г — $z = 250$ мм, д — $z = 350$ мм

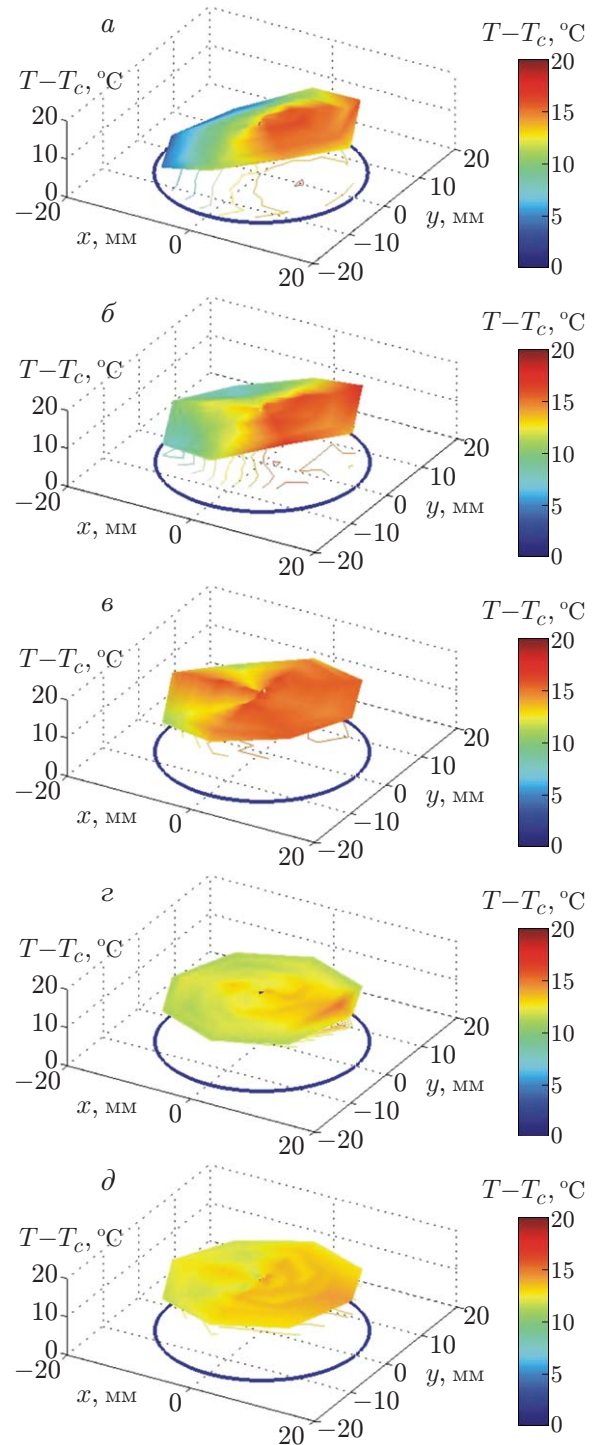


Рис. 6

Рис. 6. Распределение температуры в области смешения при $V_0 = 0,34$ м/с, $r = 0,63$ и различных значениях аксиальной координаты z :
 а — $z = 50$ мм, б — $z = 100$ мм, в — $z = 150$ мм, г — $z = 250$ мм, д — $z = 350$ мм

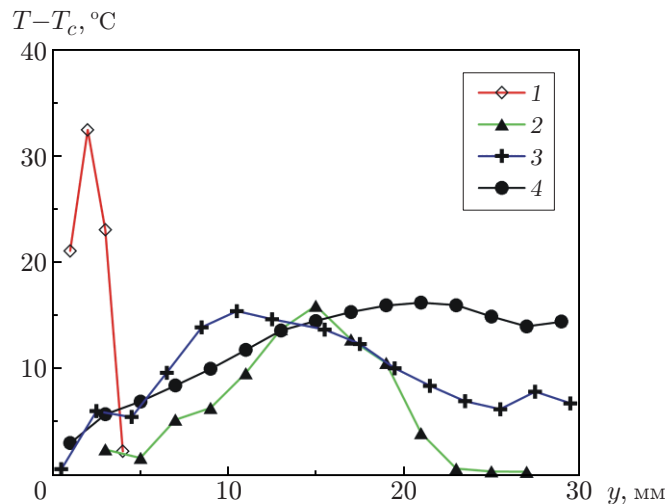


Рис. 7. Распределение температуры в области смешения жидкостей при $V_0 = 0,34$ м/с и различных значениях отношения расходов: 1 — $r = 0,02$, 2 — $r = 0,28$, 3 — $r = 0,42$, 4 — $r = 0,63$

личением расстояния от области ввода горячей жидкости жидкость перемешивается, что приводит к более равномерному распределению температуры в поперечном сечении. С увеличением расхода горячего потока до значения $r = 0,63$ наблюдается интенсивное перемешивание жидкости, что приводит к равномерному распределению температуры на расстояниях, превышающих 250 мм (см. рис. 6).

Для получения информации о средних и флуктуационных характеристиках изменения температуры фиксировались показания термопары, перемещаемой по сечению трубы. Измерения проводились в поперечном сечении области смешения, расположенном на расстоянии 50 мм от области ввода горячей жидкости. Для определения влияния соотношения расходов жидкости на распределение температуры измерения проведены при одном значении расхода холодной жидкости (соответствующая скорость течения составляет $V_0 = 0,34$ м/с), а значения отношения расходов горячей и холодной жидкостей составляли $r = 0,02 \div 0,63$.

Зависимость осредненной по времени разности температур от координаты y показана на рис. 7 (в качестве рабочей жидкости использовался глицерин). При малом расходе горячей жидкости ($r = 0,02$) в пристенной зоне непосредственно над областью ввода наблюдались большие значения разности температур $T - T_c \approx 23$ °C. В этой области градиент температуры составлял более 20 °C/мм, между слоями горячей и холодной жидкостей образовывался тонкий фронт толщиной приблизительно 1 ÷ 2 мм.

Увеличение расстояния до области смешения потоков жидкости приводит к увеличению температуры в этой области, а также к увеличению ее толщины до 10 мм. В этом случае слой горячей жидкости не касается стенки канала. Он окружается холодной жидкостью со всех сторон. В центральной части канала наблюдается увеличение разности $T - T_c$, вблизи стенки — уменьшение. Возможно, это обусловлено более интенсивным перемешиванием.

При дальнейшем увеличении отношения расходов r режим течения в области смешения обусловлен проникновением струи горячей жидкости к противоположной стенке. В этом случае максимальная температура наблюдается в области стенки, расположенной напротив зоны ввода горячей жидкости. Этот результат хорошо согласуется с данными, полученными при измерении температуры поверхности Т-образного соединения.

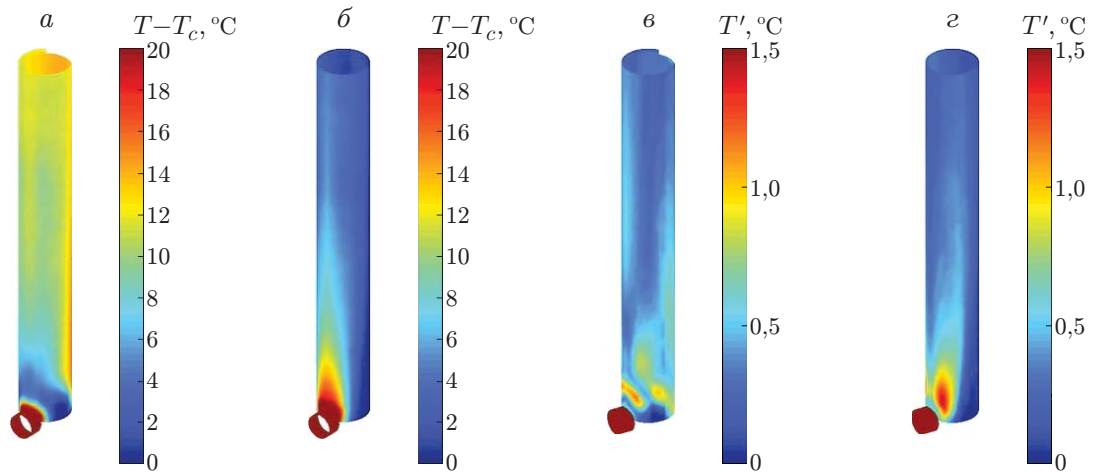


Рис. 8. Температура стенки (*а*, *б*) и пульсации температуры на ее поверхности (*в*, *г*) для сплава Розе при различных значениях отношения расходов:
а, *в* — $r = 0,63$, *б*, *г* — $r = 0,07$

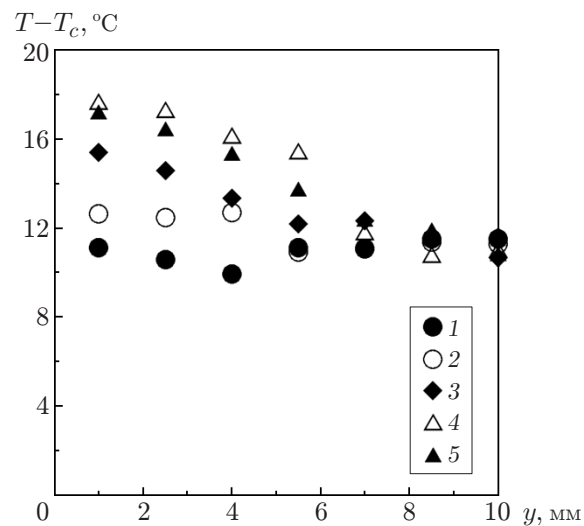


Рис. 9. Распределение температуры жидкости по поперечному сечению области смешения на расстоянии $z = 50$ мм от области начала смешения при перемещении датчика по различным радиусам:
 1 — R_1 ($\varphi = -90^\circ$), 2 — R_2 ($\varphi = -45^\circ$), 3 — R_3 ($\varphi = 0^\circ$), 4 — R_4 ($\varphi = 45^\circ$), 5 — R_5 ($\varphi = 90^\circ$)

В экспериментах с использованием в качестве рабочей жидкости сплава Розе температура холодного потока в основной трубе составляла 120 °С. Отношения расходов горячей и холодной жидкостей изменялись в диапазоне $0,02 \div 0,63$. На рис. 8 приведено характерное распределение температуры стенки, полученное путем обработки записей инфракрасной камеры из трех положений. Показаны поля осредненной температуры и интенсивности температурных колебаний $T' = \sqrt{\langle (T - \langle T \rangle)^2 \rangle}$ в области смешения. Соотношение скоростей горячей и холодной жидкостей составляло $r = 0,63$ (см. рис. 8,а) и $r = 0,07$ (см. рис. 8,б). В первом случае горячая жидкость из патрубка достигает противоположной стенки, во втором случае горячая жидкость захватывается потоком холодной жидкости и перемещается вертикально вверх в области соединения патрубков Т-образного соединения.

Профили температуры в области смешения потоков на расстоянии $z = 50$ мм от точки ввода горячей жидкости показаны на рис. 9. В поперечном сечении канала измерялась температура вдоль радиусов, соответствующих различным значениям окружного угла φ . Координата y соответствует расстоянию от стенки трубы. Радиусы R_1, R_2, \dots, R_5 , по которым перемещался датчик, приведены на рис. 2. На рис. 9 видно, что на небольшом расстоянии от области начала смешения жидкостей структура температурного поля не является существенно аксиально-симметричной. По мере увеличения расстояния от области начала смешения неравномерность распределения температуры по сечению канала при различных значениях φ уменьшается.

Заключение. Проведено экспериментальное исследование смешения в Т-образном соединении двух разнотемпературных потоков жидкостей с различными теплофизическими свойствами и существенно различающимися значениями числа Прандтля. Измерения проводились при различных значениях расходов горячего и холодного потоков жидкости. Температура на стенке Т-образного соединения измерялась с помощью высокоскоростной инфракрасной камеры. Температура жидкости в области смешения измерялась микротермопарой по длине зоны смешения и по азимутальному углу канала. В результате измерений обнаружена значительная неравномерность распределения температур стенки и жидкости в области смешения. Структура температурного поля в значительной мере зависит как от физических свойств жидкости, так и от соотношения расходов разнотемпературных жидкостей в основном и боковом потоках.

Полученные данные могут быть использованы в качестве экспериментальной базы для верификации расчетных CFD-кодов.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Wakamatsu M., Nei H., Hashiguch K.** Attenuation of temperature fluctuations in thermal striping // J. Nuclear Sci. Technol. 1995. V. 32. P. 752–762.
2. **Smith B. L., Mahaffy J. H., Angele K., Westin J.** Report of the OECD/NEA Vattenfall T-junction benchmark exercise: Tech. Rep. / OECD/NEA. NEA/CSNI/R(2011)5. S. 1., 2011.
3. **Obabko A. V., Fischer P. F., Karabasov T. J. S., et al.** CFD validation in OECD/NEA T-junction benchmark: Rep. / Argonne Nat. Lab. ANL/NE11/25. Lemont, 2011.
4. **Ayhan H., Sökmen C. N.** CFD modeling of thermal mixing in a T-junction geometry using LES model // Nuclear Engng Design. 2012. V. 253. P. 183–191.
5. **Walker C., Simiano M., Zboray R., Prasser H.-M.** Investigations on mixing phenomena in single-phase flow in a T-junction geometry // Nuclear Engng Design. 2009. V. 239. P. 116–126.
6. **Frank T., Lifante C., Prasser H.-M., Menter F.** Simulation of turbulent and thermal mixing in T-junctions using URANS and scale-resolving turbulence models in ANSYS CFX // Nuclear Engng Design. 2010. V. 240. P. 2313–2328.

7. **Dehbi A., de Crécy F.** Validation of the Langevin particle dispersion model against experiments on turbulent mixing in a T-junction // Powder Technol. 2011. V. 206. P. 312–321.
8. **Большухин М. А., Знаменская И. А., Свешников Д. Н., Фомичев В. И.** Термографическое исследование турбулентных пульсаций воды при неизотермическом смешении // Автометрия. 2014. Т. 50, № 5. С. 75–83.

*Поступила в редакцию 24/III 2020 г.,
после доработки — 24/III 2020 г.
Принята к публикации 30/III 2020 г.*
