

В.К. Артемьев, А.Н. Опанасенко, А.В. Степанов

ФГУП ГНЦ РФ — Физико-энергетический институт им. А.И. Лейпунского, г. Обнинск, Россия

## РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОЙ СТРАТИФИКАЦИИ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ В КАНАЛЕ

### АННОТАЦИЯ

Доклад посвящен расчетно-экспериментальным исследованиям температурной стратификации теплоносителя в горизонтальном канале, соединенным с вертикальным. Исследованы термогидравлические характеристики потока, его устойчивость, рассмотрены условия возникновения температурного расслоения в режимах работы с перепадом температур по отдельным каналам. Проанализированы критические значения числа Фруда, при котором возникает стратификация в трубопроводах, получены обобщающие зависимости для клина горячей жидкости. Представлена математическая модель и результаты численных исследований.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Явление температурной стратификации теплоносителя в каналах относится к сложной и недостаточно изученной области технической теплогидравлики. Термические напряжения, возникающие из-за больших и резких перепадов температуры, присущих температурной стратификации, вызывают серьезные проблемы при конструировании любой технической системы. Важной проблемой для безопасности и надежности ядерно-энергетических установок [1—3] является изучение температурной стратификации при течении теплоносителя в трубопроводах. Ряд аварий с реакторами под давлением и кипящего типа сделали эту проблему весьма актуальной. В работе представлены результаты экспериментальных и численных исследований, выполненных на модели холодной нитки трубопровода реактора типа ВВЭР. Рассмотрены условия возникновения температурной стратификации в отдельных трубопроводах. Исследованы теплогидравлические характеристики течения и его устойчивость, проанализированы критическое число Фруда, при котором возникает температурная стратификация, получены зависимости для длины горячего "клина" жидкости. Численное моделирование смешанной конвекции выполнено на основе уравнений Навье—Стокса. Использован неявный численный метод [4]. Представлены результаты численных расчетов и сравнение с экспериментальными данными.

### 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование температурной стратификации было выполнено на прозрачной модели, схема которой показана на рис. 1. В имитатор опускного кольцевого зазора сверху через гидравлическую решетку подавалась горячая вода с постоянным

расходом. Сбоку через горизонтальный прозрачный трубопровод, имитирующий контур циркуляции первого контура, подавалась холодная вода с заданным расходом, который мог изменяться в широком диапазоне ( $0—3,0 \text{ м}^3/\text{ч}$ ). Исследования проводились на трубопроводах с внутренним диаметром  $d = 25, 45$  и  $75$  мм, моделирующих трубопровод для ввода холодной жидкости из ГЕ с АОЗ в кольцевой зазор, трубопровод главного циркуляционного контура. Относительная длина трубопроводов была не менее  $20d$ .

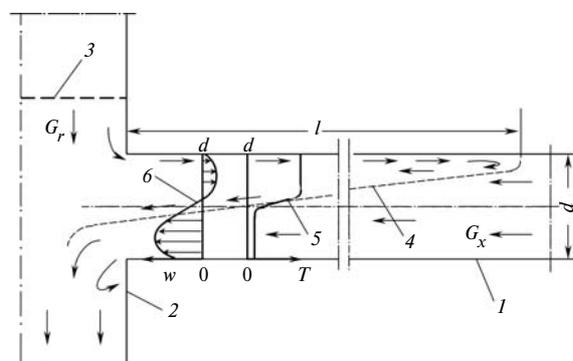


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 — трубопровод; 2 — опускной кольцевой канал; 3 — гидравлическая решетка; 4 — поверхность раздела; 5 — распределение температуры; 6 — распределение скорости

Перепад температур между входом в опускной кольцевой зазор и трубопроводом в различных экспериментах изменялся в интервале  $\Delta t = 20—65^\circ\text{C}$ . Измерения распределений температуры по вертикальному диаметру трубопровода проводились 10 подвижными хромель-копелевыми микротермопарами, установленными на различных расстояниях от опускного участка. Рабочий спай термопар выполнен с утеплением до  $0,3$  мм для уменьшения тепловой инерции до  $0,1$  сек. Измерения расходов воды в опускном кольцевом зазоре и трубопроводе осуществлялись расходомерной шайбой в комплекте с преобразователями разности давлений типа «Сапфир — 22 дд». Визуализация потока проводилась введением микрочастиц или подкрашиванием. В некоторых опытах для измерения распределений скорости по диаметру трубопровода использовался лазерный доплеровский анемометр, а для измерения распределений температуры — теневой и интерференционный методы (см. рис. 2). Интерференционная картина получается в результате взаимодействия опорного пучка света лазера, имеющего постоянную фазу излучения по всему полю, и рабочего пучка, в котором имеется изменение фазы электро-

магнитных колебаний, соответствующие изменению плотности в исследуемом потоке. В результате наложения пучков образуются чередующиеся темные и светлые полосы, соответствующие линиям равной плотности. Если плотность однозначно определяется температурой, то полосы соответствуют изотермическим поверхностям. Точность измерения температуры — 0.1°C, расхода и скорости ~ 3%.

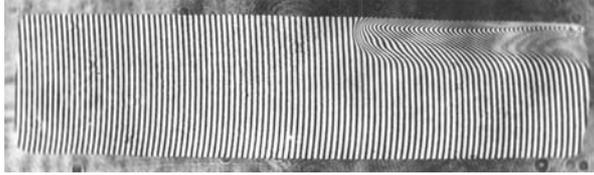


Рис. 2. Интерференционная картина образования клина

### 3. ЧИСЛЕННАЯ МОДЕЛЬ

Математическая модель смешанной турбулентной конвекции представляет систему уравнений, которая включает уравнение неразрывности, три уравнения количества движения, уравнение энергии, уравнение состояния.

Для некоторых режимов общая система может быть упрощена на основе приближения Буссинеска для моделирования сил плавучести. В безразмерном виде двумерная система уравнений в декартовых координатах принимает вид:

$$\frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y} = 0; \quad (1)$$

$$\frac{\partial u_x}{\partial t} + u_x \frac{\partial u_x}{\partial x} + u_y \frac{\partial u_x}{\partial y} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{1}{\text{Re}} \Delta u_x; \quad (2)$$

$$\frac{\partial u_y}{\partial t} + u_x \frac{\partial u_y}{\partial x} + u_y \frac{\partial u_y}{\partial y} = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\text{Gr}}{\text{Re}^2} T + \frac{1}{\text{Re}} \Delta u_y; \quad (3)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u_x \frac{\partial T}{\partial x} + u_y \frac{\partial T}{\partial y} = \frac{1}{\text{Re}} \Delta \theta, \quad (4)$$

где  $u_x, u_y$  — компоненты вектора скорости,  $p$  — давление,  $T$  — температура;  $\text{Re} = UL/\nu$  — число Рейнольдса,  $\nu$  — кинематическая вязкость,  $L$  — характерный размер,  $U$  — характерная скорость;  $\text{Gr} = g\beta L^3 \Delta T/\nu^2$  — число Грасгофа,  $g$  — ускорение силы тяжести,  $\Delta T$  — перепад температуры,  $\beta$  — коэффициент объёмного расширения;  $\text{Pr}$  — число Прандтля,  $\text{Re}=\text{Pr}\cdot\text{Re}$  — число Пекле,  $\text{Fr} = \frac{\text{Re}^2}{\text{Gr}} = \frac{U^2 L^2 \nu^2}{\nu^2 g \beta \Delta T L^3} = \frac{U^2}{g \beta \Delta T L}$  — число Фруда.

В экспериментальных исследованиях в качестве основных параметров, определяющих подобие стратифицированных течений, кроме интегрального числа Фруда, использовалось и локальное градиентное число Ричардсона (при условии автомодельности по числу Рейнольдса)

$$\text{Ri} = g\beta \Delta T / \partial y / (\partial u_y / \partial y)^2.$$

Расчетная область в декартовых координатах представлена на рис.3.

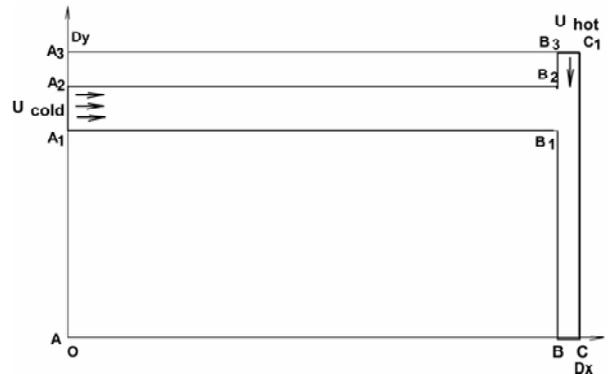


Рис. 3. Расчетная область

Ставятся следующие граничные условия:

на стенке  $\vec{U}=0, \partial T / \partial n = 0$ ;

на входе ( $A_1 A_2$ ):  $u_x = V_{\text{хол}}, u_y = 0, T = T_{\text{хол}}$ ;

на входе ( $B_3 C_1$ ):  $u_x = 0, u_y = V_{\text{гор}}, T = T_{\text{гор}}$ ;

на выходе:  $u_x = 0, \partial v_y / \partial y = 0, \partial T / \partial y = 0$ .

Для решения уравнений математической модели (1)—(4) был развит неявный численный метод [4]. Уравнения аппроксимируются на основе монотонных балансных нейтральных разностных схем (МБН), позволяющих сохранить ряд важных интегральных свойств дифференциальных операторов. Для описания тонких пограничных слоев используется неравномерная сетка, и расчеты проводятся вплоть до твердых стенок. Разностное уравнение для давления выводится на основе разностного уравнения неразрывности и разностных уравнений количества движения. Для решения системы нелинейных разностных уравнений применяется неявный метод установления с линеаризацией на шаге установления. Для решения линейных разностных уравнений используется метод неполной факторизации. Неявный метод устойчив и сходится при решении плохо обусловленных задач.

Численные расчеты проводились в области  $AA_3C_1C$  с использованием метода фиктивных областей. Для корректного описания пограничных слоев использовалась неравномерная сетка с логарифмическим сгущением к твердым стенкам. Число узлов  $NX \times NY = 400 \times 100$ .

### 4. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Исследования показали, что при числах  $\text{Fr} \leq 2$  под действием термогравитационных сил, обусловленных перепадом температуры  $\Delta T = T_{\text{гор}} - T_{\text{хол}}$ , в трубопроводе возникает встречное движение. Горячий теплоноситель из опускного участка поступает в верхнюю область трубопровода и распространяется против движения холодного теплоносителя на определенную длину  $\ell$ , затем, повернув на 180°,

движется обратно над холодным потоком, не смешиваясь с ним.

Наблюдения структуры движения в трубопроводах различного диаметра показали, что длина клина горячей жидкости не является стабильной и совершает случайные низкочастотные колебания по длине с амплитудой  $\delta l = 0.5d$ . Профили безразмерной температуры по вертикальному диаметру трубопровода для различных расстояний от опускного кольцевого зазора показаны на рис. 4. Вода практически изотермична как в клине горячей жидкости, так и в нижней холодной области. Весь перепад температуры сосредоточен в тонкой стратифицированной прослойке между изотермическими областями.

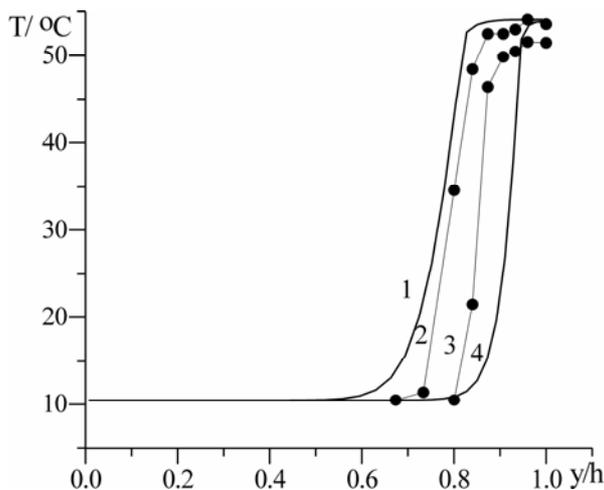


Рис. 4. Профили температуры в сечениях трубы:  $T_{\text{хол}}=10.3^\circ\text{C}$ ,  $T_{\text{гор}}=52.5^\circ\text{C}$ ,  $Re=5.1 \cdot 10^3$ ,  $Fr=0.63$ ; 1, 2 — на расстоянии  $2d$  от кольцевого зазора, 3, 4 — на расстоянии  $7d$ ; — расчет, ● — эксперимент

Масштаб плавучести на границе раздела сравним с размерами минимальных вихрей, на которых осуществляется диссипация кинетической энергии. Поэтому на поверхности раздела происходит полное подавление конвективного обмена в вертикальном направлении. Для описания формы поверхности раздела использован параметр  $K=Re \cdot Fr$ . Исследования на моделях горизонтальных трубопроводов показали, что стратифицированная поверхность раздела прямолинейна при  $K \leq 250$ . С увеличением числа  $Re$  на поверхности раздела появляются внутренние волны, и при  $K > 3000$  они становятся неустойчивыми. На границе раздела появляется турбулентная прослойка, которая не обменивается конвективным переносом с верхней горячей и нижней холодной зонами. Дальнейшее увеличение расхода приводит к расширению промежуточной турбулентной прослойки. Характерные пульсации температуры при  $K = 6264$ , зафиксированные неподвижными микротермопарами, установленными в конце клина горячей жидкости, на стратифицированной поверхности и заделанной в материале трубопровода (сталь X18H10T) на глубину 0.3 мм на уровне поверхности раздела показаны на рис. 5а)-5с) соответственно. Двойная амплитуда пульсаций темпера-

туры на границе раздела примерно равна перепаду температур в опускном кольцевом зазоре и холодном трубопроводе и вызывает термические напряжения материала трубопроводов.

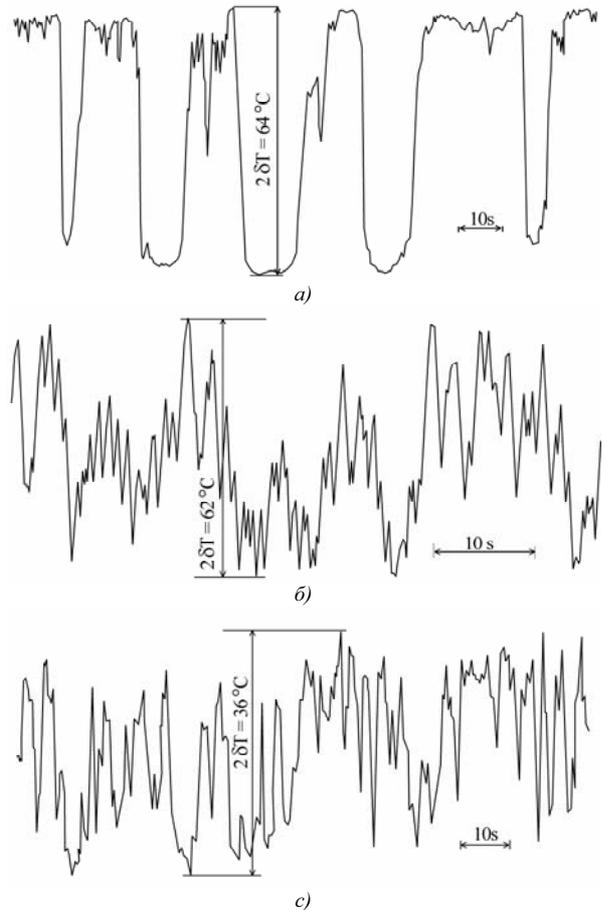


Рис. 5. Пульсации температуры при  $Re=1.16 \cdot 10^4$ ;  $Fr=0.54$ ;  $M=6264$ ,  $\Delta T=65^\circ\text{C}$ ; а) в конце клина горячей жидкости; б) на стратифицированной поверхности; в) в стальной стенке трубопровода

Расчёты проводились для моделей с внутренним диаметром  $d = 25, 45$  и  $75$  мм, длиной трубопровода  $L/d=10 \div 20$ , толщиной кольцевого зазора 35 мм. Численные эксперименты подтвердили экспериментальные выводы о структуре течения и характере распределения температуры. На рис. 4 представлены профили температуры в некоторых сечениях трубопровода. На рис. 6—8 приведены результаты расчетов, полученные при

$$T_{\text{хол}}=10.5^\circ\text{C}, T_{\text{гор}}=54^\circ\text{C} \quad Re=3.4 \cdot 10^3, Fr=0.34.$$

На рис. 9 показано изменение длины клина при увеличении входной скорости холодной жидкости. Хорошее количественное совпадение было получено между экспериментальными и расчетными значениями для длины горячего клина (ошибка менее 5%). Относительная длина установившегося клина горячей жидкости в холодном трубопроводе в исследованном диапазоне чисел  $Re = 10^2 \text{—} 10^4$  и  $Fr = 0.1 \div 2$  может быть описана по формуле

$$l/d = c \cdot Re^{0.5} \cdot Fr^{1.5}, \quad (5)$$

где  $c$  — постоянная величина, зависящая от диаметра трубопровода (при  $d=45$  мм,  $c = 0,015$ ;  $d=75$  мм,  $c = 0,072$  ). При малых числах Фруда расслоение охватывает всю длину трубопровода.

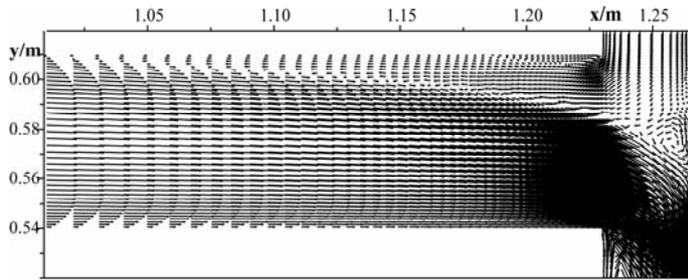


Рис. 6. Поле скорости

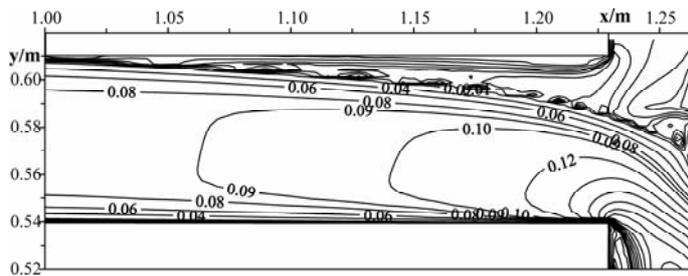


Рис. 7. Изолинии модуля скорости

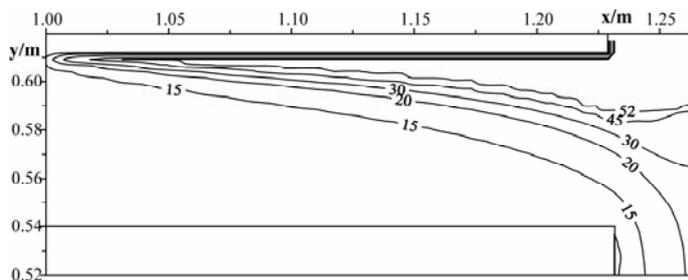


Рис. 8. Изолинии температуры

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные экспериментальные показали, что в горизонтальном канале при числах  $Fr \leq 2$  под действием термогравитационных сил, обусловленных перепадом температуры, возникает движение горячего теплоносителя, не смешивающееся с холодным.

Длина клина горячей жидкости не является стабильной и совершает случайные низкочастотные колебания. С увеличением числа  $Re$  на поверхности раздела появляются внутренние волны, затем они становятся неустойчивыми; постепенно на стратификационной границе образуется турбулентная прослойка.

Представлена математическая модель и результаты численных исследований. Модель позволяет оценить важные характеристики температурной стратификации, но не учитывает все существенные черты этого явления, поэтому необходимо применение общей трехмерной модели.

Исследования проведены при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований и правительства Калужской области (проект № 04-01-97216).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **H. Schulz** Experience with Thermal Fatigue in LWR Piping caused by Mixing and Stratification, Proc. Specialist Meeting, 1998. P. 13—18.
2. **Опанасенко А.Н.** Свободноконвективный теплоперенос через канал с различной ориентацией в поле тяжести, соединяющий замкнутые полости с различной температурой // Труды Второй Российской национальной конференции по теплообмену. М.: Издательство МЭИ, 1998. Т. 3. С.116—119.
3. **Опанасенко А.Н.** В сб. Гидродинамика и безопасность ядерных энергетических установок // Сборник трудов ГНЦ РФ ФЭИ. Обнинск, 1999. Т.2. С. 71—105.
4. **Artemyev V.K.** Implicit Numerical Method for Solving of Fluid Mechanics, Heat and Mass Transfer Equations, Proc. 11th ИНТС, Kyongju. Korea. 1998. V.4. P. 307—312.

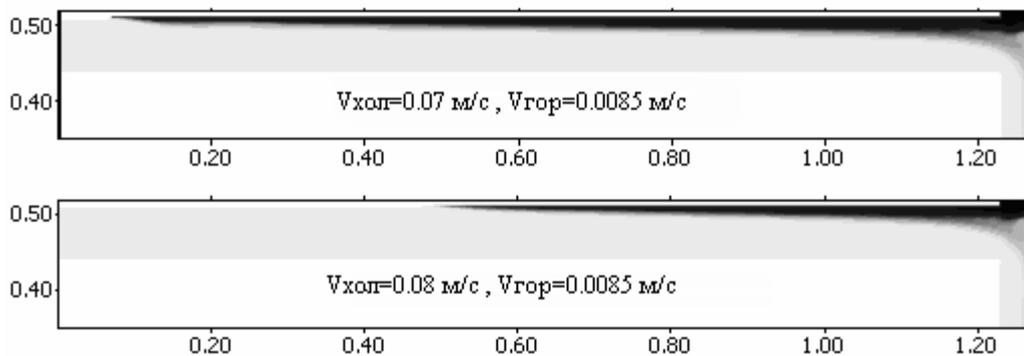


Рис. 9. Положение клина горячей жидкости (затемненная область) в зависимости от входных скоростей на горизонтальном и вертикальном участках