

Исследование теплообмена при течении смеси газов с малым числом Прандтля в стержневой сборке с разделительными решетками^{*}

О.В. Витовский, М.С. Макаров, К.С. Лебеда, В.С. Наумкин

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

E-mail: vitovsky@itp.nsc.ru

В работе приведены результаты экспериментального исследования теплообмена при течении газового теплоносителя в пространстве, образованном плотной упаковкой из семи нагреваемых труб. Для фиксации труб использовалось восемь дистанционирующих вставок с продольными вытеснителями для обеспечения равномерного поля расходов газа во внутренних и внешних каналах трубного пучка. В качестве рабочего тела использовались газовые смеси с большим отличием по числу Прандтля: воздух ($Pr = 0,7$), гелий-ксеноновая смесь ($Pr = 0,23$). Опыты проведены в диапазоне чисел Рейнольдса 2218 – 12900.

Ключевые слова: гелий-ксеноновая смесь, теплообмен, тепловыделяющая сборка, распределение температуры, число Нуссельта.

Введение

Теплообменные аппараты, выполненные в виде пучка близкорасположенных труб, вдоль которых в межтрубном пространстве течет теплоноситель, широко используются в химическом производстве, энергетике и многих других отраслях. Оптимизация конструктивных параметров этих аппаратов, а также применение различных методов интенсификации теплообмена позволяют добиться экономической эффективности использования таких устройств. Ядерный реактор, в котором теплоноситель движется в межтрубном пространстве, образованном пучком цилиндрических тепловыделяющих элементов, можно рассматривать как один из примеров таких теплообменных аппаратов [1, 2]. Использование в качестве теплоносителя газа или смеси газов в ядерных реакторах дает ряд преимуществ по сравнению с применением в них водяных теплоносителей [3]. К ним относится возможность нагрева теплоносителя до высоких температур, что повышает коэффициент полезного действия энергетической установки в целом, а также возможность прямого выхода газа в турбину в замкнутом цикле Брайтона.

Цель работы заключается в экспериментальном исследовании теплообмена при течении газовых смесей с большим отличием по числу Прандтля в пространстве, образованном семью близкорасположенными нагреваемыми трубами с дистанционирующими решетками, равномерно распределенными по длине пучка труб.

^{*} Исследования выполнены в рамках государственного задания ИТ СО РАН.

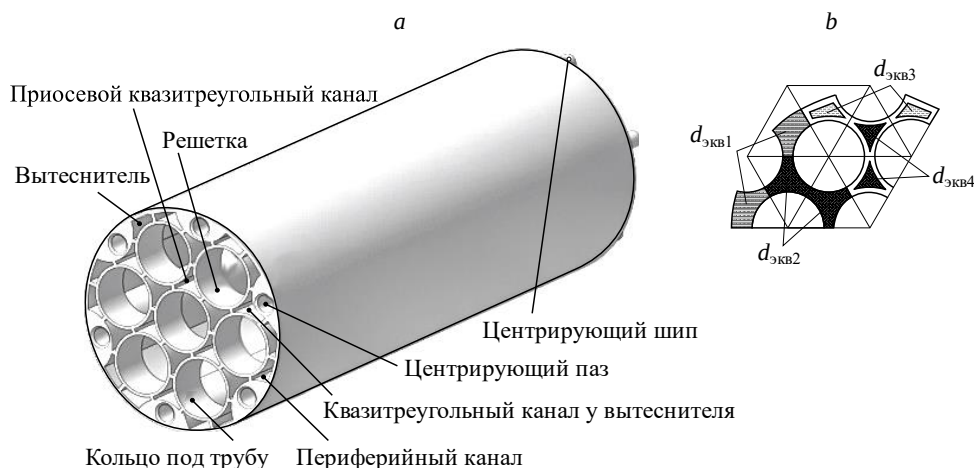


Рис. 1. Схема дистанционирующих решеток в стакане с вытеснителями (а) и вид сечения каналов межтрубного пространства и решетки (b).

1. Экспериментальное оборудование

Рабочий участок, используемый для проведения опытов, содержал семь тонкостенных нихромовых труб диаметром 12,85 мм. Шаг между установленными дистанционирующими решетками составлял 14,15 мм, а отношение внешнего диаметра к длине — 0,0118 мм. Трубы нагревались переменным электрическим током. Плотность теплового потока от нагреваемых стенок труб к газу считалась постоянной. Необогреваемый начальный участок длиной 80 мм стабилизировал течение перед входом в трубный пучок. Для фиксации труб использовались дистанционирующие решетки, совмещенные с продольными вытеснителями в виде стаканов, изготовленными с помощью 3D-печати по технологии SLA (лазерная стереолитография) из термостойкого UV-отверждаемого пластика (рис. 1а). Это обеспечивало равномерное поле расходов газа во внутренних и внешних каналах трубного пучка.

Решетки шириной 10 мм располагались на расстояниях 0, 210, 354, 498, 642, 786, 930 и 1074 мм от начала сборки. Их стенки имели толщину 0,65 мм. Предполагалось равномерное поле расходов газа в приосевых и периферийных каналах дистанционирующих решеток за счет одинакового гидравлического диаметра всех каналов: $d_{экв3} = d_{экв4} = d_h = 3,03$ мм (рис. 1b). Гидравлический диаметр всех каналов вне дистанционирующих решеток также был одинаков: $d_{экв1} = d_{экв2} = D_h = 6,22$ мм (рис. 1b).

Измерение распределения температуры стенки по длине нагреваемых центральной и одной из периферийных труб производилось с помощью подвижных термопарных зондов с четырьмя медь-константовыми термопарами с точностью измерения 0,2 К. Расположение термопар по отношению к соседним нагреваемым трубам показано на рис. 2. Участок размещался в замкнутом газовом контуре, в котором циркуляция газа обеспечивалась компрессором.

2. Результаты и обсуждение

На рис. 3 приведены результаты измерения температуры стенки центральной (линия 1) и периферийной (линия 2) труб при течении воздуха для числа $Re = 10280$. Штрихпунктирная линия показывает изменение температуры газа от входа в рабочий

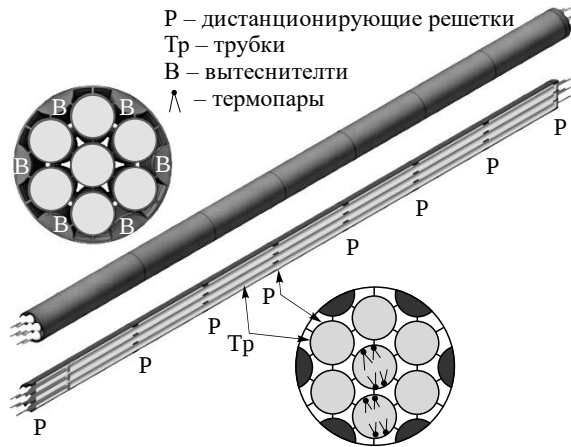


Рис. 2. Модель рабочего участка и схема расположения дистанционирующих решеток и измерительных термопар.

участок к его выходу. Вертикальными линиями обозначено положение дистанционирующих решеток. Наблюдается периодический рост температуры стенки трубы при приближении к дистанционирующей решетке и снижение температуры за ней. Такое поведение температуры стенки объясняется тем, что проходное сечение каналов в дистанционирующей решетке в ~ 2 раза меньше, чем проходное сечение межтрубного канала. В потоке газа формируются области торможения перед решеткой и области существенного ускорения внутри решетки с формированием отрывной зоны за ней.

По полученным данным о распределении температуры при известной плотности теплового потока на стенках трубок построены распределения безразмерных коэффициентов теплоотдачи по длине пучка для различных чисел Рейнольдса, которые приведены на рис. 4. Числа Рейнольдса определялись как $Re = GD_h / A\mu$, здесь G — массовый расход газа, A , D_h — площадь сечения и гидравлический диаметр межтрубного пространства, определяемый по зависимости $D_h = 4A/P$, где P — смачиваемый периметр всей теплообделяющей сборки, μ — динамическая вязкость газа. Погрешность определения числа Рейнольдса, напрямую зависящая от погрешности измерения массового расхода газа, составила 6 %. Локальный коэффициент теплообмена, выраженный в виде числа Нуссельта,

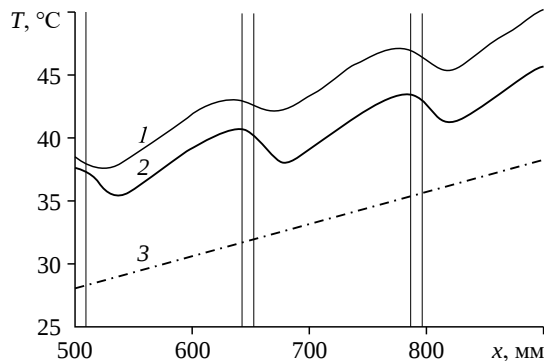


Рис. 3. Распределение температуры стенок центральной и периферийной труб и газа по длине сборки при $Re = 10280$.

1 — центральный стержень, 2 — периферийный стержень, 3 — температура газовой смеси.

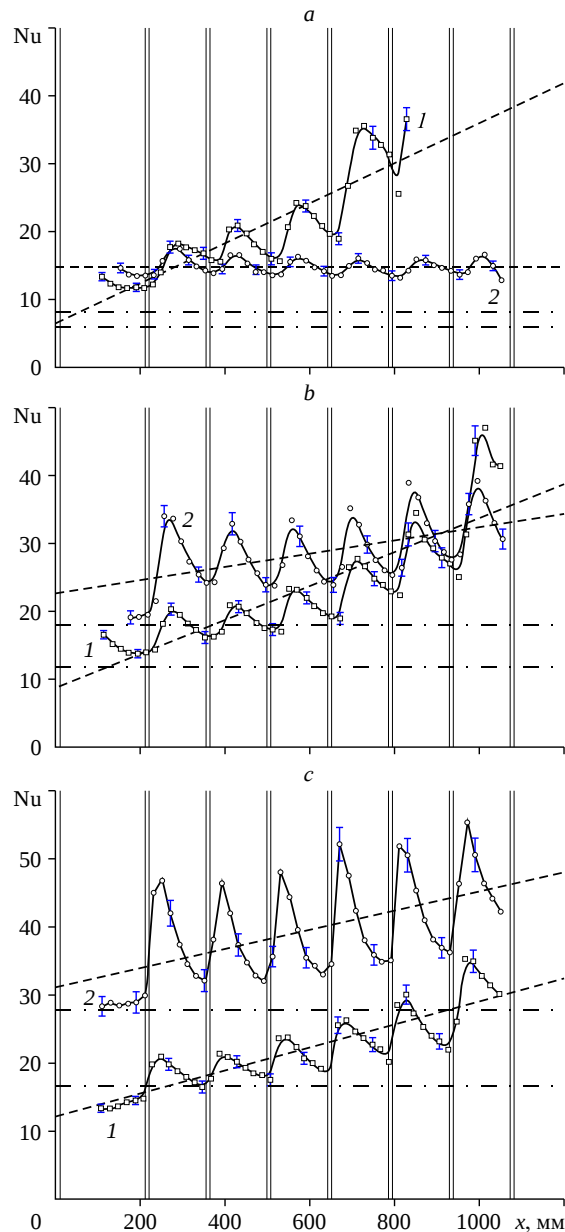


Рис. 4. Распределение числа Нуссельта по длине стержневой сборки при течении
He-Xe-смеси газов ($Pr = 0,23$) и воздуха ($Pr = 0,7$).
1 — гелий-ксенон, 2 — воздух.

рассчитывался как $Nu = \alpha D_h / \lambda$, здесь λ — коэффициент теплопроводности теплоносителя. Значения коэффициентов динамической вязкости и теплопроводности определялись по методике, изложенной в работе [5]. Коэффициент теплообмена α записывался в виде: $\alpha = Q / [S(T_w - T_g)]$, здесь Q — выделяемое на трубах тепло, определенное как $Q = U \cdot I$, где U — напряжение, I — сила тока, S — открытая поверхность нагреваемых труб. Погрешность измерения теплового потока составила 9 %. Суммарная погрешность определения коэффициента теплообмена и, соответственно, числа Нуссельта составила 9,2 %.

Температура стенки T_w определялась как средневзвешенная температура центральной и шести периферийных труб из соотношения: $T_w = (T_{c,w} + 6T_{p,w})/7$, где $T_{c,w}$, $T_{p,w}$ — локальные температуры стенки центральной и периферийной труб. Средняя температура газа T_g в каждом сечении по длине сборки находилась из линейной интерполяции температуры газа от входа к выходу.

Непрерывными линиями на рис. 4 показаны распределения локального числа Нуссельта по длине сборки при течении смеси газов He-Xe (линия 1) и при течении воздуха (линия 2). Штриховыми линиями отмечено изменение среднего значения числа Нуссельта от входа к выходу. Штрихпунктирные линии соответствуют значениям числа Нуссельта при турбулентном течении теплоносителя в каналах без дистанционирующих решеток, полученным из соотношения $Nu = CRe^{0,8}Pr^{0,4}$ [4], здесь $C = 0,02\{1 - \exp[-10,4(s - 1) - 0,1\varepsilon^{0,5}] + 0,96(s - 1)\}$, где s — отношение расстояния между центрами соседних труб к диаметру, ε — параметр теплового моделирования.

Изменение числа Нуссельта по длине сборки показано на рис. 4 для трех соизмеримых значений чисел Рейнольдса при течении гелий-ксеноновой смеси и воздуха, а именно: $Re = 2690$ при течении He-Xe-смеси и $Re = 2218$ при течении воздуха (соответственно 1 и 2 на рис. 4a); $Re = 6217$ при течении смеси He-Xe и $Re = 6055$ при течении воздуха (соответственно 1 и 2 на рис. 4b); $Re = 9490$ при течении смеси He-Xe и $Re = 10280$ при течении воздуха (соответственно 1 и 2 на рис. 4c).

В пространстве между решетками наблюдается периодическое повышение и понижение числа Нуссельта. Наличие дистанционирующих решеток приводит к периодическому разрушению гидродинамических и тепловых пограничных слоев. Опыты показали наличие большей тепловой инерции гелий-ксенонового теплоносителя по сравнению с воздухом. Динамический пограничный слой, разрушающийся при преодолении препятствия, для данного теплоносителя утоплен в тепловом пограничном слое и, как следствие, оказывает меньшее влияние на температурное поле возле стенки. Для воздуха разрушение динамического пограничного слоя сопровождается аналогичным разрушением и теплового пограничного слоя, а температурное поле фактически «отслеживает» динамику потока. Этим же объясняется увеличение темпа роста числа Нуссельта по длине рабочего участка при увеличении числа Рейнольдса в случае течения воздуха и обратное поведение при течении гелий-ксеноновой смеси.

Увеличение среднего коэффициента теплообмена в $\sim 1,5$ раза по сравнению с каналом, образованным пучком труб без решеток, объясняется тем, что решетки, обеспечивающие фиксацию нагреваемых труб в сборке, приводят к периодическому разрушению гидродинамических и тепловых пограничных слоев и ограниченному росту пограничного слоя в канале с образованием вихревых структур за решеткой, на что обращалось внимание в работе [6].

Выводы

Экспериментально исследован теплообмен при течении гелий-ксеноновой смеси с малым числом Прандтля и воздуха в пространстве, образованном семистержневым пучком нагреваемых труб. Проведен анализ влияния фиксирующих нагреваемые трубы решеток на распределение температуры поверхности как центральной, так и периферийных труб. Показано, что периодическое разрушение и рост гидродинамических и тепловых пограничных слоев, а также отрыв потока и формирование вихря за дистанционирующей решеткой приводят к интенсификации теплопередачи.

Список литературы

1. Hou J., Zhou Y., Huang S. Conjugate heat transfer analysis of helium–xenon gas mixture in tight rod bundles // Applied Thermal Engng. 2024. Vol. 252. P. 123661-1–123661-17.
2. Ning K., Tan S., Wang S., Li Z., Lu R., Shen H., Zhao F. Numerical investigation of flow stratification and heat transfer characteristics in a strongly heated horizontal rod bundles with helium-xenon gas mixture // Intern. J. Heat Mass Transfer. 2024. Vol. 221. P. 125146-1–125146-18.
3. El-Genk M.S., Tournier J.-M. On the use of noble gases and binary mixtures as reactor coolants and CBC working fluids // Energy Conversion and Management. 2008. Vol. 49. P. 1882–1891.
4. Петухов Б.С., Генин Л.Г., Ковалев С.А., Соловьев С.Л. Теплообмен в ядерных энергетических установках: Учебное пособие для вузов. М.: Изд-во МЭИ, 2003. 548 с.
5. Terekhov V.I., Yarygina N.I., Zhdanov R.F. Heat transfer in turbulent separated flows in the presence of high free-stream turbulence // Intern. J. Heat Mass Transfer. 2003. Vol. 46. P. 4535–4551.
6. Tournier J.-M.P., El-Genk M.S. Properties of noble gases and binary mixtures for closed Brayton Cycle applications // Energy Conversion and Management. 2008. Vol. 49. P. 469–492.

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