

УДК 536.24

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕНА СМЕСИ He–Xe В НАГРЕВАЕМЫХ КАНАЛАХ С РАЗЛИЧНОЙ ФОРМОЙ СЕЧЕНИЯ

В. Е. Накоряков, О. В. Витовский

Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН, 630090 Новосибирск, Россия
E-mails: nakve@itp.nsc.ru, vitovsky@itp.nsc.ru

Приводятся результаты экспериментального исследования теплообмена в случае течения гелий-ксеноновой смеси с числом Прандтля, приближенно равным 0,23, а также течений чистого гелия и воздуха в нагреваемых трубках круглого или треугольного сечения при постоянной плотности теплового потока. Исследован участок тепловой стабилизации. Проведено сравнение закона теплообмена на стабилизированном участке с известными соотношениями. Разработан подход, позволяющий получить формулу для расчета теплообмена в теплообменниках с круглым или треугольным поперечным сечением, работающих в режиме нагрева смеси на начальном участке.

Ключевые слова: теплообмен, гелий-ксеноновая смесь, число Прандтля, участок тепловой и гидродинамической стабилизации, тепловой поток.

DOI: 10.15372/PMTF20170410

Введение. Актуальность экспериментального изучения теплообмена в гелий-ксеноновых (He–Xe) смесях как в цилиндрических нагреваемых каналах, так и в каналах более сложной формы обусловлена тем, что эти смеси рассматриваются в качестве перспективных теплоносителей в энергетических установках, поскольку обладают уникальными характеристиками, в частности малым числом Прандтля ($Pr = 0,2$). В этом случае подобие полей скоростей и температур нарушается, что не позволяет рекомендовать для расчета течений гелий-ксеноновых смесей в каналах имеющиеся зависимости без соответствующей экспериментальной проверки. В ряде работ проведен анализ большого количества расчетных и экспериментальных исследований чистых инертных газов и их бинарных смесей и предложены различные формулы для расчета теплоотдачи в круглых трубках при различных режимах течения бинарной газовой смеси, в том числе с закруткой потока [1, 2]. Актуальность и практическая значимость проблемы точности расчета коэффициентов теплоотдачи для бинарной газовой смеси в диапазоне чисел Прандтля $Pr = 0,1 \div 0,7$ отмечены в [3]. В работе [4] проведено исследование теплообмена в течениях газовых смесей, в том числе гелий-ксеноновых, с малым числом Прандтля в круглой трубке при наличии вынужденной конвекции. Полученные результаты сравнивались с формулами Диттуса — Белтера, Колберна, Кейса, Петухова — Попова, Слейчера — Роуза и Гнелински.

В данной работе приведены результаты экспериментального исследования теплообмена в круглой трубке и трубке треугольного сечения при постоянной плотности теплового

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (код проекта 14-19-00352).

© Накоряков В. Е., Витовский О. В., 2017

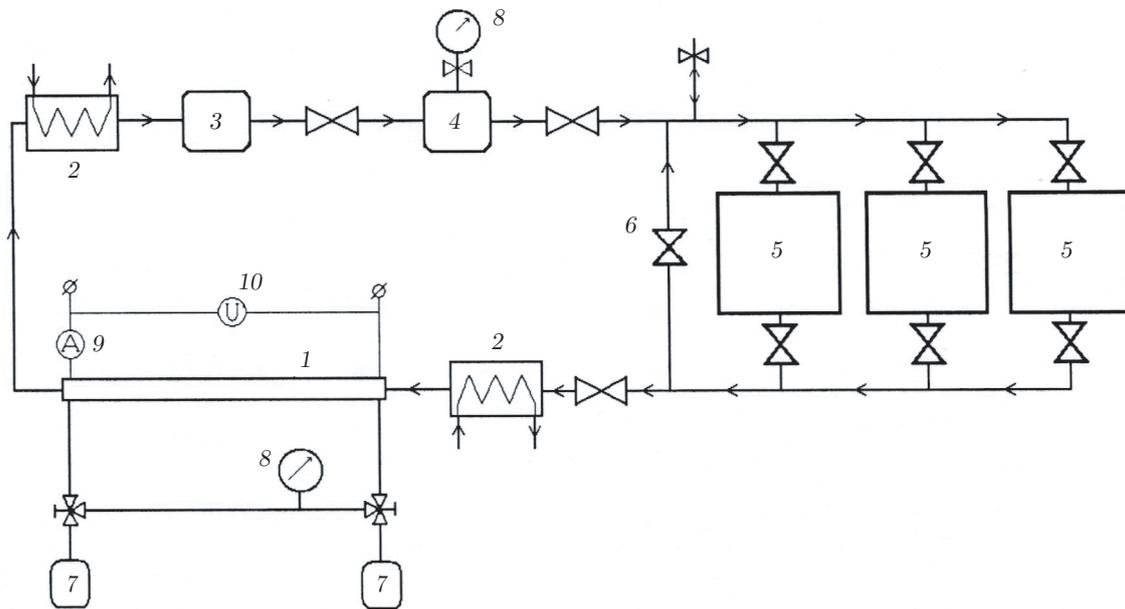


Рис. 1. Схема стенда:

1 — рабочий участок, 2 — теплообменники, охлаждаемые проточной водой, 3 — регулятор массового расхода газа Bronkhorst EL-FLOW, 4 — газовый счетчик Рабо, 5 — мембранные компрессоры R-Meco, 6 — байпасная линия, 7 — сапфировые датчики давления, 8 — образцовые манометры класса точности 0,15, 9 — амперметр, 10 — вольтметр переменного напряжения

потока гелий-ксеноновой смеси с массовой долей гелия $K_{\text{He}} \approx 7\%$ и числом Прандтля $Pr \approx 0,23$, а также чистого гелия и воздуха с числами Прандтля $Pr = 0,68$ и $Pr = 0,73$ соответственно.

Экспериментальное оборудование. Исследование закономерностей течения и теплообмена газов и газовых смесей в протяженных каналах различной формы проведено на экспериментальном стенде, схема которого показана на рис. 1. Основными элементами стенда являются блок мембранных компрессоров R-Meco 720, обеспечивающих циркуляцию газовой среды в герметичном контуре; рабочий участок (сменный элемент), предназначенный для экспериментального определения коэффициентов теплоотдачи в каналах различной формы; водяной охладитель для отвода тепла от газов и газовых смесей; фильтр для защиты компрессора и измерительного оборудования от воздействия механических частиц; ресивер для гашения пульсаций компримированной газовой среды; ресивер для удаления из контура газовой среды в период замены рабочего участка или его модификации; электронагреватель газовой среды в каналах, обеспечивающий постоянный тепловой поток ($q = \text{const}$).

Для измерения характеристик потока используются образцовые манометры класса точности 0,15 и индивидуально градуированные хромель-алюмелевые и медь-константановые термомпары. Для регулирования массового расхода потока газа на рабочем участке в требуемом по условиям опытов диапазоне чисел Рейнольдса использован регулятор расхода Bronkhorst EL-FLOW. В составе оборудования стенда предусмотрены также устройство для подготовки газовой смеси с необходимой массовой долей и анализа ее состава с помощью газового хроматографа, приборы для контроля степени разрежения и герметичности в элементах экспериментальной установки, контрольно-измерительные приборы, система проточного водяного охлаждения газовой среды. Рабочие участки с

круглой и треугольной формами сечения изготавливались из тонкостенных гладких трубок из нержавеющей стали, никеля и нихрома с внешним диаметром $5 \div 6$ мм и толщиной стенки $0,15 \div 0,30$ мм. Рабочая длина нагреваемого канала L составляла $450 \div 800$ мм. Нагрев трубки осуществлялся путем пропускания через нее переменного электрического тока. Для предотвращения утечек тепла через торцевые фланцевые соединения использовался охранный нагреватель. На поверхности трубок с круглым и треугольным сечениями методом контактной сварки были закреплены спаи медь-константановых термопар, которые измеряли локальные значения температуры стенки трубки. Количество термопар для различных трубок составляло от 6 до 9 шт. Хромель-алюмелевые термопары с изолированным спаем на входе и выходе рабочего участка располагались в потоке газа и фиксировали соответственно температуры входящего и выходящего потоков газа.

Теплообмен в гелий-ксеноновой смеси в трубках круглого и треугольного сечений. Измерения коэффициентов теплоотдачи для течений гелий-ксеноновой смеси в круглом канале и канале с сечением треугольной формы были выполнены при массовой доле гелия $K_{\text{He}} = 5,0 \div 10,5$ %, что соответствовало молярной доле гелия в смеси $63 \div 80$ %. Диапазон чисел Рейнольдса составлял $2 \cdot 10^3 \div 8 \cdot 10^4$. Значения числа Прандтля менялись в диапазоне $\text{Pr} = 0,20 \div 0,23$ при давлении на выходе из канала $P \approx 1,1 \cdot 10^5$ Па и $P \approx 4,5 \cdot 10^5$ Па.

На рис. 2 приведены распределения измеренной температуры стенки цилиндрического канала и температуры ядра потока смеси He–Xe в нагреваемом круглом канале при давлении на выходе из канала $P \approx 4,5 \cdot 10^5$ Па, а также распределение среднемассовой температуры газового потока, вычисленной по соотношению теплового баланса. Видно, что на начальном участке канала температура стенки увеличивается по нелинейному закону, а затем — по закону, близкому к линейному, что характерно для задачи с постоянным потоком тепла ($q = \text{const}$). Измерения температуры ядра потока с помощью термопарного зонда выполнены вдоль осевой линии канала с шагом 5 мм. Представленные данные показывают, что в распределении температуры ядра потока имеется три зоны. В зоне I температура не меняется и равна температуре газа на входе, поскольку температурные пограничные слои не сомкнулись. В зоне II наблюдается квадратичная зависимость тем-

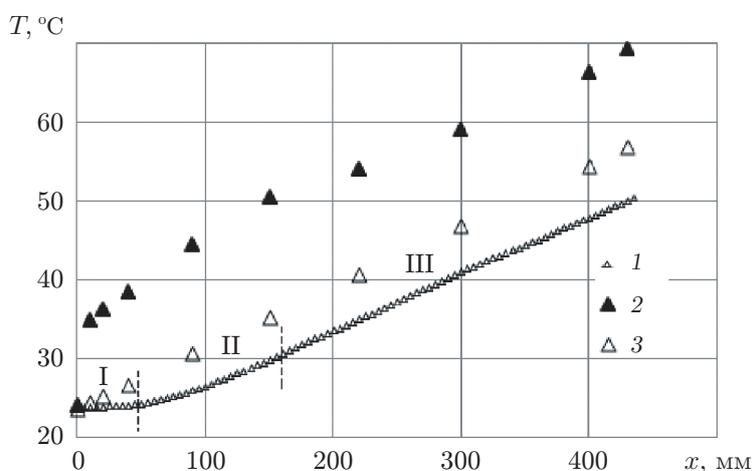


Рис. 2. Распределения температуры ядра потока (1), температуры стенки (2) и среднемассовой температуры газовой смеси (3) по длине канала для течения смеси He–Xe ($K_{\text{He}} = 7,2$ %) в нагреваемом круглом канале при $\text{Re} = 12\,800$: I–III — зоны с различными законами изменения температуры

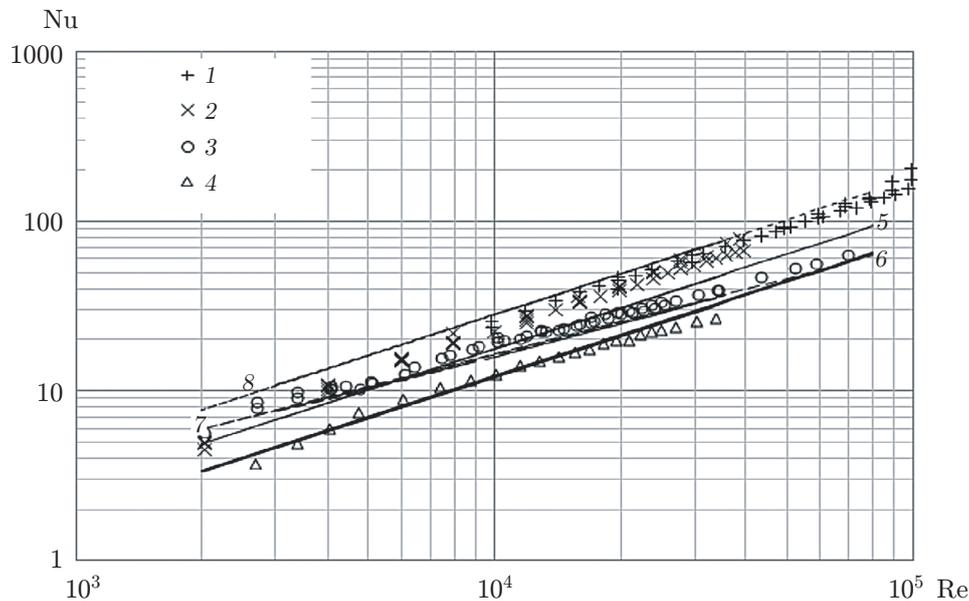


Рис. 3. Зависимость числа Нуссельта от числа Рейнольдса для течений воздуха (1), гелия (2, 8) и гелий-ксеноновой смеси ($K_{\text{He}} = 7,2\%$) (3–7) в нагрываемых каналах на участке установившегося течения:

1–3 — канал с круглым сечением, 4 — канал с треугольным сечением, 5–7 — $\text{Pr} = 0,23$ (5 — расчет по соотношению Михеева, 6 — расчет по соотношению Тетельбаума, 7 — расчет по соотношению Петухова), 8 — $\text{Pr} = 0,68$ (расчет по соотношению Михеева)

пературы от координаты, что обусловлено турбулизацией теплового пограничного слоя, отрывом тепловых вихрей и их взаимодействием. В зоне III температура ядра потока изменяется вдоль канала по линейному закону, что характерно для развитого течения, в котором тепловые слои сомкнулись. Таким образом, при течении смеси He–Xe в цилиндрическом канале длина участка тепловой стабилизации достигает половины длины канала и зависит от числа Рейнольдса.

На рис. 3 приведена зависимость числа Нуссельта Nu от числа Рейнольдса Re , полученная для участков установившегося течения в каналах с круглым и треугольным сечениями. Коэффициент теплоотдачи определялся через осредненную на стабилизированном участке среднемассовую температуру потока гелий-ксеноновой смеси, вычисленную из соотношения теплового баланса. На рис. 3 приведены также зависимости, полученные для течения в канале с круглым сечением воздуха и гелия с числами Прандтля $\text{Pr} = 0,73$ и $\text{Pr} = 0,68$ соответственно.

Полученные таким образом зависимости числа Нуссельта от числа Рейнольдса корректно сравнивать с известными соотношениями Михеева ($Nu = 0,022 Re_d^{0,8} \text{Pr}^{0,43}$), Тетельбаума ($Nu = 0,022 Re_d^{0,8} \text{Pr}^k$, $k = 0,595 \text{Pr}^{-0,126}$), Петухова ($Nu = Re \text{Pr} (\xi/8) / (1,07 + 12,7(\text{Pr}^{0,666} - 1)(\xi/8)^{0,5})$), где ξ — коэффициент сопротивления) и др. [2], поскольку эти соотношения получены для длинных каналов, в которых наличие участков тепловой и гидродинамической стабилизации не оказывало существенного влияния на распределение температуры. Видно, что зависимость, полученная для гелий-ксеноновой смеси на участке канала с круглым сечением, где наблюдается установившееся течение, достаточно хорошо коррелирует с зависимостью Петухова — Попова, в то время как для канала треугольного сечения зависимость числа Нуссельта от числа Рейнольдса близка к соотношению Тетельбаума, приведенному в работе [2]. Уменьшение скорости теплообмена в канале тре-

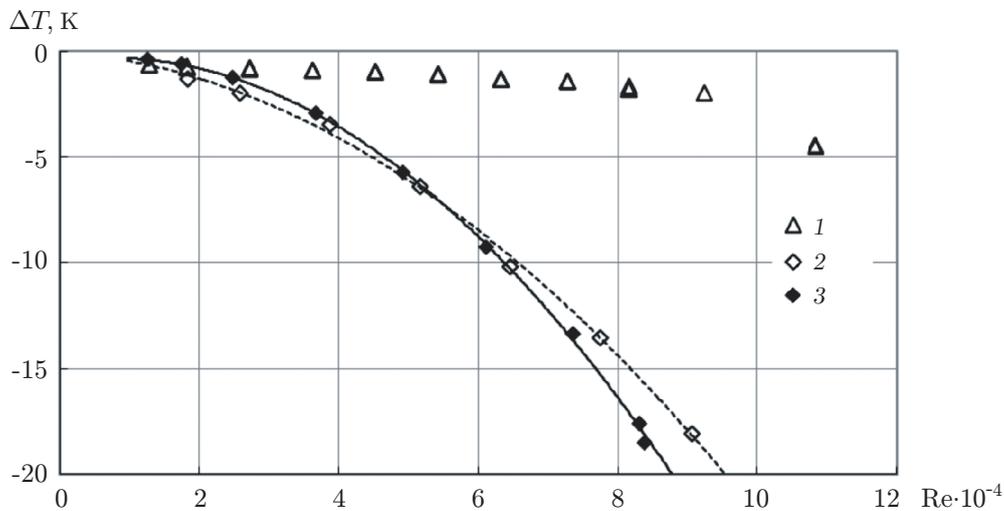


Рис. 4. Зависимость степени охлаждения потока от числа Рейнольдса для адиабатического течения в круглой трубке воздуха (1) и гелий-ксеноновой смеси с массовой долей гелия $K_{\text{He}} = 5,15\%$ (2) и $K_{\text{He}} = 7,45\%$ (3):

точки — эксперимент, линии — аппроксимации полиномами второй степени (штриховая — $\Delta T = -2 \cdot 10^{-9} \text{Re}^2 - 2 \cdot 10^{-5} \text{Re} - 0,0124$, сплошная — $\Delta T = -3 \cdot 10^{-9} \text{Re}^2 + 4 \cdot 10^{-5} \text{Re} - 0,4467$)

угольного сечения по сравнению со скоростью в канале с круглым сечением объясняется наличием застойных зон вблизи углов канала треугольного сечения.

В экспериментах, проведенных при давлении на выходе из канала $P \approx 1,1 \cdot 10^5$ Па, в отличие от опытов, проведенных при $P \approx 4,5 \cdot 10^5$ Па, когда сжимаемостью газа можно пренебречь, происходит значительное уменьшение плотности газа в направлении от входного сечения к выходному в случае течения газа при больших числах Рейнольдса. Адиабатическое расширение газа в случае течения в канале с большим градиентом давления приводит к охлаждению потока. На рис. 4 приведена зависимость степени охлаждения газового потока $\Delta T = T_{\text{out}} - T_{\text{in}}$ от числа Рейнольдса в случае адиабатического течения воздуха и смеси гелия и ксенона в круглой трубке с внутренним диаметром, равным 5,5 мм. Видно, что охлаждение гелий-ксеноновой смеси происходит более интенсивно по сравнению с охлаждением воздуха и увеличение массовой доли гелия с 5 до 7,5 % приводит к незначительному изменению скорости охлаждения. В экспериментах обнаружено, что для гелий-ксеноновой смеси значительные потери давления в канале с малой площадью поперечного сечения приводят к уменьшению температуры потока вдоль канала при адиабатических условиях, достигающему 18 К при $\text{Re} > 80\,000$. Таким образом, для течения с ускорением газового потока в трубке среднемассовая температура газа не может быть корректно определена из соотношений теплового баланса. В случае течения с ускорением потока изменяется структура гидродинамического пограничного слоя. Поскольку толщина пограничного слоя $\delta \sim V^{-1/2}$ (V — скорость потока на осевой линии), при больших числах Рейнольдса длина начального участка стабилизации течения (смыкания пограничных слоев) значительно увеличивается, становясь соизмеримой с длиной канала. Поэтому для смесей газов с малыми значениями числа Прандтля, например для смеси гелия и ксенона с $\text{Pr} \approx 0,2$, теплообмен в каналах может происходить в режиме гидродинамически не установившегося течения. В этом случае для каналов малой длины ($L = 450$ мм) с сечениями круглой и треугольной формы необходимо представить результаты опытов в безразмерной форме с использованием критериев $\text{Nu} = \alpha L / \lambda$, $\text{Re} = VL / \nu$, $\text{Pr} = \nu / a$.

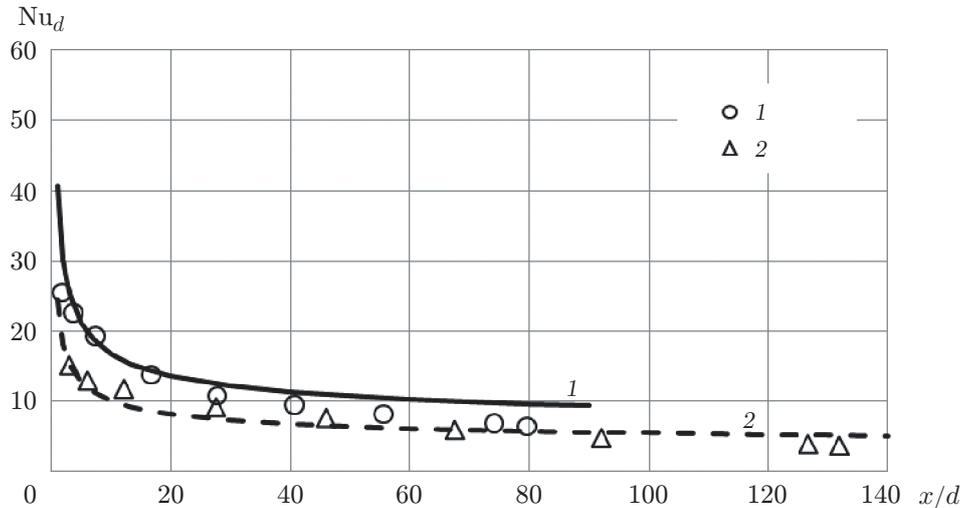


Рис. 5. Распределение числа Нуссельта по длине каналов с круглым (1) и треугольным (2) сечениями для течения гелий-ксеноновой смеси при $Re = 12\,800$: точки — эксперимент, линии — расчет по формуле (1)

В дальнейшем в качестве характерного линейного размера используется гидравлический диаметр d или расстояние от входа x . Кинематическая вязкость ν и температуропроводность a определялись по расчетным зависимостям, предложенным в работе [1], с использованием справочных данных [5]. Коэффициент теплоотдачи α определялся как отношение теплового потока q к разности температур стенки T_w и смеси газов на входе в канал T_{in} . При обработке результатов экспериментов, в которых при малых числах Рейнольдса на начальном участке канала формируется ламинарный пограничный слой, а при больших числах Рейнольдса — турбулентный пограничный слой, следует использовать формулу

$$Nu_x = K_f \sqrt{(1,42 Nu_{x,l})^2 + (1,07 Nu_{x,t})^2}. \quad (1)$$

Зависимость (1) целесообразно построить для чисел Нуссельта, определенных по диаметру канала: $Nu_d = \alpha d / \lambda = Nu_x d / x$. На рис. 5 показано распределение числа Нуссельта по длине каналов с круглым и треугольным сечениями при $Re = 12\,800$, полученное в экспериментах с гелий-ксеноновой смесью при $K_{He} = 7,2\%$. Линиями на рис. 5 показана зависимость, построенная по формуле (1) для условий экспериментов. В выражении (1) в качестве $Nu_{x,l}$ используется зависимость $Nu_{x,l} = 0,332 Pr^{0,33} Re_x^{0,5}$ для случая обтекания пластины ламинарным потоком, а в качестве $Nu_{x,t}$ — зависимость $Nu_{x,t} = 5 + 0,012 Re_x^{0,83} (Pr + 0,29) (T_w / T_{in})^n$, $n = -\log(T_w / T_{in})^{0,25} + 0,3$ для турбулентного потока, полученная на основе корреляции Ноттера — Слейчера [6] и модифицированная С. А. Слейчером и М. Ф. Роузом [7]. Эти зависимости получены в экспериментах с постоянной температурой стенки. Введение фактора формы канала K_f обусловлено тем, что в канале треугольного сечения, в отличие от круглого канала, вблизи углов имеются застойные зоны, в которых скорость теплообмена уменьшается. Поэтому в первом приближении принимается, что плотность теплового потока в канале треугольной формы меньше во столько раз, во сколько площадь боковой поверхности цилиндрического канала с диаметром, равным гидравлическому диаметру канала треугольной формы, меньше площади боковой поверхности канала треугольной формы.

Заключение. В работе исследован теплообмен в случае течения гелий-ксеноновой смеси ($Pr \approx 0,23$), а также течений чистого гелия и воздуха в нагреваемых трубках круглого или треугольного сечения при постоянной плотности теплового потока. Показано,

что в случае течения смеси He–Xe в цилиндрическом канале длина участка тепловой стабилизации достигает половины длины канала. Проведено сравнение закона теплообмена на стабилизированном участке с известными соотношениями и показано, что уменьшение скорости теплообмена в канале треугольного сечения по сравнению с каналом круглого сечения обусловлено наличием застойных зон вблизи углов треугольного канала. Для каналов небольшой длины в условиях гидродинамически не установившегося течения, когда теплообменник работает в режиме нагрева на начальном участке, разработан подход, позволяющий получить формулу для расчета теплообмена в канале как с круглым, так и с треугольным поперечным сечением.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Tournier J.-M., El-Genk M. S.** Properties of noble gases and binary mixtures for closed Brayton cycle applications // Energy Conversion Management. 2008. V. 49. P. 1882–1891.
2. **Dragunov Yu. G., Smetannikov V. P., Gabaraev B. A., et al.** On the choice of correlations for calculating the heat transfer coefficient in binary gas mixture // J. Engng Thermophys. 2013. V. 22. P. 30–42.
3. **Pierce B. L.** The influence of recent heat transfer data on gas mixtures on closed cycle gas turbines // Trans. ASME. Ser. A. J. Engng Power. 1981. V. 103. P. 114–117.
4. **Taylor M. F., Bauer K. E., McEligot D. M.** Internal forced convection to low-Prandtl-number gas mixture // Intern. J. Heat Mass Transfer. 1988. V. 31, N 1. P. 13–25.
5. **Бабичев А. П.** Физические величины: Справ. / А. П. Бабичев, Н. А. Бабушкина, А. М. Братковский и др. М.: Энергоатомиздат, 1991.
6. **Notter R. H., Sleicher C. A.** A solution to the turbulent Graetz problem. 3. Fully developed and entry region heat transfer rates // Chem. Engng Sci. 1972. V. 27. P. 2073–2093.
7. **Sleicher C. A., Rouse M. F.** A convenient correlation for heat transfer to constant and variable property fluids in turbulent pipe flow // Intern. J. Heat Mass Transfer. 1975. V. 18. P. 677–683.

*Поступила в редакцию 18/VIII 2016 г.,
в окончательном варианте — 24/VIII 2016 г.*
