

О. А. Володин¹, А. Н. Павленко¹, Н. И. Печеркин¹, В. С. Сердюков^{1,2}

¹ *Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН
пр. Акад. Лаврентьева, 1, Новосибирск, 630090, Россия*

² *Новосибирский государственный университет
ул. Пирогова, 2, Новосибирск, 630090, Россия*

volodin@ngs.ru; pavl@itp.nsc.ru; pecherkin@itp.nsc.ru; vsserd@gmail.com

ИСПАРЕНИЕ И КИПЕНИЕ ПЛЕНКИ БИНАРНОЙ СМЕСИ ФРЕОНОВ НА ВЕРТИКАЛЬНОМ ЦИЛИНДРЕ С СЕТЧАТЫМ ПОКРЫТИЕМ*

Представлены результаты экспериментального исследования теплообмена в стекающих по вертикальному цилиндру с сетчатым покрытием пленках жидкости в широком диапазоне изменения числа Рейнольдса (30–270). В качестве рабочих жидкостей использовалась смесь фреонов R21 и R114, а также чистый фреон R21. Выявлены особенности теплообмена при гравитационном стекании пленок жидкости по поверхности с сетчатым покрытием по сравнению с гладкой поверхностью. Показано, что коэффициенты теплоотдачи в режиме испарения на поверхности с сетчатым покрытием лежат несколько выше, а режим кипения развивается раньше, чем на гладкой поверхности. Влияние начального состава смеси при испарении и кипении бинарной смеси фреонов с близкими температурами насыщения на коэффициент теплоотдачи незначительно.

Ключевые слова: пленки жидкости, теплообмен, испарение, пузырьковое кипение, сетчатые покрытия, фреоны, бинарные смеси.

Введение

Пленочные течения жидкости широко используются в различных технологических процессах (абсорбция, ректификация, выпаривание, тепловая защита, охлаждение и др.). Исследования гидродинамики и теплообмена в стекающих пленках жидкости при различных законах тепловыделения интенсивно развиваются [1–4]. Появляются все новые любопытные работы, как, например, [5], где впервые изучались процессы тепломассобмена при испарении и кипении стекающих пленок взвеси микроскопических зеленых водорослей, растворенных в воде. Обезвоживание такой взвеси с помо-

щью процесса пленочного испарения может стать одним из перспективных способов получения биотоплива. Нельзя также не отметить вызывающие в последние годы большой интерес исследования кипения на поверхностях с нанорельефом, способствующим увеличению количества центров парообразования и частоты отрыва пузырьков по сравнению с гладкими поверхностями [6; 7], результаты которых рано или поздно найдут применение для приложений с использованием пленочных течений.

В то же время для пленочных течений нет широко используемых и внедренных в промышленность текстурированных труб и поверхностей, предназначенных для ин-

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 13-08-00527) и Программы ОЭММПУ РАН Ш.18 (проект 2.4.4).

Володин О. А., Павленко А. Н., Печеркин Н. И., Сердюков В. С. Испарение и кипение пленки бинарной смеси фреонов на вертикальном цилиндре с сетчатым покрытием // *Вестн. Новосиб. гос. ун-та. Серия: Физика.* 2014. Т. 9, вып. 1. С. 70–78.

тенсификации тепломассобмена, как это имеет место в случае однофазных потоков, для процессов конденсации, кипения в большом объеме. Существует лишь ограниченное число работ (см., например, [8–11]), посвященных исследованию гидродинамики и теплообмена в стекающих по структурированным поверхностям пленках маловязких высокосмачивающих жидкостей (фреоны и их смеси, азот).

Использование в качестве рабочей жидкости фреонов и их смесей важно для моделирования теплообменных процессов в холодильной и теплонасосной технике, процессов абсорбции и дистилляции, поведения криогенных жидкостей. Применение сетчатых покрытий, увеличивающих эффективную площадь поверхности испаряющейся пленки и стабилизирующих течение, может способствовать интенсификации процесса тепломассопереноса при испарении пленок [12], а также более раннему переходу к режиму кипения. При необходимости такие покрытия могут быть внедрены в промышленное производство без больших затрат, зачастую являясь более доступным решением, чем структурированные поверхности схожей геометрии.

Методика эксперимента

Экспериментальный стенд для исследования процессов тепломассобмена при пленочном течении бинарной смеси фреонов представляет собой замкнутый циркуляционный контур, включающий в себя теплоизолированную колонну с оптическими окнами, бак постоянного уровня, рабочий участок, фреоновую емкость, насосы, манометр и расходомер. Схема и подробное описание экспериментальной установки приведены в [13; 14].

Течение пленок бинарных смесей фреонов R114/R21 с различной начальной концентрацией легкокипящего компонента R114 (C_x : 0–13 %) осуществлялось на вертикально ориентированных трубах из латуни ЛС59 диаметром 50 мм. Толщина стенки трубы 1,5 мм. Эксперименты проводились как на гладкой трубе, так и на трубе с покрытием, в качестве которого использовалась латунная сетка с размером ячейки $1,6 \times 1,6$ мм и диаметром проволоки 0,4 мм (рис. 1). Размер ячейки в свету составлял 1,2 мм. Выбранные ячейки и толщина про-

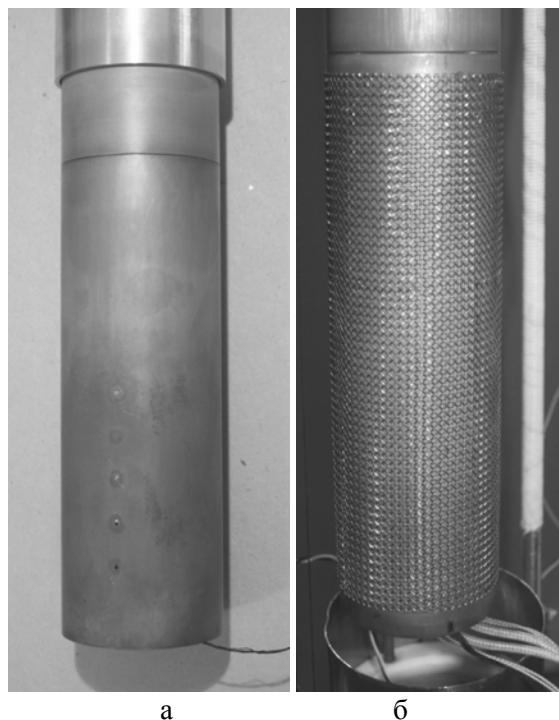


Рис. 1. Рабочий участок: а – гладкая труба; б – труба с сеткой

волоки близки к значениям постоянной Лапласа ($\Lambda = 1,1$ мм) и средней толщины Нуссельта пленки ($\delta_H = 0,1$ мм). Такие параметры структуры оказывают влияние на гидродинамику течения пленки и вследствие этого на интенсивность испарения жидкости, также сетчатое покрытие может создавать условия для более раннего закипания жидкости. Направление проволочек сетки составляло угол 45° к вертикали. К поверхности трубы проволочки сетки прилегают в местах пересечения друг с другом, образуя регулярно расположенные контактные точки. Размер распределительной щели составлял 100 мкм.

Для обогрева рабочего участка использовался нагревательный элемент длиной 70 мм. Верхняя граница зоны тепловыделения находилась на расстоянии 100 мм от щелевого распределителя жидкости, что обеспечивало течение пленки жидкости по тепловыделяющей поверхности в режиме гидродинамической стабилизации. Для измерения локальной температуры поверхности по высоте тепловыделяющего участка трубы были установлены пять медь-константановых термопар диаметром 0,08 мм, заделанные за-

подлицо с поверхностью трубы. Шаг между термопарами составлял 14 мм, расстояние между началом зоны тепловыделения и верхней термопарой – 7 мм. Холодные спаи термопар, погруженные в слой жидкости на дне колонны, находились при одинаковой температуре, которая определялась с помощью терморезистора HEL-700. Для теплоизоляции от дна колонны холодные спаи термопар и терморезистор были закреплены на фторопластовой подложке. Температура в различных участках рабочего объема экспериментальной колонны контролировалась с помощью платиновых терморезисторов. Температура жидкости измерялась в сосуде перед рабочим участком, в сборном стаканчике непосредственно после рабочего участка и в нижней части колонны. Температура паровой фазы измерялась в верхней, средней и нижней частях колонны. Абсолютное давление в колонне измерялось манометром Метран-100, расход жидкости – расходомером CORI-FLOW фирмы «Bronkhorst», позволяющим измерять массовый расход жидкости в диапазоне 0–100 кг/ч. Мольная концентрация компонентов бинарной смеси фреонов измерялась методом газовой хроматографии. Измерение состава смеси производилось до и после рабочего участка.

Визуализация и запись процесса кипения пленки жидкости, осуществлялась с помощью высокоскоростной цифровой видеокамеры Phantom 7.0 с частотой 1 000 кадров в секунду. Эксперименты проводились в стационарных условиях. Циркулирующая по замкнутому контуру бинарная смесь фреонов R21/R114 во время эксперимента находилась в условиях насыщения. Эксперименты проводились при давлении 2 бар. Число Рейнольдса $Re = Q / (\pi \cdot d \cdot \nu)$ на входе в рабочий участок изменялось от 30 до 270, где Q – объемный расход жидкости, m^3/c ; d – диаметр трубы, м; ν – кинематическая вязкость жидкости, m^2/c . Величина плотности теплового потока q во время эксперимента варьировалась от 0 до $7 \cdot 10^4$ Вт/ m^2 . Утечки тепла с торцов обогреваемого участка составляли не более 10 %.

Результаты и обсуждение

На рис. 2 показана зависимость коэффициента теплоотдачи от теплового потока для различных чисел Рейнольдса при течении

пленки по гладкой поверхности. При тепловых потоках $q \leq 1 \cdot 10^4$ Вт/ m^2 теплообмен осуществляется в режиме испарения по всей длине тепловыделяющего участка. В этом режиме коэффициент теплоотдачи практически не зависит от теплового потока. При увеличении теплового потока, как видно из рис. 2, режим испарения сменяется режимом пузырькового кипения. Сравнение данных, полученных для различной начальной концентрации R114, показывает, что в исследованном диапазоне изменения состава смеси веществ, имеющих близкие температуры кипения ($8,7^\circ C$ для R21 и $3,5^\circ C$ для R114, при атмосферном давлении), влияние концентрации летучего компонента на коэффициенты теплоотдачи в режиме испарения практически отсутствует. Это совпадает с ранее полученными авторами результатами [15] для диапазона изменения входной концентрации R114 от 4 до 15 % при стекании пленки по поверхности с горизонтальным оребрением. В режиме пузырькового кипения при числах Рейнольдса меньше 50 и больше 200 коэффициенты теплоотдачи при течении смеси R21/R114 незначительно превышают соответствующие значения для фреона R21. Во время эксперимента визуально также наблюдалось, что развитие кризиса при течении смеси R21/R114 по обогреваемой поверхности происходит при меньших величинах тепловых потоков, чем при течении чистой жидкости с более высокой температурой закипания (фреон R21).

Сравнение результатов измерения коэффициентов теплоотдачи на гладкой трубе и на трубе с сетчатым покрытием для разных чисел Рейнольдса показано на рис. 3. Как было отмечено выше, в экспериментах на гладкой трубе при тепловых потоках до $1 \cdot 10^4$ Вт/ m^2 коэффициенты теплоотдачи не зависят от величины теплового потока и теплосъем осуществляется испарением с поверхности пленки. Визуальные наблюдения и видеосъемка течения пленки на трубе с сеткой показали, что в этом случае пузырьковое кипение в нижней части рабочего участка начинается при меньших тепловых потоках в связи с более ранним, чем на гладкой поверхности, образованием паровых пузырей в местах контакта проволочек сетки со стенкой. Приведенные данные показывают, что характер зависимости коэффициента теплоотдачи от теплового потока меняется уже при достижении $0,7 \cdot 10^4$ Вт/ m^2 .

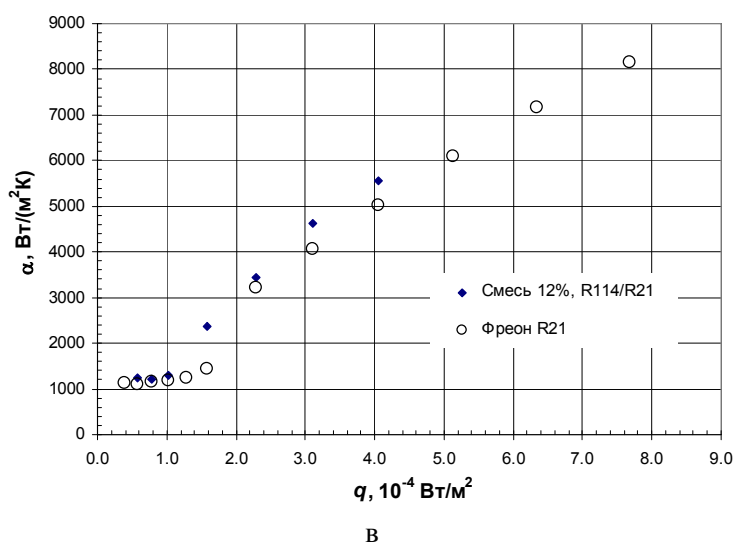
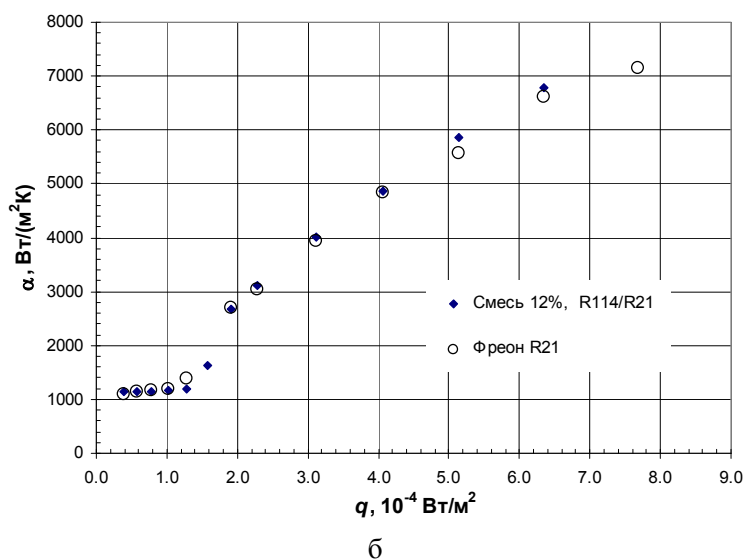
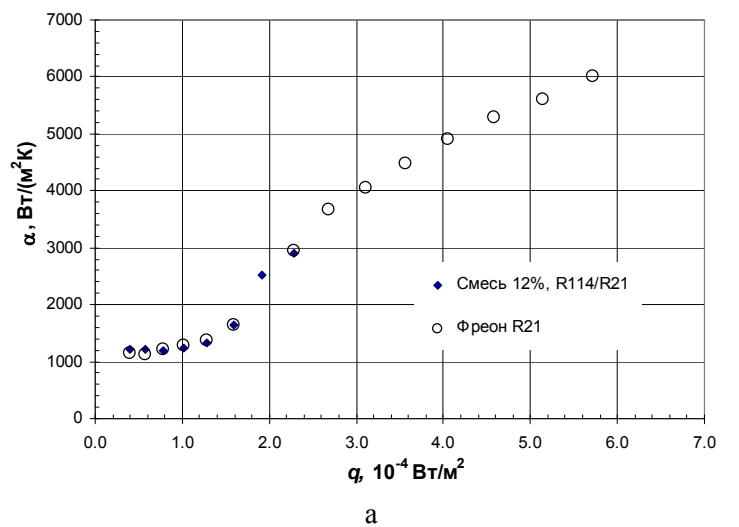
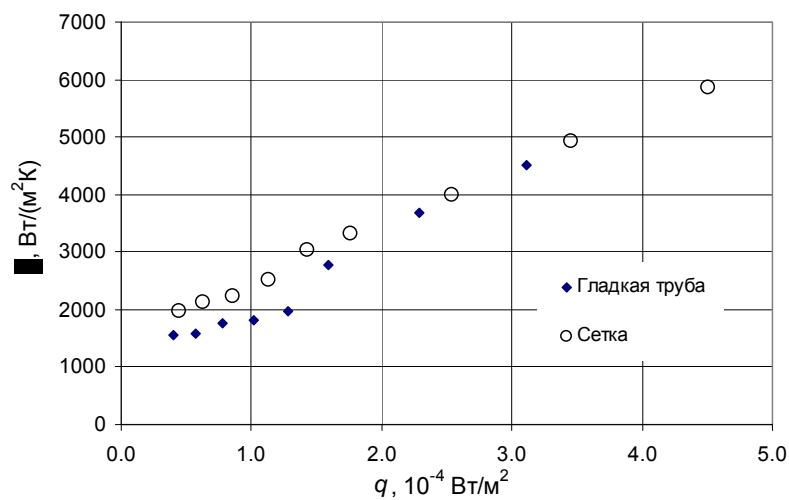
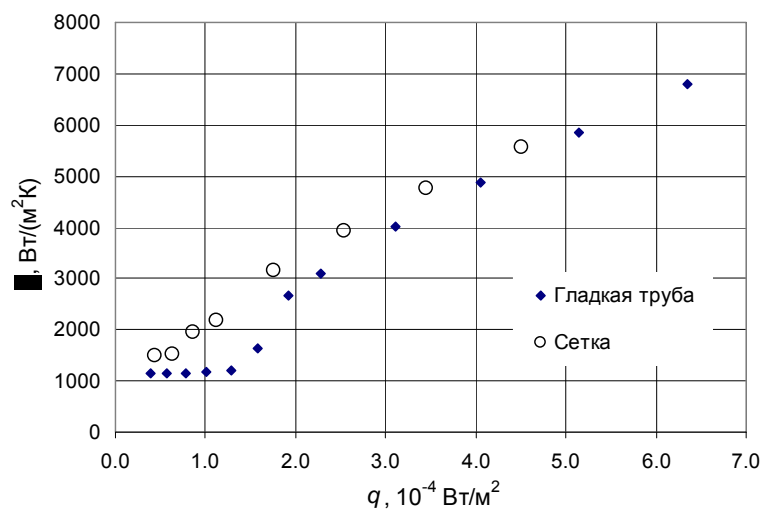


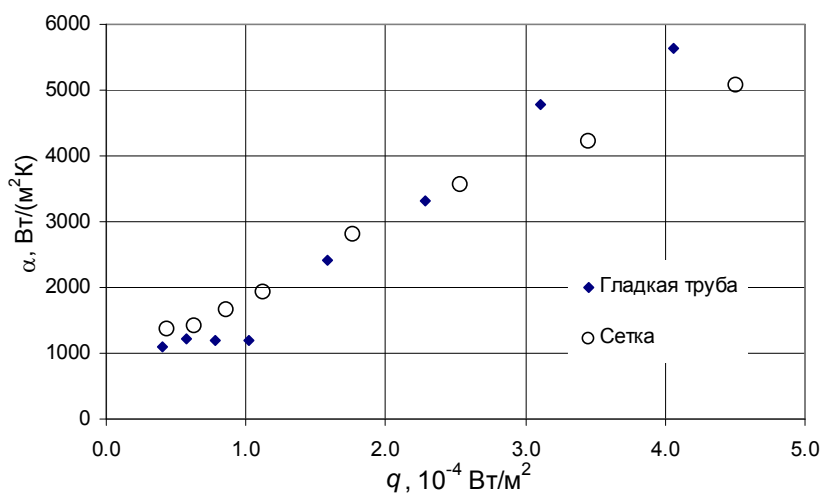
Рис. 2. Сравнение данных по теплоотдаче на чистом фреоне R21 и на смеси R21/R114.
 а – Re = 106; б – Re = 160; в – Re = 210



а



б



в

Рис. 3. Сравнение данных по теплоотдаче на гладкой трубе и на трубе с сетчатым покрытием, смесь фреонов R21/R114, $C_x = 13\%$: а – $\text{Re} = 53$; б – $\text{Re} = 160$; в – $\text{Re} = 250$

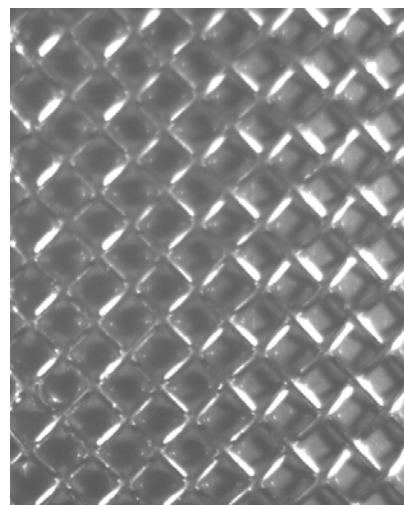
В режиме испарения и в области развития пузырькового кипения в стекающей пленке коэффициенты теплоотдачи на трубе с сетчатым покрытием лежат значительно выше, чем на гладкой трубе (до двух раз в области перехода к режиму кипения, см. рис. 3). В режиме пузырькового кипения в диапазоне чисел Рейнольдса 100–160 коэффициенты теплоотдачи на трубе с сетчатым покрытием также лежат выше, чем на гладкой трубе. Однако при увеличении числа Рейнольдса больше 200 коэффициенты теплоотдачи на трубе с сеткой несколько уменьшаются по сравнению с гладкой трубой. Уменьшение коэффициентов теплоотдачи при кипении пленки на структурированных поверхностях по сравнению с гладкой трубой отмечалось авторами ранее [13].

В качестве основной причины интенсификации теплообмена в режиме испарения на трубе с сетчатым покрытием можно указать увеличение поверхности испарения за счет вызванного капиллярными силами обтекания жидкостью проволочек сетки. При этом по всему периметру ячеек сетки образуются мениски с характерными областями утончения пленки, что в определенных условиях может приводить к существенному увеличению теплоотдачи. Дополнительный вклад в перенос тепла по сравнению с гладкой поверхностью может вносить также теплотеплопередача от стенки через контактные точки сетки. Оценка вклада этих процессов в интенсификацию теплообмена требует дальнейших исследований.

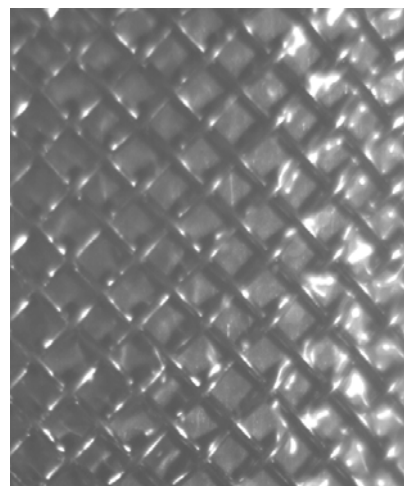
На рис. 4 показаны режимы течения пленки при малых тепловых потоках и различных плотностях орошения. При малых расходах жидкости в пленке вся жидкость просачивается между стенкой и сеткой, периодически изменяя направление течения в местах контакта проволоки со стенкой. Жидкость аккумулируется в менисках вокруг проволочек, внутри ячейки на стенке сохраняется тонкий слой жидкости, рис. 4а. При больших расходах жидкость перетекает через проволочки сетки, количество жидкости вокруг узлов сетки увеличивается, рис. 4б. Режим пузырькового кипения при больших тепловых потоках показан на рис. 5. Он характеризуется образованием скоплений пузырей большого размера, покрывающих практически всю поверхность трубы.

Влияние расхода жидкости на коэффициент теплоотдачи для гладкой трубы и по-

верхности с сетчатым покрытием показано на рис. 6. На этих рисунках число Рейнольдса



а



б

Рис. 4. Течение пленки жидкости по поверхности трубы с сеткой в режиме испарения: а – $Re = 30$; б – $Re = 260$

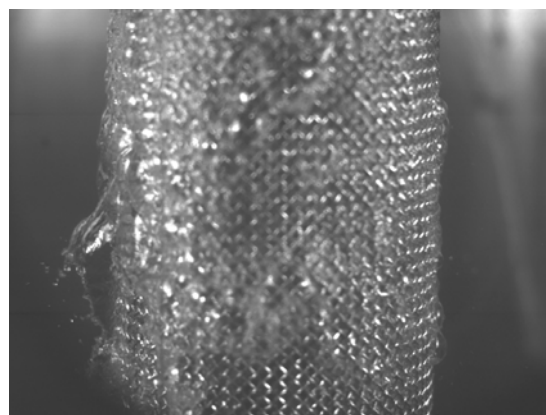


Рис. 5. Кипение на трубе с сетчатым покрытием. Смесь фреонов R21/R114, $C_x = 13\%$, $q = 3,1 \cdot 10^4 \text{ Вт/м}^2$, $Re = 210$

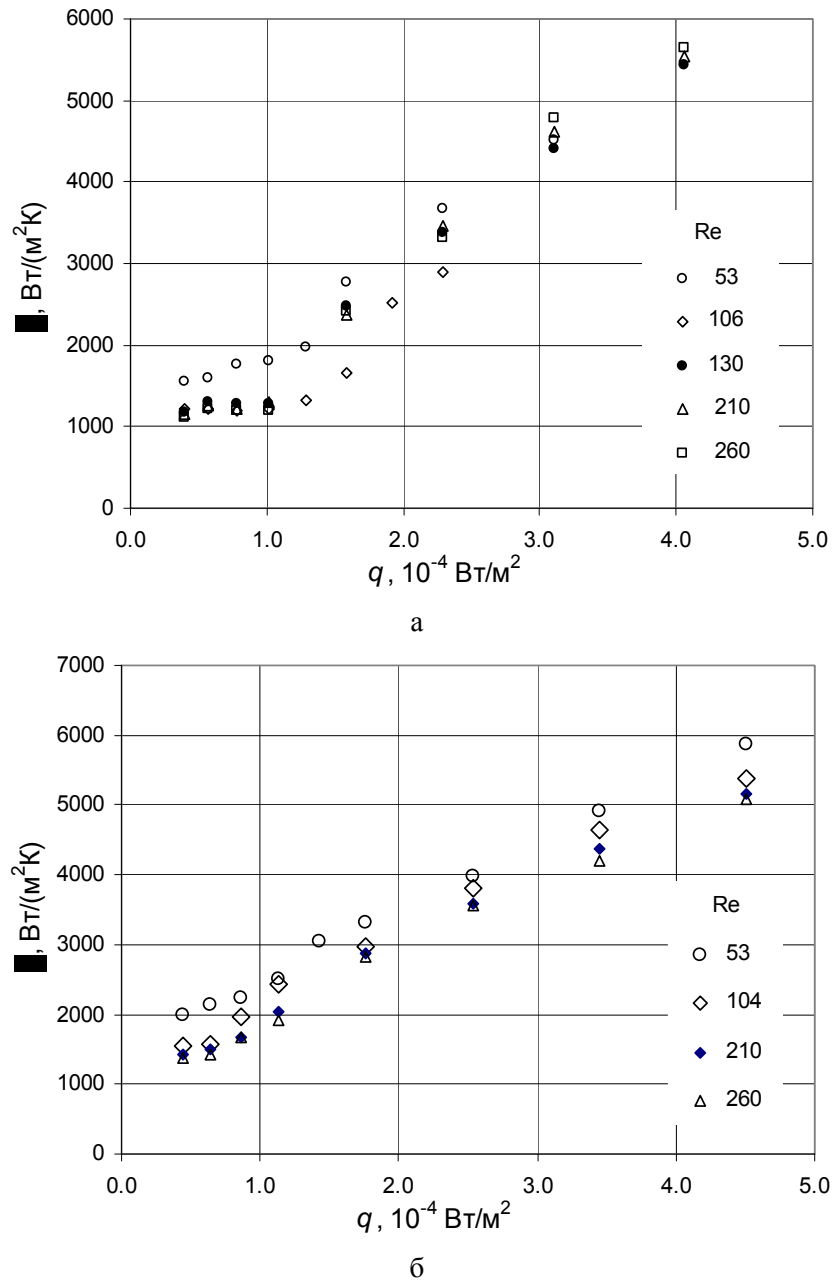


Рис. 6. Зависимость коэффициента теплоотдачи от теплового потока для различных чисел Рейнольдса: а – труба с гладкой поверхностью; б – труба с сетчатым покрытием

жидкости на входе в рабочий участок является параметром. На трубе с сетчатым покрытием, как и на гладкой трубе, в режиме испарения осредненные коэффициенты теплоотдачи уменьшаются с увеличением числа Рейнольдса при одинаковых тепловых потоках. На гладкой трубе влияние числа Рейнольдса в режиме пузырькового кипения значительно меньше. Из рис. 6 также видно, что степень влияния теплового потока на коэффициент теплоотдачи в режиме пу-

зырькового кипения на поверхности с сетчатым покрытием заметно ниже, чем на гладкой трубе.

На следующем этапе выполнения исследований будет проведено обобщение опытных данных по теплообмену в стекающих пленках в безразмерных координатах в режиме испарения и при пузырьковом кипении, а также проанализировано влияние факторов, связанных с изменением состава смеси и уменьшением локального числа

Рейнольдса по длине рабочих участков вследствие сложного процесса выпаривания бинарной жидкости.

Заключение

Получены новые опытные данные по влиянию теплового потока и расхода жидкости на теплообмен в стекающей пленке бинарной смеси фреонов R21 и R114 в режимах испарения и пузырькового кипения на трубе с сетчатым покрытием. Интенсификация теплообмена в режиме испарения на поверхности с сеткой происходит в первую очередь за счет образования менисков по всему периметру ячеек сетки и уменьшения толщины пленки внутри ячеек. Также возможно, что некоторый вклад в теплоотдачу вносит отвод тепла от стенки трубы через контактные точки плетеной сетки.

Пузырьковое кипение на трубе с сеткой начинается при заметно меньших тепловых потоках и температурных напорах, чем на гладкой трубе. Как показали визуальные наблюдения и видеосъемка течения пленки, это связано с более ранним, чем для гладкой поверхности, зарождением пузырьков в местах контакта узлов плетения сетки со стенкой.

Сравнение данных, полученных в экспериментах на чистой жидкости (фреон R21) и на смесях фреонов R21 и R114 с различной концентрацией летучего компонента (фреон R114), показало, что для веществ, имеющих близкие температуры кипения, влияние концентрации летучего компонента на коэффициенты теплоотдачи практически отсутствует. Это справедливо как для режима испарения, так и для режима пузырькового кипения.

Список литературы

1. Чернявский А. Н., Павленко А. Н. Полуэмпирический метод расчета времени ожидания вскипания в стекающей волновой пленке жидкости // Вестн. Новосиб. гос. ун-та. серия: Физика. 2012. Т. 7, вып. 3. С. 78–83.

2. Чернявский А. Н., Павленко А. Н. Определение времени ожидания вскипания в стекающих волновых пленках жидкости при нестационарном тепловыделении // Вестн. Новосиб. гос. ун-та. серия: Физика. 2013. Т. 8, вып. 3. С. 71–81.

3. Чиннов Е. А., Шатский Е. Н., Кабов О. А. Эволюция температурного поля на фронте трехмерной волны в нагреваемой пленке жидкости // ТВТ. 2012. Т. 50, № 1. С. 104.

4. Чиннов Е. А., Шатский Е. Н. Термокапиллярные неустойчивости в стекающей пленке жидкости при малых числах Рейнольдса // Письма в ЖТФ. 2014. Т. 40, вып. 1. С. 16–23.

5. Zeng X. et al. Falling Film Evaporation Characteristics of Microalgae Suspension for Biofuel Production // Applied Thermal Engineering. 2014. Vol. 62. Iss. 2. P. 341–350.

6. Mitrovich J. How to Create an Efficient Surface for Nucleate Boiling? // Intern. J. Thermal Sci. 2006. Vol. 45. P. 1–15.

7. Chu K.-H., Enright R., Wang E. N. Structured Surfaces for Enhanced Pool Boiling Heat Transfer // Appl. Phys. Lett. 2012. Vol. 100. P. 241603.

8. Christians M., Thome J. R. Falling Film Evaporation on Enhanced Tubes. Part 1: Experimental Results for Pool Boiling, Onset-of-Dryout and Falling Film Evaporation // Int. J. of Refrigeration. 2012. Vol. 35. No. 2. P. 300–312.

9. Pavlenko A. N., Pecherkin N. I., Chekhovich V. Yu., Volodin O. A. Hydrodynamics in Falling Liquid Films on Surfaces with Complex Geometry // Microgravity Science and Technology. 2009. Vol. 21 (Suppl. 1). P. 207–213.

10. Pecherkin N. I., Pavlenko A. N., Volodin O. A. Flow Dynamics, Heat Transfer and Crisis Phenomena in the Films of Binary Freon Mixtures, Falling over the Structured Surface // Int. J. of Fluid Mech. Res. 2012. Vol. 39. Iss. 2. P. 125–135.

11. Володин О. А., Павленко А. Н., Печеркин Н. И. Теплообмен и волновые характеристики при течении пленки бинарной смеси фреонов по поверхности с трехмерной текстурой // Теплофизика высоких температур. 2013. Т. 51, № 6. С. 864–874.

12. Salvagnini W., Taqueda M. A Falling-Film Evaporator with Film Promoters // Ind. Eng. Chem. Res. 2004. Vol. 43 (21). P. 6832–6835.

13. Павленко А. Н., Печеркин Н. И., Володин О. А. Теплообмен и кризисные явления при кипении в пленках смесей фреонов, стекающих по ребренной трубе // Теплофизика и аэромеханика. 2012. Т. 19, № 1. С. 143–154.

14. Володин О. А., Печеркин Н. И. Теплообмен и кризисные явления в пленках смесей фреонов, стекающих по структурированной поверхности // Тепловые процессы в технике. 2012. Т. 4, № 2. С. 56–67.

15. Печеркин Н. И., Павленко А. Н., Володин О. А. Теплоотдача при испарении сте-

кающих пленок смеси фреонов на гладкой и структурированной поверхностях // Теплофизика и аэромеханика. 2011. Т. 18, № 4. С. 605–616.

Материал поступил в редколлегию 22.01.2014

O. A. Volodin, A. N. Pavlenko, N. I. Pecherkin, V. S. Serdyukov

EVAPORATION AND BOILING OF THE FILM OF BINARY MIXTURE OF FREONS ON A VERTICAL CYLINDER WITH WIRE MESH COATING

The paper presents the experimental results on heat transfer in films falling down the vertical cylinder with mesh coating in a wide range of Reynolds' number (30–270). The mixture of freons R21 and R114 as well as the pure R21 were used as working liquids. The features of heat transfer in falling liquid films on the surface with wire mesh coating compared with the smooth surface have been revealed. It is shown that the heat transfer coefficient at evaporation on the surface with mesh coating is somewhat higher than on the smooth surface; and the nucleate boiling develops earlier on the surface with such a coating. The influence of the initial mixture composition on the coefficient of heat transfer is negligible at evaporation and boiling of binary mixture of freons with close saturation temperatures.

Keywords: liquid films, heat transfer, evaporation, nucleate boiling, mesh coating, freons, binary mixture.