Math-Net.Ru
All Russian mathematical portal

O. A. Volodin, A. N. Pavlenko, N. I. Pecherkin, Heat transfer and wave characteristics of a binary freon film flowing over a three-dimensional textured surface,
TVT, 2013, Volume 51, Issue 6, 864–874

https://www.mathnet.ru/eng/tvt154

Use of the all-Russian mathematical portal Math-Net.Ru implies that you have read and agreed to these terms of use
https://www.mathnet.ru/eng/agreement

Download details:
IP: 18.97.14.90
January 16, 2026, 17:58:57

ТЕПЛОФИЗИКА ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУР, 2013, том 51, № 6, с. 864–874

ТЕПЛОМАССООБМЕН И ФИЗИЧЕСКАЯ ГАЗОДИНАМИКА

УДК 536.248

ТЕПЛООБМЕН И ВОЛНОВЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРИ ТЕЧЕНИИ ПЛЕНКИ БИНАРНОЙ СМЕСИ ФРЕОНОВ ПО ПОВЕРХНОСТИ С ТРЕХМЕРНОЙ ТЕКСТУРОЙ

© 2013 г. О. А. Володин, А. Н. Павленко, Н. И. Печеркин

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

E-mail: volodin@ngs.ru

Поступила в редакцию 20.02.2013 г.

Представлены результаты исследования теплообмена, кризисных явлений и волновых характеристик в стекающих по вертикальной поверхности с трехмерной текстурой ламинарно-волновых пленках жидкости. Рабочей жидкостью служила смесь фреонов R21 и R114. Выявлены особенности теплообмена, гидродинамики и развития кризисных явлений при стекании пленки бинарной жидкости по тепловыделяющим поверхностям различной геометрии. Показано, что в режиме испарения зависимость коэффициента теплоотдачи от степени орошения для поверхности с трехмерной текстурой аналогична зависимости для гладкой поверхности с наличием небольшой интенсификации теплоотдачи в области изменения пленочного числа Рейнольдса на входе 100–500. Коэффициенты теплоотдачи при пузырьковом кипении на исследованных типах структурированных поверхностей лежат существенно ниже, чем для гладкой трубы. В режиме неразвитого пузырькового кипения величина критического теплового потока для всех типов поверхностей определяется зависимостью, полученной на основе рассмотрения возникновения кризиса теплоотдачи в испаряющейся волновой пленке жидкости.

DOI: 10.7868/S0040364413060215

ВВЕДЕНИЕ

Пленочные течения жидкости широко применяются для охлаждения тепловыделяющих поверхностей в различных технологических приложениях: теплообменниках, конденсаторах, испарителях, в криогенном оборудовании, выпарных аппаратах и т.д. Опубликовано большое количество работ по теоретическому и экспериментальному исследованию гидродинамики и теплообмена в стекающих пленках жидкости, описание которых приводится в таких монографиях, как [1–3]. В настоящее время изучение особенностей теплообмена и волнообразования в стекающих пленках жидкости, связанное, в конечном счете, с возможностью интенсификации теплообмена, продолжает вызывать интерес.

В работе [4] экспериментально исследовалось влияние искусственных возмущений на динамику волновой поверхности неизотермической пленки жидкости. Изучено нестационарное развитие волновых и тепловых характеристик пленки воды от момента воздействия возмущения с “наиболее опасной” длиной волны. Показано, что прохождение фронта волны после воздействия такого возмущения приводит к изменению расстояния между струями. Обнаружен рост амплитуды волн на фронте распространяющегося возмущения. В экспериментальном исследовании [5] той же группы авторов изучалась эволюция температурного поля на фронте трехмерной волны в пленке жидкости, стекающей по тепловыделяющему участку. Было показано, что вследствие действия термокапиллярных сил на поверхности пленки происходит деформация трехмерных волн и переход к струйному течению. Сделан вывод, что в рассмотренных условиях термокапиллярная и трехмерная неустойчивость гидродинамических волн изначально не связаны, а возникают и развиваются независимо, после чего начинают взаимодействовать. В работе [6] выполнено экспериментальное исследование изменения длины термического начального участка в стекающей пленке воды при высоких числа Рейнольдса. Сделан вывод, что сочетание сильных волновых и термокапиллярных эффектов может приводить к значительному уменьшению длины начального термического участка, из чего следует вероятная необходимость пересмотра формул для расчета теплообмена в стекающих пленках жидкости из [2], основанных на гипотезе существенного влияния начального термического участка.

В последнее время в тепломассобменных аппаратах различного назначения начинают находить все большее применение модифицированные поверхности, способные значительно интен-

сифицировать теплообмен и стабилизировать пленочное течение [7–11]. Однако систематизированные данные для маловязких высокосмачивающих жидкостей (фреоны и их смеси, криогенные жидкости) при их течении по поверхностям сложной геометрии практически отсутствуют. В работе [12] представлены результаты экспериментального исследования теплообмена в режиме испарения и гидродинамики стекающих пленок бинарных смесей фреонов R21 и R114 на гладкой и поперечно оребренной поверхностях вертикальных труб диаметром 50 мм из алюминиевого сплава Д16Т. Диапазон изменения пленочного числа Рейнольдса на входе в рабочий участок составлял: Re = = 60–700 (Re = $4\Gamma/\nu$, где Γ – расход жидкости на единицу ширины пленки, ν – коэффициент кинематической вязкости). Было показано, что в режиме испарения коэффициенты теплоотдачи на гладкой и поперечно оребренной поверхностях определяются расходом жидкости и слабо зависят от теплового потока. При малых расходах жидкости коэффициенты теплоотдачи на оребренной поверхности (шаг оребрения – 1.5 мм, глубина – 0.4 мм, коэффициент оребрения – 1.77) уменьшаются по сравнению с гладкой поверхностью за счет накопления жидкости и увеличения эффективной толщины пленки в каналах текстуры. При больших расходах жидкости (Re = 400–700) изменение структуры волновой поверхности пленки приводит к увеличению коэффициентов теплоотдачи по сравнению с гладкой поверхностью.

В [13] приведены результаты изучения волновой структуры поверхности пленки смеси фреонов R21 и R114, а также измерения коэффициентов теплоотдачи в режиме кипения и критических тепловых потоков при течении пленки по гладкой и поперечно оребренной поверхностям. Показано, что расчетные зависимости как для теплоотдачи при кипении смесей жидкостей в большом объеме, так и для условий пленочного течения жидкости предсказывают более низкие значения коэффициентов теплоотдачи, чем значения, полученные в указанных экспериментах для гладкой трубы. Коэффициенты теплоотдачи при пузырьковом кипении на оребренной трубе оказываются существенно ниже, чем на гладкой трубе в исследованном диапазоне числа Рейнольдса. Продемонстрировано удовлетворительное совпадение полученных данных по условиям образования устойчивых сухих пятен в стекающих пленках смеси фреонов в исследованном диапазоне изменения плотности орошения с расчетом по модели испарения остаточного слоя [14], учитывающей его подпитку при распространении крупных трехмерных волн. Приведено сравнение волновых характеристик на гладкой и оребренной поверхностях. Обнаружено, что в каналах текстуры наблюдается интенсивное нестационарное движение жидкости в горизонтальном направлении при развитии вторичных волн, которое приводит к возникновению более сложной волновой структуры на поверхности пленки. Похожие наблюдения были сделаны в работе [15], посвященной визуальному исследованию формирования пленки этанола на поверхности цилиндра с горизонтальной текстурой (шаг – 1.75 мм, глубина канавок – 0.35 мм). Было показано, что наличие горизонтально ориентированной текстуры приводит к дополнительному волнообразованию на поверхности пленки с характерными размерами волн, равными шагу текстуры, что может вызвать интенсификацию теплообмена. Последнее предположение было подтверждено в работах [12, 16] для режима испарения стекающей пленки.

Испарение смесей веществ играет важную роль в нефтехимической промышленности, химических технологиях (например, производство полимеров), в системах охлаждения. Имеющиеся в литературе пока немногочисленные экспериментальные данные показывают в ряде случаев значительное влияние концентрации легкокипящего компонента на интенсивность теплообмена [17, 18]. Однако данных для анализа влияния этого фактора в литературе по стекающим пленкам недостаточно. В работе [12], где в качестве рабочей жидкости использовались бинарные смеси фреонов R21 и R114 с небольшой разницей между температурами кипения и конденсации, показано, что изменение входной концентрации легкокипящего компонента смеси в диапазоне (4–15%) не имеет заметного влияния на коэффициент теплоотдачи в режиме испарения, влияние термоконцентрационной конвекции оказалось также слабым. С другой стороны, в экспериментальном исследовании [19] было показано, что для смесей с большой разницей между температурами кипения и конденсации с увеличением теплового потока растет влияние массопереноса на коэффициент теплоотдачи. Открытым также остается вопрос о влиянии состава бинарных смесей на величину критической тепловой нагрузки [12–20]. В [20] проведен анализ существующих представлений о кризисе кипения бинарных смесей. В результате поиска метода, позволяющего находить новые растворы, характеризующиеся максимальными значениями критических тепловых нагрузок, показано, что максимальные значения критической тепловой нагрузки совпадают с так называемыми “особыми точками” – экстремальными значениями на графиках зависимости приращения удельного веса от концентрации для растворов. Сделан вывод, что поиск новых бинарных систем с аналогичными свойствами может опираться на исследование этих “особых точек”.

Задачей данной работы было измерение коэффициентов теплоотдачи в режимах испарения и пузырькового кипения жидкости, изучение волновой структуры поверхности пленки, исследование динамики развития кризисных явлений и

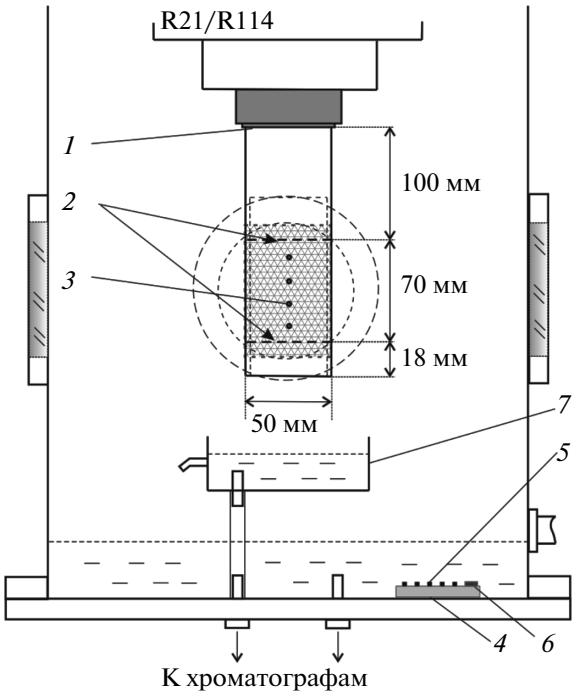

Рис. 1. Схема экспериментальной секции: *1* – щелевой распределитель, *2* – границы зоны тепловыделения, *3* – термопары, *4* – фторопластовая подложка, *5* – холодные спаи термопар, *6* – терморезистор, *7* – сборный стаканчик.

получение данных по изменению мольной доли компонентов для стекающих по тепловыделяющей поверхности с трехмерной текстурой пленок смеси фреонов. С целью поиска оптимальных для различных режимов теплообмена и плотностей орошения текстур поверхности произведены анализ и сопоставление новых опытных данных по теплообменным и волновым характеристикам для пленок бинарной смеси фреонов R21/R114, стекающих по гладкой и поперечно оребренной поверхностям, с данными, полученными ранее.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Экспериментальный стенд представляет собой замкнутый циркуляционный контур, включающий в себя теплоизолированную колонну с оптическими окнами, бак постоянного уровня, рабочий участок, емкость с фреоном, насосы, манометр и расходомер. Подробное описание экспериментальной установки приведено в [13, 16].

На рис. 1 показана схема экспериментальной секции для исследования теплообмена на гладкой и структурированных трубах. Течение пленок бинарных смесей фреонов (R114/R21) с различной начальной концентрацией легкокипящего компонента (R114) осуществляется на вертикально ориентированных трубах из дюралюминия Д16Т диаметром 50 мм. Теплопроводность Д16Т: $\lambda = 169$ Вт/(м · К), температуропроводность: $a = 6.6 \times 10^{-5}$ м/с^2 (значения указаны для 20°С). В описываемой серии экспериментов использовалась тонкостенная труба с трехмерной ромбовидной текстурой поверхности. Расстояние между параллельными канавками ромбовидной текстуры – 1.0 мм, глубина канавок – 0.3 мм, меньший угол ромба, образованного пересекающимися канавками трехмерной текстуры, равен 60° (рис. 2). Размер распределительной щели составлял 100 мкм.

Для обогрева рабочего участка использовался нагревательный элемент длиной 70 мм, устанавливаемый внутрь тонкостенной трубы. Область текстурирования начиналась на расстоянии 80 мм от распределительной щели и имела протяженность 100 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 четыре медь-константановых термопары диаметром 0.08 мм, заделанные заподлицо с поверхностью трубы. Шаг между термопарами, установленными по вертикали – 18 мм, расстояние между началом зоны тепловыделения и верхней термопарой – 8 мм (см. рис. 1). Холодные спаи термопар, погруженные в слой жидкости на дне колонны, находились при одинаковой температуре, которая определялась с помощью малоинерционного терморезистора HEL-700. Для теплоизоляции от дна колонны холодные спаи термопар и терморезистор были закреплены на фторопластовой подложке. Температура в различных участках рабочего объема оптической 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 – турбинным расходомером.

Мольная концентрация компонентов бинарной смеси фреонов измерялась методом газовой хроматографии. Поскольку вследствие испарения жидкости с поверхности происходит изменение состава бинарной смеси в стекающей пленке по длине теплоотдающей поверхности, измерение состава смеси производилось в трех точках: на линии подачи смеси в бак постоянного уровня (исходная концентрация смеси), в сборном проточном стаканчике, куда стекала смесь с рабочего участка, а также на дне оптической колонны.

Визуализация и запись процессов, развивающихся при течении волновой пленки жидкости,

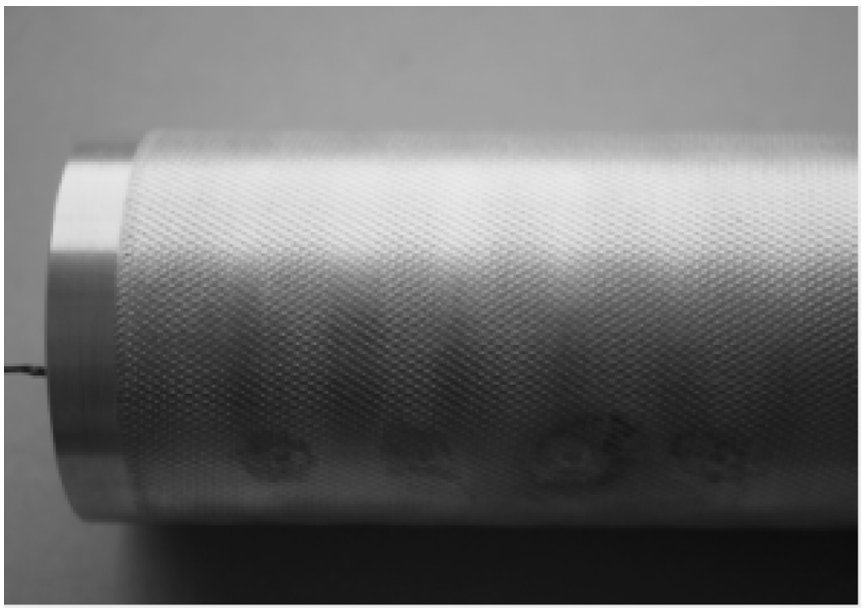

Рис. 2. Участок с трехмерной ромбовидной текстурой поверхности. Расстояние между параллельными канавками ромбовидной текстуры – 1.0 мм, глубина канавок – 0.3 мм, меньший угол ромба, образованный пересекающимися канавками текстуры, – 60°.

осуществлялись с помощью высокоскоростной цифровой видеокамеры Phantom 7.0 с частотой 1000 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. Пленочное число Рейнольдса Re на входе в рабочий участок изменялось от 60 до 700. Величина плотности теплового потока во время эксперимента варьировалась от 0 до 7×10^{-4} Вт/м^2. Утечки тепла с торцов обогреваемого участка составляли не более 10%. Начальная концентрация C_x легкокипящего компонента смеси (фреон R114) составляла 19%.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Эксперименты проводились в стационарных по тепловыделению условиях. Тепловая нагрузка пошагово увеличивалась вплоть до достижения критических значений теплового потока, соответствующих образованию на тепловыделяющей поверхности устойчивых сухих пятен, а затем таким же образом уменьшалась до нуля. При “обратном ходе” по величине тепловой нагрузки на поверхности с трехмерной текстурой, так же как и для гладкой поверхности [12], в отличие от поперечно оребренной трубы наблюдался гистерезис (рис. 3), выражающийся в том, что режим пузырькового кипения за счет парообразования на готовых центрах сохраняется при меньших тепловых потоках и коэффициенты теплоотдачи, соответствующие одинаковым тепловым потокам, при уменьшении тепловой нагрузки становятся выше. Гистерезис менее выражен для верхней области зоны тепловыделения (точки *1*, *2* на рис. 3), где в отличие от нижней части (точки *3*, *4*) вплоть до критических тепловых нагрузок (КТП) сохраняется режим испарения. Наблюдаемая выраженная дифференциация режимов теплообмена связана с особенностями трехмерной текстуры поверхности и, по-видимому, объясняется равномерным утончением и эффективным перераспределением пленки интенсивно испаряющейся жидкости на

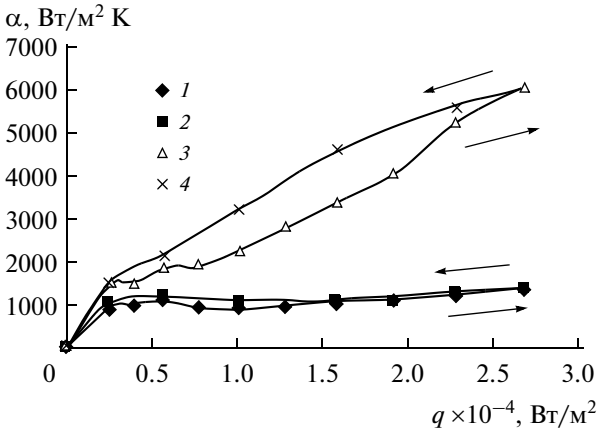

Рис. 3. Зависимость локальных коэффициентов теплоотдачи от теплового потока при различных направлениях его изменения: *1, 2* – 8 мм от начала зоны тепловыделения; *3, 4* – 62 мм; Re = 208, P = 2 бар, C_x = = 19%.

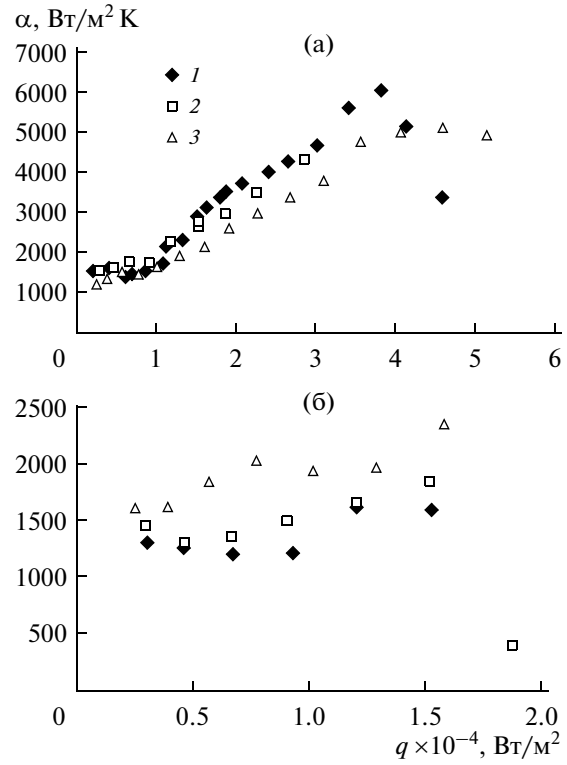

Рис. 4. Зависимость среднего по длине коэффициента теплоотдачи от теплового потока для различных поверхностей: *1* – гладкая поверхность, *2* – поперечно оребренный участок, *3* – участок с трехмерной текстурой; $P = 2$ бар; (а) – Re = 412, (б) – Re = 204.

данной текстуре. При дальнейшей обработке данных и сравнении с расчетными зависимостями в качестве температуры стенки везде принималось значение температуры на ветке увеличения теплового потока. Тем самым более высокие значения коэффициентов теплоотдачи на трехмерной поверхности при гистерезисе, которые не всегда могут быть реализованы на практике, исключались из рассмотрения.

На рис. 4 приведены данные по влиянию теплового потока на осредненный по длине коэффициент теплоотдачи для трехмерной поверхности в сравнении с ранее полученными данными для гладкой и оребренной поверхностей [13, 16] для двух чисел Рейнольдса на входе в участок. При тепловых потоках $q \le 1 \times 10^{-4}$ Вт/м^2 теплообмен осуществляется в режиме испарения по всей длине участка. В этом режиме коэффициент теплоотдачи практически не зависит от теплового потока (рис. 4а). При увеличении теплового потока режим испарения сменяется режимом пузырькового кипения. Затем, при приближении к критическим значениям теплового потока, на теплоотдающей поверхности возникают сначала замываемые, а затем и стабильные сухие пятна. Из рис. 4а видно (точки *3*), что начало кризиса пузырькового кипения на участке с трехмерной структурой происходит при больших тепловых потоках, чем на участках с гладкой и оребренной поверхностями. При малых числах Рейнольдса замываемые сухие пятна возникают уже в режиме испарения (рис. 4б, точки *2*). При дальнейшем росте теплового потока (превышение КТП) размер сухих пятен увеличивается, что в итоге может приводить к полному осушению теплоотдающей поверхности и выходу из строя рабочего участка. За величину КТП везде принимается тепловой поток, вызывающий появление на теплоотдающей поверхности устойчивых сухих пятен, следствием чего является резкий рост локальной температуры поверхности.

На рис. 5 приведены фотоснимки режимов теплообмена, наблюдаемых в стекающей пленке бинарной жидкости при увеличении тепловой нагрузки. С превышением плотности теплового потока $q = 1 \times 10^{-4}$ Вт/м^2 режим испарения пленки сменяется режимом пузырькового кипения (рис. 5б). Затем, при приближении к критическим значениям теплового потока, на теплоотдающей поверхности возникают сначала замываемые, а затем и стабильные сухие пятна (рис. 5в).

Одной из наблюдаемых в экспериментах особенностей пузырькового кипения в бинарной смеси фреонов является слияние пузырей и их движение в виде конгломератов вместе с пленкой жидкости. Пленка жидкости при достаточно развитом кипении представляет собой двухфазный пенный слой, стекающий в виде кипящих струй (рис. 5в). Размер сливающихся пузырей и образующихся конгломератов может достигать нескольких сантиметров, толщина двухфазного слоя составляет 5–6 мм.

Данные по безразмерному коэффициенту теплоотдачи в режиме испарения в зависимости от плотности орошения и сравнение с ранее полученными опытными данными для гладкой и поперечно оребренной поверхностей [12, 16] показаны на рис. 6. Локальное число Рейнольдса рассчитано по среднему расходу жидкости между входом и выходом. Из рис. 6 видно, что зависимость коэффициента теплоотдачи от степени орошения для поверхности с трехмерной текстурой аналогична зависимости для гладкой поверхности с некоторой интенсификацией теплоотдачи в диапазоне пленочного числа Рейнольдса 100–500. На рис. 6 также приведены известные эмпирические зависимости, обобщающие данные различных авторов для гладких поверхностей. Поведение результатов опытов для гладкой поверхности и поверхности с трехмерной текстурой на качественном уровне близко к расчету [24]. Решение Нуссельта лежит существенно ниже экспериментальных данных как для гладкой, так и для текстурированных поверхностей.

Отличие в характере поведения коэффициента теплоотдачи для поперечно оребренной поверх-

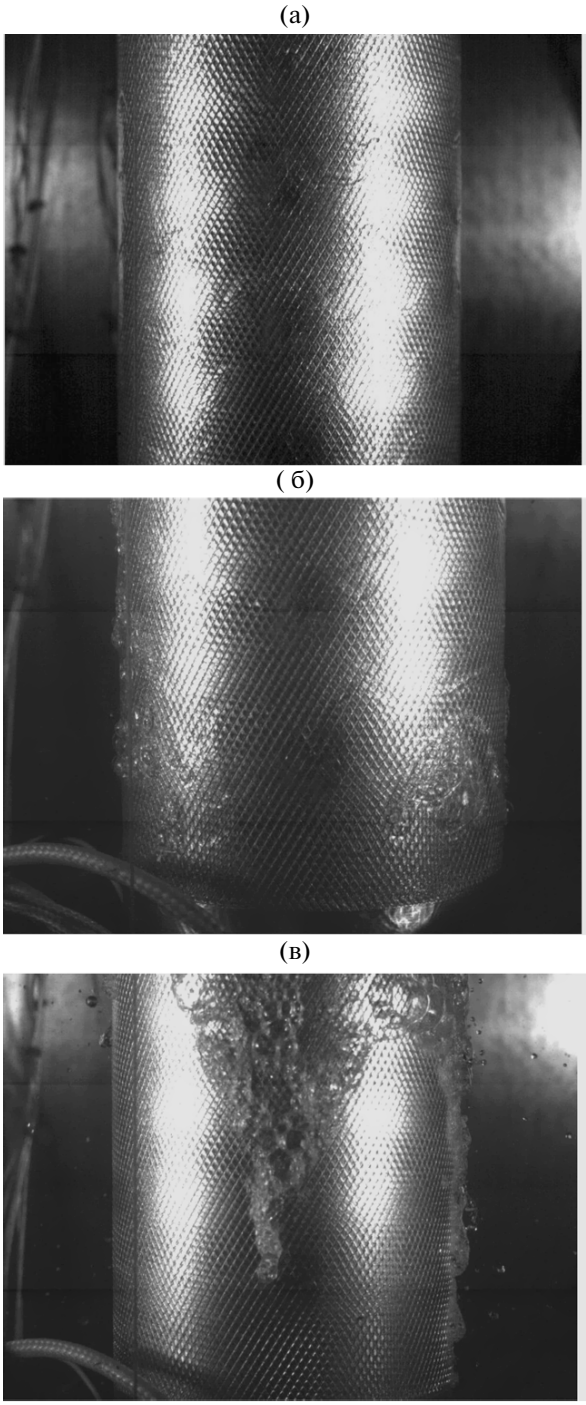

Рис. 5. Развитие кризиса при течении пленки бинарной смеси фреонов по обогреваемому участку с трехмерной текстурой: $P = 2$ бар, Re = 312; (а) – $q = 0$ Вт/м^2, (б) – $q = 1.4 \times 10^{-4}$ Вт/м^2, (в) – $q = 5.1 \times 10^{-4}$ Вт/м^2.

ности подробно обсуждался в [12, 16]. Уменьшение коэффициентов теплоотдачи при малых расходах жидкости связано с тем, что заполнение горизонтальных каналов оребренной поверхности вызывает увеличение толщины слоя жидкости на поверхности трубы и, соответственно, увеличение термического сопротивления пленки. При росте числа Рейнольдса, как отмечалось выше, дополнительное волнообразование на поверхности пленки приводит к интенсификации теплообмена на поперечно оребренной трубе в режиме испарения по сравнению с гладкой поверхностью и поверхностью с трехмерной текстурой.

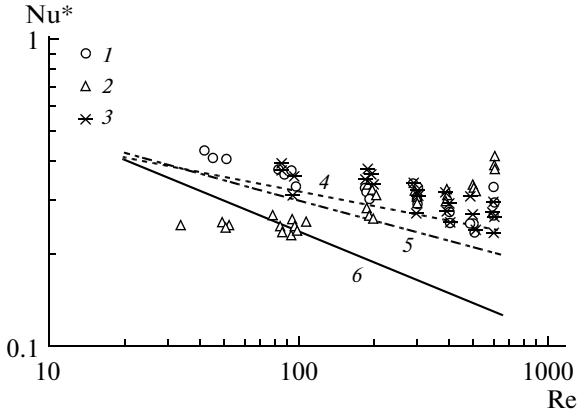

Рис. 6. Безразмерный коэффициент теплоотдачи для режима испарения пленки бинарной смеси фреонов на гладкой и структурированных поверхностях. Экспериментальные данные: *1* – гладкая поверхность ($C_x = 8.8$–16.6%), *2* – горизонтально оребренная поверхность ($C_x = 4.4$–14.5%), *3* – трехмерная текстура ($C_x = 19.4\%$); расчетные зависимости: линия *4* – [24], *5* – [23], *6* – решение Нуссельта; $P = 2$–2.1 бар.

Сравнение ранее полученных авторами данных по теплоотдаче при испарении пленки смесей фреонов R114/R21 для гладкой и поперечно оребренной поверхностей с имеющимися в литературе опытными данными по исследованию теплоотдачи при течении чистых жидкостей: фреона R11 на длинных вертикальных трубах [21] и на пучке горизонтальных гладких и оребренных труб [22] – приведено в [12]. Показано, что в диапазоне малых локальных чисел Рейнольдса 40–80 экспериментальные данные по теплоотдаче при испарении фреона R11 на горизонтальных [22] и вертикальных [21] трубах удовлетворительно совпадают как между собой, так и с обобщающими зависимостями из работ [23, 24]. В диапазоне чисел Рейнольдса 200–600 полученные авторами экспериментальные данные по теплоотдаче для гладкой и оребренной поверхностей при испарении бинарной смеси R21/R114 удовлетворительно совпадают с данными по испарению фреона R11 на пучке горизонтальных труб [22].

Параметры структур исследуемых авторами поперечно оребренной и трехмерной поверхностей были подобраны в первую очередь для изучения возможности интенсификации теплообмена в режиме испарения пленки жидкости. Шаг и глубина канавок (1.5 и 0.4 мм – для поперечно оребренной поверхности, 1.0 и 0.3 мм – для трех-

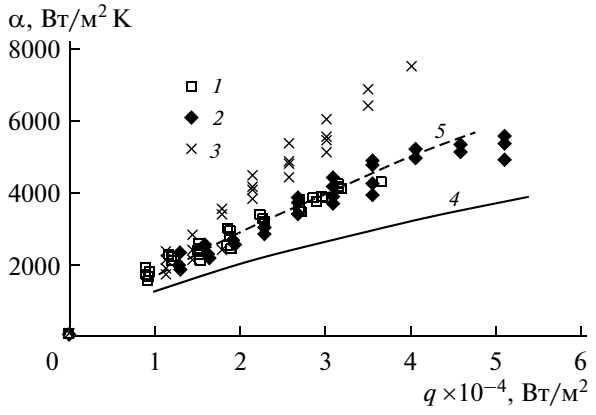

Рис. 7. Теплоотдача при кипении на структурированных и гладкой поверхностях при различных величинах числа Рейнольдса на входе: *1* – оребренная поверхность, *2* – трехмерная поверхность, *3* – гладкая поверхность; линия *4* – расчет по модели [25], *5* – расчет по модели [27].

мерной поверхности) близки к значениям постоянной Лапласа (Λ = 1.1 мм) и средней толщины пленки по Нуссельту (δ_0 = 0.1 мм). Однако с точки зрения практического применения модифицированных поверхностей в различных приложениях представляется необходимым изучать особенности теплообмена на таких поверхностях наиболее полно, включая изучение режима кипения и кризисных явлений.

Результаты измерения коэффициентов теплоотдачи при кипении пленки смеси фреонов R21/R114 на гладкой и поперечно оребренной поверхностях и их обсуждение приведены в [13, 16]. На рис. 7 представлены данные по зависимости коэффициентов теплоотдачи от теплового потока при интенсивном пузырьковом кипении пленки смеси на трехмерной, поперечно оребренной и гладкой поверхностях для диапазона числа Рейнольдса 200–630. Влияние расхода жидкости на теплообмен в случае структурированных поверхностей практически отсутствует, для гладкой поверхности коэффициент теплоотдачи увеличивается с ростом числа Рейнольдса (см. [13]). Измеренные коэффициенты теплоотдачи сопоставлены с моделями [25, 26] для расчета теплоотдачи при кипении в большом объеме и [27] для расчета теплоотдачи при кипении в стекающей пленке. Авторами модели [26] за счет введения поправочного множителя учитывается снижение коэффициента теплоотдачи при пузырьковом кипении бинарной смеси, обусловленное уменьшением концентрации легкокипящего компонента в перегретом пристенном слое. Однако для смеси фреонов R21/R114, используемой в настоящей работе, уменьшение расчетного коэффициента теплоотдачи за счет введения данной поправки оказывается несущественным и согласно проведенной оценке не превышает 5%.

Из рис. 7 видно, что коэффициенты теплоотдачи на двух различных структурированных поверхностях в режиме пузырькового кипения близки друг к другу и оказываются ниже, чем для гладкой поверхности во всем исследованном диапазоне изменения режимных параметров. Данное различие может быть обусловлено дополнительным термическим сопротивлением как самой текстурированной поверхности, так и пленки жидкости в каналах текстур. Доли тепла, затрачиваемые на испарение жидкости под паровыми конгломератами на гладкой и структурированных поверхностях, могут быть различными. На структурированных поверхностях, в отличие от гладкой, характерный размер пленки под паровыми конгломератами определяется также шагом и глубиной канавок имеющейся текстуры. Толщина пленки и, соответственно, термическое сопротивление под и между паровыми образованиями на таких поверхностях могут быть существенно больше, что может приводить к уменьшению теплоотдачи по сравнению с гладкой поверхностью. В то же время результаты по коэффициентам теплоотдачи на структурированных поверхностях удовлетворительно совпадают с расчетом по формуле [27], полученной для случая кипения при пленочном течении на гладких поверхностях.

Наблюдаемое для всех типов поверхностей увеличение коэффициентов теплоотдачи в режиме кипения при пленочном течении бинарной смеси по сравнению с расчетной зависимостью по модели [25] для кипения в большом объеме может быть связано с различным характером кипения. Как уже отмечалось, размер паровых пузырей при кипении в пленке (5–6 мм) значительно больше отрывного диаметра пузырей при кипении в большом объеме (1–1.5 мм – для фреонов при тех же давлениях). Поэтому доля тепла, передающаяся в паровой пузырь на границе с жидкостью при кипении в пленке при данных тепловых потоках, может быть выше, чем в большом объеме. Наблюдаемый в данных экспериментах большой размер паровых пузырей при кипении в пленке может быть связан с более интенсивным испарением легкокипящего компонента в бинарной смеси. Кроме того, в стекающей по гладкой поверхности тонкой пленке жидкости при неразвитом пузырьковом кипении значительный вклад в интенсификацию теплообмена вносит составляющая теплообмена при испарении со свободной поверхности пленки в зонах между паровыми образованиями.

Появлению устойчивых сухих пятен на тепловыделяющей поверхности при малых числах Рейнольдса предшествует периодическое осушение поверхности в нижней части рабочего участка в тонком остаточном слое в зоне между гребнями

волн. При постоянном тепловом потоке в околокризисном режиме замываемые сухие пятна, не оказывающие заметного влияния на осредненный коэффициент теплоотдачи, могут существовать продолжительное время. При достижении КТП на тепловыделяющей поверхности образуются устойчивые сухие пятна, что ведет к резкому росту локальной температуры поверхности в области осушения и ассоциируется с аварийным режимом работы теплообменных аппаратов.

На рис. 8 приведены опытные данные по КТП, соответствующие условиям появления устойчивых сухих пятен на гладкой и структурированных поверхностях, и сравнение результатов измерений с моделями разных авторов. Величины КТП для трехмерной поверхности в области чисел Re = = 100–400 превышают КТП как для гладкой, так и для оребренной поверхностей. Этот эффект может объясняться более равномерным распределением локальной толщины пленки по периметру и длине теплоотдающей поверхности, способствующим стабильному существованию режима испарения пленки и затягиванию начала развития критических явлений. Более низкие по сравнению с другими рабочими участками значения величин КТП на горизонтально оребренной поверхности, наблюдаемые при Re > 400, по-видимому, связаны с упоминаемым изменением волновой картины течения пленки: на горизонтально оребренной поверхности наблюдается интенсификация волнообразования с возникновением вторичных волн меньшего масштаба, в результате чего происходит существенное перераспределение жидкости с возможностью возникновения участков с более тонким слоем пленки, служащих центрами для образования сухих пятен. На рис. 8 также приведены опытные данные по КТП для фреонов R236fa и R134a, стекающих по наружной поверхности горизонтальной трубы Gewa-B5 диаметром 19.05 мм, полученные авторами [11]. Показано, что для модифицированной поверхности Gewa-B5 значения КТП лежат выше, чем для гладкой и горизонтально оребренной поверхностей. В области чисел Рейнольдса ≤ 200 данные [11] близки к значениям КТП для трехмерной поверхности.

Как видно из рис. 8, имеющиеся в литературе расчетные зависимости КТП [28, 29], показанные линиями *7* и *8,* не описывают полученные опытные данные для гладкой и текстурированных поверхностей. Подробный анализ причин этого факта приведен в [13, 16]. Сопоставление показывает, что опытные данные по КТП при пленочном течении смесей фреонов по исследованным авторами тепловыделяющим поверхностям достаточно хорошо описываются моделью [14], полученной на основе рассмотрения возникновения кризиса теплоотдачи в испаряющейся волновой пленке жидкости. Согласно модели [14] для возникновения кризиса необходимо испарить жидкость в остаточном слое между гребнями больших волн, а также ту жидкость, которая периодически поступает в остаточный слой при прохождении крупных трехмерных волн. Полученная зависимость, учитывающая эти две компоненты, имеет следующий вид:

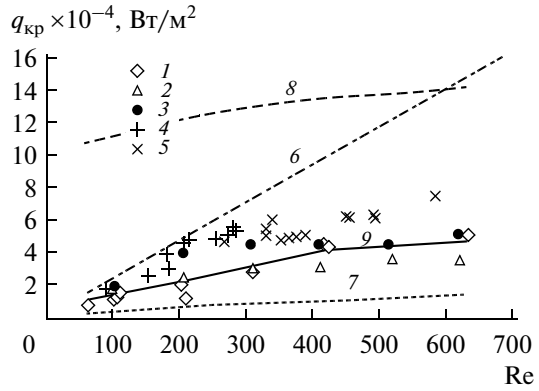

Рис. 8. Зависимость КТП от пленочного числа Рейнольдса на входе. Опытные данные: *1* – гладкая поверхность, *2* – поперечное оребрение, *3* – трехмерная текстура; *4*, *5* – опытные данные [11] для фреонов R236fa и R134a соответственно, *6* – расчет теплового потока, соответствующего полному испарению на выходе; расчетные зависимости: линия *7* – [28], *8* – [29], *9* – [14].

$$q_{кр} = r\rho'\left(\frac{\delta_{ост}^3 g}{3\nu'\tilde{l}} + 0.25k\delta_{ост}\tilde{f}\right), \qquad (1)$$

где g – ускорение свободного падения, м/с^2; $\delta_{ост}$ – толщина остаточного слоя, м; $\tilde{l} = \lambda$ – средняя длина волны, м; $\tilde{f} = \tilde{c}/\lambda$ – частота прохождения крупных трехмерных волн, с$^{-1}$. Эти величины являются функциями локального числа Рейнольдса на выходе из обогреваемого рабочего участка. Средняя длина волны λ и фазовая скорость крупных волн $\tilde{c}$ были взяты из экспериментов. Толщина остаточного слоя рассчитывалась согласно [14] также в зависимости от пленочного числа Re на выходе. Учет влияния трехмерной формы волн на условия подтекания жидкости в остаточный слой и его периодическое обновление определяется вторым членом в формуле (1) с коэффициентом обновления $k = 0.2$

При течении пленки бинарной смеси по обогреваемой поверхности на выходе из рабочего участка в результате испарения изменяется не только общий расход жидкости в пленке, но и состав смеси. Если при уменьшении концентрации легкокипящего компонента поверхностное натяжение увеличивается, то такая смесь жидкостей считается “положительной”. При испарении “положительной” смеси поверхность пленки стабилизируется [30]. Используемая в экспериментах смесь фреонов R114/R21 является “положитель-

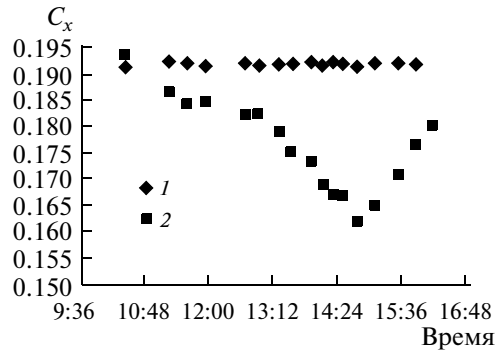

Рис. 9. Изменение мольной концентрации C_x легкокипящего компонента смеси (R114) от времени для установившихся режимов в зависимости от плотности теплового потока: *1* – мольная доля R114 на подаче жидкости, *2* – мольная доля R114 на выходе из рабочего участка (в сборном стаканчике); Re = 412, P = 2 бар.

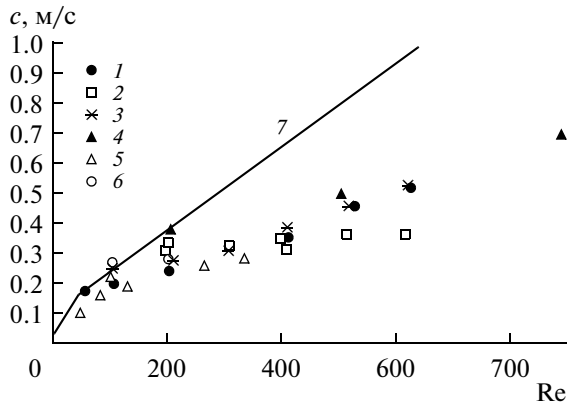

Рис. 10. Средняя скорость крупных волн на гладкой и структурированных поверхностях. Смеси фреонов: *1* – гладкая поверхность, *2* – поперечное оребрение, *3* – трехмерная текстура; азот, гладкая поверхность: *4* – данные [32], *5* – данные [33], *6* – скорость поперечных волн в горизонтальных каналах текстуры (смесь фреонов R21/R114), *7* – зависимость фазовой скорости согласно расчету по нелинейной теории [34].

ной". При уменьшении концентрации легкокипящего компонента в интенсивно испаряющейся пленке жидкости соответствующее увеличение коэффициента поверхностного натяжения для данной смеси может достигать 1–2%. Так как испарение пленки происходит в первую очередь в зоне остаточного слоя, то концентрация легкокипящего компонента уменьшается во впадинах между гребнями крупных волн. Увеличение поверхностного натяжения на участках с меньшей толщиной пленки приводит к возникновению градиента поверхностного натяжения на свободной поверхности пленки и появлению тангенциальной силы, направленной для рассматриваемой в данной работе смеси от гребней к остаточному слою, что может вызвать уменьшение относительной амплитуды волн. Проведенная на основе модели, предложенной в [31], оценка скорости, обусловленной термоконцентрационным эффектом, дает величину $\sim 10^{-3}$ м/с, что много меньше скорости жидкости в остаточном слое (~0.1 м/с). Таким образом, в исследованных режимах вклад термоконцентрационной конвекции слишком мал для того, чтобы оказывать заметное влияние на гидродинамику течения и коэффициент теплоотдачи.

На рис. 9 представлены результаты измерения концентрации легкокипящего компонента (фреон R114) бинарной смеси фреонов R114/R21 на входе и выходе тепловыделяющей поверхности с трехмерной текстурой при пошаговом изменении тепловой нагрузки от нуля до максимальной величины $q = 4.5 \times 10^{-4}$ Вт/м^2, соответствующей КТП, и поступательном уменьшении до нуля. Как видно из рисунка, концентрация легкокипящего компонента при максимальных тепловых нагрузках уменьшается на 3–4% от первоначальной. Аналогичные результаты по изменению состава смеси на выходе из тепловыделяющего участка были получены авторами для течения пленки смеси фреонов R21/R114 по гладкой и оребренной поверхностям.

В проведенных экспериментах измерялись волновые характеристики развитых трехмерных волн как при отсутствии тепловой нагрузки, так и в режиме испарения пленки. Значение пленочного числа Рейнольдса на входе в участок изменялось от 60 до 700. Поскольку бинарная смесь фреонов R21/R114, как и жидкий азот, имеет низкие значения кинематической вязкости, поверхностного натяжения и малые краевые углы смачивания (до 10° на металлических поверхностях), полученные в работе данные по волновым характеристикам пленочного течения смеси фреонов сопоставлялись с соответствующими данными для пленок жидкого азота из работ [32, 33].

На рис. 10 приведены зависимости фазовой скорости крупных волн от числа Re для гладкой и структурированных поверхностей (точки *1–3*), сравнение с соответствующими экспериментальными данными для азота [32, 33] – точки *4* и *5*, полученными авторами для гладких поверхностей, и с зависимостью для фазовой скорости (линия *7*), полученной в соответствии с расчетом по нелинейной теории [34]. Из сравнения представленных на рисунке данных следует, что значения фазовой скорости волн для приведенных жидкостей близки друг к другу и вплоть до числа Re ≈ 400 слабо зависят от наличия текстуры на поверхности. С превышением Re > 400 данные по скорости для гладкой и трехмерной поверхностей в зависимости от степени орошения ведут себя одинаково, в то время как значения скорости волн на поверхности участка с горизонтальным оребрением оказываются ниже и не зависят от степени орошения. Это,

как было показано в [13, 16], связано с генерацией крупными волнами вторичных волн, распространяющихся по горизонтальным каналам текстуры, и общим изменением структуры волновой поверхности пленки. Расчетная зависимость [34] описывает полученные опытные данные по скоростям крупных волн при пленочном течении смеси фреонов и азота только до Re ≈ 200, в диапазоне изменения числа Рейнольдса от 200 до 800 опытные данные для смеси фреонов и жидкого азота лежат гораздо ниже.

На рис. 10 также представлены данные по скорости вторичных волн (точки *б*). Вторичные волны возникают в горизонтальных каналах текстуры при увеличении расхода жидкости на входе, когда при прохождении гребней крупных волн по поверхности часть жидкости растекается по горизонтальным канавкам, способствуя возникновению более сложной картины волнового течения жидкости. Этот фактор, как было показано выше, приводит к увеличению коэффициента теплоотдачи в режиме испарения на горизонтально оребренной структуре по сравнению с гладкой и трехмерной поверхностями в диапазоне числа Re на входе 400–700.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В режиме испарения пленки бинарной смеси фреонов коэффициент теплоотдачи для гладкой поверхности уменьшается с увеличением числа Рейнольдса классическим образом, в то время как для поперечно оребренной структуры, наоборот, возрастает. Зависимость коэффициента теплоотдачи от степени орошения для поверхности с трехмерной текстурой аналогична зависимости для гладкой поверхности с небольшой интенсификацией теплоотдачи в области пленочного числа Re = = 100–500.

Показано, что изменение структуры волновой поверхности на поперечно оребренной трубе, наблюдаемое при увеличении плотности орошения, приводит к росту коэффициента теплоотдачи в режиме испарения по сравнению с результатами для гладкой и трехмерной поверхностей. Проведено сравнение волновых характеристик пленок смеси, стекающих по гладкой и текстурированным поверхностям, а также сопоставление полученных данных с данными других авторов для азота.

Коэффициенты теплоотдачи при пузырьковом кипении для исследованных текстурированных участков оказываются существенно ниже, чем для гладкой трубы в диапазоне пленочного числа Re = 200–630. Расчетные зависимости для теплоотдачи при кипении смесей жидкости в большом объеме предсказывают значения коэффициентов теплоотдачи меньшие, чем полученные для пленочного течения жидкости по текстурированным участкам исследованной геометрии.

Проведено сравнение опытных данных по критическому тепловому потоку на гладкой и текстурированных поверхностях. Показано, что критический тепловой поток для трехмерной текстуры в диапазоне пленочного числа Re = 100–400 возрастает по сравнению с гладкой и поперечно оребренной поверхностями. Полученные данные по условиям образования устойчивых сухих пятен в режиме пузырькового кипения в исследованном диапазоне изменения числа Рейнольдса удовлетворительно описываются расчетом по модели испарения остаточного слоя.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 10-08-00645а) и ГК ФЦП № 14.518.11.7015.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Воронцов Е.Г., Тананайко Ю.М.* Теплообмен в жидкостных пленках. Киев: Техника, 1972. 194 с.
2. *Гимбутис Г.* Теплообмен при гравитационном течении пленки жидкости. Вильнюс: Москлас, 1988. 232 с.
3. *Алексеенко С.В., Накоряков В.Е., Покусаев Б.Г.* Волновое течение пленок жидкости. Новосибирск: Наука, 1992. 256 с.
4. *Чиннов Е.А., Шатский Е.Н.* Развитие искусственных возмущений в неизотермической пленке жидкости // ТВТ. 2011. Т. 49. № 6. С. 918.
5. *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.
6. *Чиннов Е.А., Абдуракипов С.С.* Длина начального термического участка в стекающей пленке жидкости при высоких числах Рейнольдса // ТВТ. 2012. Т. 50. № 3. С. 428.
7. *Thome J.R.* Engineering Data Book III. Wolverine Tube, Inc., 2004.
8. *Gambaryan-Roisman T., Stephan P.* Heat Transfer Analysis of Falling Film Evaporation on Structured Surfaces // Proc. 12th Int. Heat Transfer Conf. Grenoble, France. 2002. V. 3. P. 449.
9. *Helbig K., Nasarek R., Gambaryan-Roisman T., Stephan P.* Effect of Longitudinal Minigrooves on Flow Stability and Wave Characteristics of Falling Liquid Films // J. Heat Transfer. 2009. V. 131. № 1. P. 011601.
10. *Попов И.А., Махянов Х.М., Гуреев В.М.* Физические основы и промышленное применение интенсификации теплообмена. Казань: Центр инновац. технологий, 2009. 560 с.
11. *Christians M., Thome J.R.* Falling Film Evaporation on Enhanced Tubes. Part 1. Experimental Results for Ppool Boiling, Onset-of-Dryout and Falling Film Evaporation // Int. J. Refrigeration. 2012. V. 35. № 2. P. 300.
12. *Печеркин Н.И., Павленко А.Н., Володин О.А.* Теплоотдача при испарении стекающих пленок смеси фреонов на гладкой и структурированной поверхностях // Теплофизика и аэромеханика. 2011. Т. 18. № 4. С. 605.

13. *Павленко А.Н., Печеркин Н.И., Володин О.А.* Теплообмен и кризисные явления при кипении в пленках смесей фреонов, стекающих по оребренной трубе // Теплофизика и аэромеханика. 2012. Т. 19. № 1. С. 143.
14. *Pavlenko A.N., Lel V.V.* Heat Transfer and Crisis Phenomena in Falling Films of Cryogenic Liquid // Russ. J. Eng. Thermophys. 1997. V. 7. № 3-4. P. 177.
15. *Перепелица Б.В.* О влиянии микротекстуры на формирование пленки жидкости на вертикальной поверхности // Теплофизика и аэромеханика. 2011. Т. 18. № 3. С. 519.
16. *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.
17. *Palen J.W., Wang Qi, Chen J.C.* Falling Film Evaporation of Binary Mixtures // AIChE J. 1994. V. 40. № 2. P. 207.
18. *Leuthner S., Harun Maun A., Fiedler S., Auracher H.* Heat and Mass Transfer in Wavy Falling Films of Binary Mixtures // Int. J. Therm. Sci. 1999. V. 38. № 11. P. 937.
19. *Krupiczka R., Rotkegel A., Ziobrowski Z.* Heat Transfer to Evaporating Binary Liquid Films Inside a Vertical Tube // Proc. 5th World Conf. on Experimental Heat Transfer, Fluid Mechanics, and Thermodynamics. Thessaloniki, Greece. 2001. V. 1. P. 285.
20. *Анохина Е.В.* Кризис при кипении бинарных смесей жидкостей // ТОХТ. 2010. Т. 44. № 5. С. 568.
21. *Struve H.* Der Warmeubergang an Einen Verdampfenden Riesefilm // VDI-Forschungsheft 534. VDI-Verlag. 1969. S. 5.
22. *Fujita Y.* Boiling and Evaporation of Falling Film on Horizontal Tubes and its Enhancement on Grooved Tubes // Heat Transfer Enhancement of Heat Exchangers / Ed. by Kakaç S., Bergles A. E., Mayinger F., Yuncu H. Dordrecht, The Netherlands: Kluwer Acad. Publ., 1998. P. 325.
23. *Chun K.R., Seban R.A.* Heat Transfer to Evaporating Liquid Films // J. Heat Transfer. 1971. V. 93. № 197. P. 391.
24. *Alhusseini A.A., Tuzla K., Chen J.C.* Falling Film Evaporation of Single Component Liquids // Int. J. of Heat Mass Transfer. 1998. V. 41. № 12. P. 1623.
25. *Ягов В.В.* Теплообмен при развитом пузырьковом кипении жидкостей // Теплоэнергетика. 1988. № 2. С. 4.
26. *Yagov V.V.* Predicting Method for Heat Transfer Coefficient at Binary Mixtures Nucleate Boiling // Proc. 11th Int. Heat Transfer Conf. Kyongju, Korea. 1998. V. 2. P. 545.
27. *Гогонин И.И.* Теплообмен при кипении жидкости в пленке, движущейся под действием силы тяжести // ИФЖ. 2010. № 4. С. 821.
28. *Ueda T., Inoue M., Nagatome S.* Critical Heat Flux and Droplet Entrainment Rate in Boiling of Falling Liquid Films // Int. J. Heat Mass Transfer. 1981. V. 24. № 7. P. 1257.
29. *Mudawar I.A., Incropera T.A., Incropera F.P.* Boiling Heat Transfer and Critical Heat Flux in Liquid Films Falling on Vertically-Mounted Heat Source // Int. J. Heat Mass Transfer. 1987. V. 30. № 10. P. 2083.
30. *Lozano Aviles M.* Experiments on Falling Film Evaporation of a Water-Ethylene Glycol Mixture on a Surface with Longitudinal Grooves // Ph. D. Thesis. Berlin, Germany: Berlin University of Technology, 2007.
31. *Lel V., Stadler H., Pavlenko A., Kneer R.* Evolution of Metastable Guasi-Regular Structures in Heated Wavy Liquid Films // Heat Mass Transfer. 2007. V. 43. № 5. P. 450.
32. *Алексеенко С.В., Назаров А.Д., Павленко А.Н., Серов А.Ф., Чехович В.Ю.* Течение пленки криогенной жидкости по вертикальной поверхности // Теплофизика и аэромеханика. 1997. Т. 4. № 3. С. 307.
33. *Pavlenko A.N., Lel V.V., Serov A.F., Nazarov A.D. Matsekh A.M.* Wave Amplitude Growth and Heat Transfer in Falling Intensively Evaporating Liquid Film // J. Eng. Thermophys. 2002. V. 11. № 1. P. 7.
34. *Холпанов Л.П., Шкадов В.Я.* Гидродинамика и тепломассообмен с поверхностью раздела. М.: Наука, 1990. 271 с.