

УДК 532.51:536.248.2

Теплоотдача при испарении стекающих пленок смеси фреонов на гладкой и структурированной поверхностях*

Н.И. Печеркин¹, А.Н. Павленко^{1,2}, О.А. Володин¹

¹Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск

²Новосибирский государственный университет

E-mail: pecherkin@itp.nsc.ru

В работе представлены результаты экспериментального исследования теплообмена и гидродинамики стекающих пленок бинарных смесей фреонов R21 и R114 на поверхностях сложной геометрии. В качестве рабочих участков использовались вертикальные трубы диаметром 50 мм из алюминиевого сплава Д16Т с гладкой и структурированной поверхностями. Диапазон изменения числа Рейнольдса пленки на входе в рабочий участок $Re = 10 \div 155$. Визуализация и запись изображения волновой поверхности стекающей пленки жидкости проводились на высокоскоростную цифровую видеокамеру. В режиме испарения коэффициенты теплоотдачи на гладкой и структурированной поверхностях определяются расходом жидкости и слабо зависят от теплового потока. При малых расходах жидкости коэффициенты теплоотдачи на структурированной поверхности уменьшаются по сравнению с гладкой поверхностью за счет накопления жидкости и увеличения эффективной толщины в каналах микро-текстуры. При больших расходах жидкости изменение структуры волновой поверхности пленки приводит к увеличению коэффициентов теплоотдачи по сравнению с гладкой поверхностью.

Ключевые слова: теплообмен при пленочном течении, волновые процессы, испарение, бинарные смеси, фреоны, структурированные поверхности.

ВВЕДЕНИЕ

Пленочные течения жидкости широко используются в различных технологических процессах. Малое термическое сопротивление и большая поверхность контакта оказываются эффективными в процессах межфазного теплообмена (абсорбция, ректификация, выпаривание, кристаллизация, тепловая защита, охлаждение, закалка, очистка поверхностей и т. д.). В настоящее время опубликовано большое количество работ по теоретическому и экспериментальному исследованию гидродинамики, волновых режимов течения, конвективного теплообмена, теплообмена при испарении и кипении в стекающих пленках [1–3]. Структура волновой поверхности оказывает значительное влияние на теплоперенос. В значительной степени это относится к пленочному течению смесей различных веществ,

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант 10-08-00645а), программы Сибирского Отделения РАН (проект 5.5.3), ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007-2012 гг.» (ГК № 16.518.11.7010 “Уникальные стенды”), Правительства России для государственной поддержки научных исследований, проводимых под руководством ведущих ученых в российских вузах (грант № 11.G34.31.0035).

когда основным механизмом переноса тепла является испарение на свободной границе. При совместном тепломассопереносе через свободную границу раздела вследствие градиентов концентрации либо градиентов температур на поверхности волновых пленок возникают градиенты поверхностного натяжения, что сопровождается возникновением конвективных движений, известных под названием капиллярно-концентрационной конвекции или конвекции Марангони [4]. Под действием поверхностных сил на поверхности стекающих пленок развиваются регулярные структуры как в нагреваемой пленке [5], так и на испаряющейся пленке насыщенной жидкости [6]. Поверхностная конвекция может оказывать влияние как на интенсификацию тепломассопереноса, так и на устойчивость волновой поверхности пленки. Имеющиеся в литературе экспериментальные данные показывают значительное влияние концентрации легкокипящего компонента на интенсивность теплообмена [7]. Степень влияния массопереноса на границе раздела фаз зависит от диапазона температур кипения веществ, входящих в смесь. Минимум коэффициентов теплоотдачи наблюдается при таком составе смеси, при котором имеет место максимальная разница температур кипения и конденсации. Экспериментальных данных для анализа этого вопроса в литературе для стекающих пленок недостаточно.

В последнее время в связи с возрастающей необходимостью интенсификации теплообмена в различных технологиях всё большее применение находят поверхности с заранее заданной структурой [8, 9]. Эта существенно менее исследованная тема имеет весьма широкие практические приложения, начиная от компактных теплообменников различных масштабов до структурированных насадок в ректификационных колоннах. Коэффициенты теплоотдачи при испарении пленок на микрооребранных поверхностях могут увеличиваться на порядок по сравнению с гладкими поверхностями. Это характерно как для смесей, так и для однокомпонентных жидкостей. В работе [10] представлены результаты исследований теплоотдачи при испарении бинарных смесей на структурированных поверхностях различной геометрии с целью поиска наиболее оптимальных форм и размеров для интенсификации теплообмена. В работах [11–13] приводятся результаты теоретических и экспериментальных исследований течения пленок жидкости на гофрированных структурированных поверхностях, используемых в дистилляционных колоннах для разделения смесей. В данной работе представлены результаты экспериментального исследования теплообмена и гидродинамики стекающих пленок бинарной смеси фреонов на поверхностях сложной геометрии.

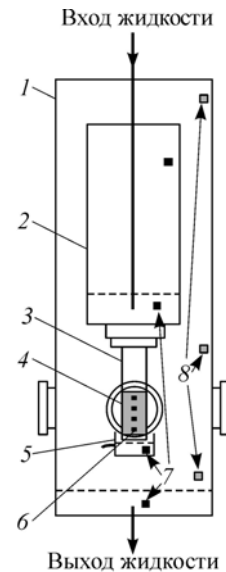
ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ МЕТОДИКИ

Подробное описание экспериментальной установки приведено в работе [14]. На рис. 1 приведена схема колонны без вспомогательного оборудования. Корпус колонны 1, в котором размещаются экспериментальные участки, представляет собой цилиндр из нержавеющей стали внутренним диаметром 270 мм и высотой 1500 мм. Через три оптических окна диаметром 60 мм осуществляется визуализация течения и видеосъемка высокоскоростной камерой. От теплопритоков со стороны боковой поверхности, а также верхней и нижней крышек колонна защищена слоем теплоизолирующего материала.

Сменные рабочие участки крепятся на дне бака 2, в который подается жидкость из сосуда для хранения. В качестве рабочей жидкости использовалась смесь фреонов R21 и R114 различного состава. Из бака постоянного уровня жидкость через щелевой распределитель поступает на внешнюю поверхность цилиндрического рабочего участка 3. Далее жидкость стекает в измерительный сосуд 5 и затем вниз колонны, откуда по трубопроводу возвращается в сосуд для хранения. Внешний

Рис. 1. Схема экспериментальной установки.

1 — корпус колонны, 2 — бак постоянного уровня, 3 — сменные рабочие участки, 4 — зона расположения нагревательного элемента, 5 — измерительный сосуд, 6 — места установки термопар для измерения температуры стенки, 7 — места установки терморезисторов для измерения температуры жидкости, 8 — места установки терморезисторов для измерения температуры паровой фазы.



вид рабочего участка со щелевым распределителем показан на рис. 2. Ширина распределительной щели может изменяться в пределах $50 \div 200$ мкм путем установки вставки соответствующего размера.

Течение пленки бинарной смеси фреонов R114/R21 с различной концентрацией легкокипящего компонента (фреон R114) осуществлялось по наружной поверхности вертикальных рабочих участков цилиндрической формы длиной ≈ 250 мм, диаметром 50 мм. Рабочие участки изготовлены из алюминиевого сплава Д16Т. Число Рейнольдса пленки на входе в рабочий участок изменялось в диапазоне от 10 до 170. Число Рейнольдса определялось по формуле $Re = G/\pi d \mu$, где G — массовый расход, кг/с, d — наружный диаметр трубы, м, μ — динамическая вязкость, Па·с. В экспериментах использовались трубы с гладкой и структурированной поверхностями.

Рабочий участок со структурированной поверхностью с горизонтальным оребрением показан на рис. 2. Он имеет гладкий участок гидродинамической стабилизации длиной 70 мм, зону с оребрением длиной 105 мм и выходной гладкий участок длиной 10 мм. Толщина стенки трубы — 1,5 мм, шаг микротекстуры — 1,5 мм, глубина — 0,4 мм. Профиль оребрения имеет трапецевидную форму со скругленными вершинами и впадинами. Для обогрева рабочего участка использовался нагревательный элемент, устанавливаемый внутрь рабочего участка посередине зоны оребрения. Корпус нагревателя представляет собой цилиндр из дюралюминия длиной 70 мм, на наружную поверхность которого через слой стеклоткани намотан нагреватель из константановой ленты длиной 2 м, шириной 4 мм, толщиной 25 мкм. Снаружи на корпус нагревателя с константановой лентой через слой стеклоткани надевается разрезная втулка из такого же материала с высокой теплопроводностью.



Упругая разрезная втулка обеспечивает тепловой контакт между стенкой рабочего участка и спиралью нагревателя. Величина плотности теплового потока q во время эксперимента варьировалась от 0 до 5 Вт/см^2 . Утечки тепла с торцов обогреваемого участка составляли около 10 %. Верхняя граница зоны тепловыделения находилась на расстоянии 87 мм от распределителя жидкости, что обеспечивало течение пленки жидкости по тепловыделяющей поверхности в режиме гидродинамической

Рис. 2. Внешний вид рабочего участка.

1 — бак постоянного уровня, 2 — корпус щелевого распределителя, 3 — сменные вставки для изменения щелевого зазора, 4 — цилиндрический рабочий участок, 5 — измерительный сосуд.

стабилизации. Рабочий участок с гладкой поверхностью имеет аналогичную конструкцию. Эксперименты проводились в стационарных условиях при постоянном давлении. Давление изменялось в диапазоне $p = 1,6 \div 2,1$ бар.

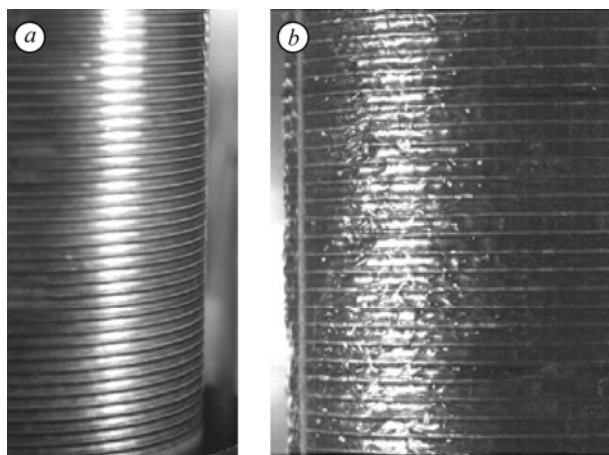
Циркулирующая по замкнутому контуру бинарная смесь фреонов во время эксперимента находилась в условиях насыщения. Температура жидкости и пара в различных участках рабочего объема экспериментальной установки (рис. 1) измерялась платиновыми терморезисторами HEL-700, давление — манометром Метран-100. Для измерения локальной температуры поверхности по высоте и ширине тепловыделяющего участка трубы были установлены медьконстантановые термопары с диаметром проводов 80 мкм. На гладкой трубе было установлено пять термопар в трех сечениях по высоте с шагом 20 мм. Расстояние между термопарами по окружности составляло также 20 мм. На структурированной трубе с горизонтальным оребрением было установлено четыре термопары на одной образующей с шагом в вертикальном направлении 17 мм. Рабочие спаи термопар заделаны в стенке трубы заподлицо с наружной поверхностью. Перепад температур на толщине слоя, равного глубине заделки термопар, составляет меньше 0,1 К, что меньше погрешности измерения температуры. Холодные спаи термопар были погружены в слой жидкого фреона в нижней части установки. Температура в месте расположения холодных спаев измерялась платиновым термометром сопротивления HEL-700. Погрешность измерения температур составляла 0,2 К.

Для определения состава смеси фреонов использовался метод газовой хроматографии. Отбор проб жидкой фазы смеси фреонов производился в баке постоянного уровня (исходный состав смеси), в измерительном сосуде на выходе из рабочего участка, а также на дне корпуса колонны. В экспериментах всегда наблюдалось уменьшение концентрации легкокипящего компонента на выходе из обогреваемого участка, зависящее от расхода жидкости и тепловой нагрузки. Начальная концентрация летучего компонента в жидкой фазе смеси C_x изменялась в диапазоне от 4 до 16,6 %. Концентрация выражена в мольных долях — в виде отношения количества молей летучего компонента к общему количеству молей смеси. Расчет теплофизических свойств смеси фреонов проводился по измеренному составу и давлению в установке.

Визуализация и запись изображения волновой поверхности пленки осуществлялись с помощью высокоскоростной цифровой видеокамеры Phantom 7,0 с частотой 1000 кадров в секунду.

ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ТЕЧЕНИЯ ПЛЕНКИ

На рис. 3–6 показаны фрагменты режимов течения пленки на гладкой и на структурированной поверхностях. На рис. 3 показано течение смеси фреонов на структурированной поверхности без подвода тепла.



При малых плотностях орошения каналы структурированной поверхности оказываются заполненными жидкостью (рис. 3, *a*). При больших плотностях орошения при прохождении гребня волны часть

Рис. 3. Течение пленки бинарной смеси фреонов на структурированной поверхности.

$Re = 25$ (*a*), 105 (*b*). Начальная концентрация $C_x = 10\%$, $q = 0$.

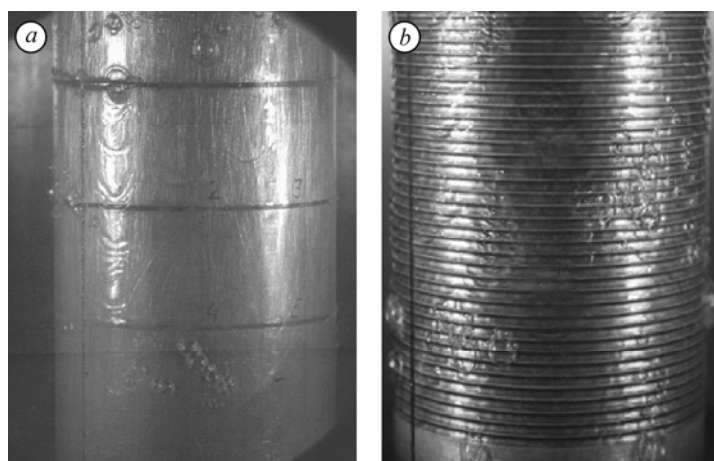


Рис. 4. Течение пленки бинарной смеси фреонов на гладкой (а) и структурированной (b) поверхностях. $Re = 52$, $q = 1,6 \text{ Вт/см}^2$, начальная концентрация $C_x = 10\text{--}16\%$.

жидкости растекается по горизонтальным каналам, образуя сложное трехмерное волновое течение жидкости с более мелким масштабом волн (рис. 3, b). Растекание жидкости от двух соседних волн может происходить во встречных направлениях, порождая возникновение новых волн другого масштаба. Движение жидкости по микротекстуре в горизонтальном направлении может возникать также от растущих на поверхности паровых пузырей. В работе [15] на основе моделирования течения жидкости по гофрированной поверхности было показано, что при определенных сочетаниях параметров микротекстуры и чисел Рейнольдса возможно заполнение горизонтальных каналов гофрированной поверхности. Если шаг микротекстуры имеет размер порядка капиллярной постоянной или меньше ее, как в нашем случае, то каналы будут заполнены жидкостью. Экспериментально такой режим наблюдался в работе [16] при течении этанола на поверхности с мелкой микротекстурой.

На рис. 4 показано течение смеси фреонов на гладкой и структурированной трубах при умеренной плотности теплового потока, соответствующей переходу от режима испарения к пузырьковому кипению. На поверхности стекающих пленок отчетливо видны регулярные волны. Частота и скорость движения крупных волн определялись по результатам обработки видеофильмов.

На гладкой поверхности кипение зарождается, как правило, в гребнях волн в нижней части рабочего участка. При увеличении теплового потока граница начала пузырькового кипения перемещается вверх по обогреваемой поверхности. На рис. 5, a видно, что граница начала пузырькового кипения практически совпадает

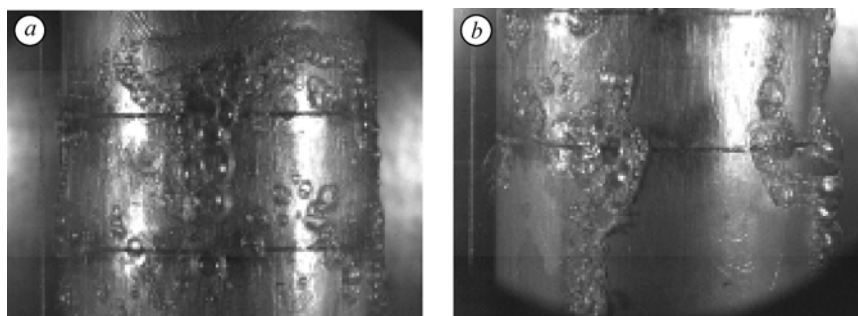


Рис. 5. Кипение на гладкой поверхности: $Re = 154$, начальная концентрация $C_x = 8,4\%$. a — образование кипящих струй в верхней части обогреваемого участка, $q = 2,9 \text{ Вт/см}^2$, b — появление устойчивых сухих пятен в нижней части трубы, $q = 5,1 \text{ Вт/см}^2$.



Рис. 6. Кипение на структурированной поверхности.

$$Re = 105, q = 2.9 \text{ Вт/см}^2, C_x = 10 \%$$

с положением верхней кромки нагревателя. В нижней части трубы жидкость стекает в виде отдельных кипящих струй (рис. 5, *b*). В области между струями видны сухие пятна. На структурированной поверхности при больших плотностях орошения жидкость также стекает в виде кипящих струй (рис. 6). Кипящие струи представляют собой конгломераты крупных паровых пузырей. В зоне между кипящими струями, несмотря на значительно большее количество жидкости, накапливаемое в каналах оребрения структурированной поверхности, при больших тепловых потоках также создаются условия для образования сухих пятен и возникновения кризиса. Результаты измерения коэффициентов теплоотдачи в режиме пузырькового кипения и данные по условиям образования сухих пятен приведены в работе [14].

СОСТАВ СМЕСИ В ИСПАРЯЮЩЕЙСЯ ПЛЕНКЕ ЖИДКОСТИ

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. График изменения относительного расхода в пленке на выходе рабочего участка $(Q^{\text{вых}}/Q^{\text{вх}})_{\text{полн}}$ и количества летучего компонента в жидкой фазе $(N^{\text{вых}}/N^{\text{вх}})_{\text{R114}}$ в зависимости от теплового потока и числа Рейнольдса приведен на рис. 7. Эти данные получены на основе измерений расхода жидкости на входе в рабочий участок и состава смеси до и после рабочего участка. Расход жидкости на выходе рабочего участка рассчитан при условии, что все подведенное тепло расходуется на испарение жидкости. Количество летучего компонента в смеси на выходе из рабочего участка уменьшается быстрее, чем общий расход жидкости в пленке. Изменение концентрации летучего компонента в бинарной смеси приводит к изменению физических свойств, и, что особенно важно для пленочных течений, к изменению поверхностного натяжения. Если при

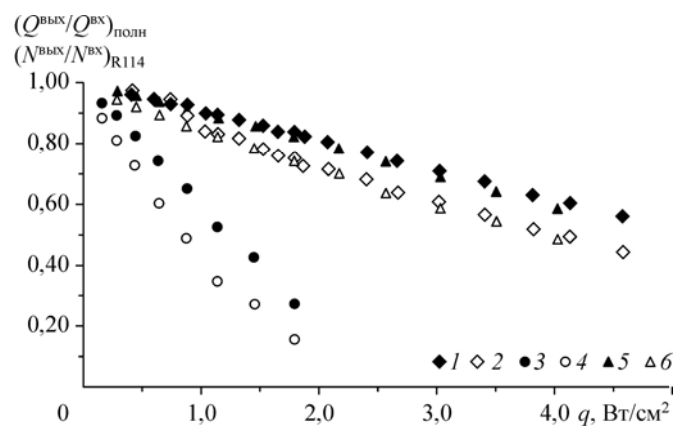


Рис. 7. Изменение относительного расхода в пленке на выходе рабочего участка.

Re = 105: 1, 5 — общий расход; 2, 6 — количество летучего компонента; Re = 26: 3 — общий расход; 4 — количество летучего компонента. 1, 2: $C_x = 8,8 \%$; 3–6: $C_x = 16,4 \%$.

уменьшении концентрации летучего компонента поверхностное натяжение увеличивается, то такая смесь фреонов считается положительной. При испарении положительной смеси поверхность пленки стабилизируется (см. работу [10]). Используемая в экспериментах смесь фреонов R114/R21 является положительной. При уменьшении концентрации легкокипящего компонента на поверхности пленки до равновесного значения увеличение поверхностного натяжения для данной смеси может достигать 4÷6 %. Неодинаковое испарение жидкости в слоях разной толщины (в гребнях волн, в остаточном слое, на вершинах и во впадинах ребер на структурированной поверхности) может приводить к возникновению градиентов поверхностного натяжения вдоль свободной поверхности пленки. Изменение температуры в таком диапазоне изменения концентрации составляет немногим более 1 градуса, поэтому влияние термоконвекции будет несущественным.

ТЕПЛОБМЕН В СТЕКАЮЩИХ ПЛЕНКАХ

При расчете коэффициентов теплоотдачи при кипении и испарении бинарных смесей одним из основных вопросов является выбор определяющей температуры жидкости [17, 18]. При обработке экспериментальных данных для жидкостей, находящихся в состоянии равновесия при давлении собственных паров, обычно используется температура насыщения жидкости. На рис. 8 показаны экспериментальные данные по температурам жидкой и паровой фаз при одном расходе жидкости и различных тепловых потоках. Вследствие уменьшения концентрации легкокипящего компонента в стекающей пленке температура насыщения на выходе из рабочего участка увеличивается (точки 2). Разность температур жидкости до и после обогреваемого участка зависит от величины расхода жидкости и теплового потока. В условиях проведения экспериментов эта разность температур может достигать одного и более градусов. При изменении температуры стекающей жидкости практически синхронно изменяется температура в паровом объеме установки (точки 3). Измеренные значения температуры жидкости удовлетворительно совпадают с расчетной температурой насыщения (линия кипения на фазовой диаграмме). Пар над зеркалом испарения в нижней части установки находится в состоянии равновесия с жидкостью. Измеренная температура пара в этой части установки, соответствующая состоянию равновесия, удовлетворительно совпадает с линией насыщения паровой фазы (линия конденсации на фазовой диаграмме).

При расчете среднего по длине коэффициента теплоотдачи температура насыщения принималась как среднее значение между измеренными температурами жидкости на входе и на выходе рабочего участка. При расчете локальных

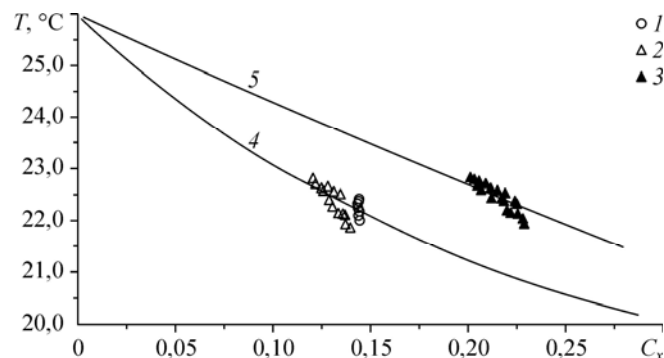


Рис. 8. Диаграмма равновесия смеси фреонов R21/R114 при $p = 1,8$ бар. Температура: на входе (1) и на выходе (2) жидкости из рабочего участка; паровой фазы над зеркалом испарения (3); насыщения жидкой (линия кипения) (4) и паровой (линия конденсации) (5) фаз.

коэффициентов теплоотдачи температура насыщения в каждой точке рассчитывалась по линейной интерполяции между входом и выходом. Локальные коэффициенты теплоотдачи рассчитывались по разности между измеренной температурой стенки T_w и температурой насыщения смеси T_s в данном сечении: $\alpha = q/(T_w - T_s)$.

Результаты измерения распределения локальных коэффициентов теплоотдачи по длине рабочего участка со структурированной поверхностью для фиксированного числа Рейнольдса на входе в рабочий участок показаны на рис. 9. При малых значениях тепловых потоков основным механизмом отвода тепла является испарение. В этом режиме коэффициент теплоотдачи практически не зависит от теплового потока. При достижении необходимого для закипания перегрева стенки при $q \geq 1$ Вт/см² в нижней части трубы возникает режим пузырькового кипения, что сопровождается увеличением локальных коэффициентов теплоотдачи. В верхней части обогреваемого участка сохраняется режим испарения с практически неизменной величиной коэффициента теплоотдачи. При увеличении тепловой нагрузки зона начала закипания перемещается вверх по потоку. В результате испарения локальный расход жидкости на выходе рабочего участка уменьшается до 20÷40 % от начального в зависимости от начального расхода и теплового потока. При возникновении сухих пятен в нижней части обогреваемой поверхности температура стенки резко возрастает, коэффициент теплоотдачи соответственно падает. Для данных условий проведения эксперимента этот режим наступает при тепловом потоке $q \approx 3,7$ Вт/см² (рис. 9). Повышение температуры стенки в данном сечении зависит от того, насколько близко от места установки термопары возникает сухое пятно. В верхней части трубы сохраняется режим пузырькового кипения с высокими значениями локальных коэффициентов теплоотдачи. При последующем уменьшении теплового потока от максимальных значений до нуля наблюдается гистерезис. Он выражается в том, что коэффициенты теплоотдачи при одинаковых тепловых потоках при уменьшении тепловой нагрузки становятся выше, чем при ее увеличении, и режим пузырькового кипения за счет парообразования на готовых центрах сохраняется при меньших тепловых потоках.

Результаты обработки полученных в экспериментах данных по теплоотдаче в режиме испарения на гладкой и на структурированной поверхностях показаны на рис. 10, 11. При расчете безразмерного коэффициента теплоотдачи

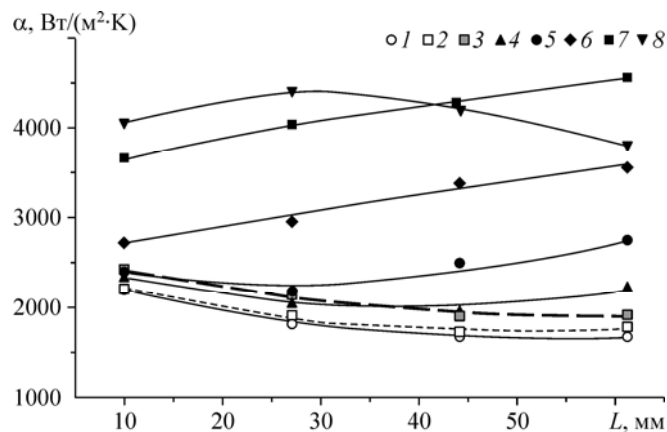


Рис. 9. Распределение локального коэффициента теплоотдачи по длине структурированной трубы.

$Re = 155$, $C_x = 14,4\%$. $q = 0,33$ (1), $0,52$ (2), $0,9$ (3), $1,2$ (4), $1,5$ (5), $2,3$ (6), $3,2$ (7), $3,7$ (8) Вт/см².

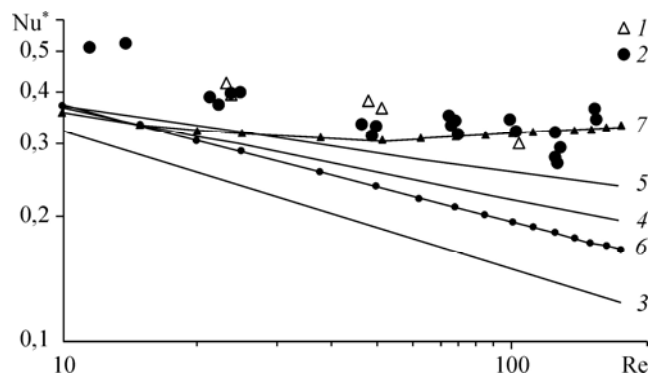


Рис. 10. Безразмерный коэффициент теплоотдачи для режима испарения пленки бинарной смеси фреонов на гладкой поверхности.

$C_x = 8,8$ (1), 16,6 (2) %, решение Нуссельта (3), корреляции [19] (4) и [20] (5), данные экспериментов [21] (6) и [22] (7).

$Nu^* = \alpha(v^2/g)^{1/3}/\lambda$ использовался средний по длине коэффициент теплоотдачи. Число Рейнольдса рассчитано по среднему расходу жидкости в пленке между входом и выходом из рабочего участка. В режиме испарения коэффициенты теплоотдачи на гладкой и на структурированной поверхностях практически не зависят от теплового потока. На рис. 10 приведены данные по теплоотдаче на гладкой трубе в диапазоне изменения теплового потока от 0,3 до 0,9 Вт/см². Эксперименты проведены при двух значениях начальной концентрации летучего компонента — 8,8 и 16,6 %. Влияние состава бинарной смеси в исследованном диапазоне изменения не наблюдается. В диапазоне изменения числа Рейнольдса 11÷50 осредненные по длине коэффициенты теплоотдачи на гладкой трубе уменьшаются с увеличением числа Рейнольдса по такому же закону, как предсказывают известные корреляционные зависимости, полученные в экспериментах на воде и других вязких однокомпонентных жидкостях [19, 20]. Абсолютные значения коэффициентов теплоотдачи лежат примерно на 30 % выше, чем рассчитанные по зависимости [20]. В диапазоне изменения числа Рейнольдса 75÷130 влияние расхода жидкости на коэффициенты теплоотдачи уменьшается, а затем наблюдается увеличение значений коэффициентов теплоотдачи. Диапазон чисел Рейнольдса $75 \leq Re \leq 400$ в работе [1] определен как переходной режим к турбулентному течению. В турбулентном режиме течения коэффициенты теплоотдачи увеличиваются при возрастании на числа Рейнольдса. В работе [18] экспериментально показано, что существует квазиавтомодельная область чисел Рейнольдса $75 \leq Re \approx 400$, в которой коэффициент теплоотдачи не зависит от этого параметра. Число Нуссельта в этом диапазоне чисел Рейнольдса принимает минимальное значение, а затем при наступлении турбулентного режима начинает расти. Наблюдаемый в наших экспериментах характер изменения коэффициентов теплоотдачи в диапазоне изменения числа Рейнольдса 75÷150 совпадает с приведенными выше зависимостями (рис. 10).

На этом же рисунке отражены результаты экспериментов по исследованию теплоотдачи при течении фреона R11 на длинных вертикальных трубах [21] и на пучке горизонтальных гладких и оребренных труб [22]. В ламинарно-волновой области течения пленки локальные коэффициенты теплоотдачи при течении фреона R11 по вертикальной трубе обобщаются зависимостью $Nu^* = 0,71Re^{-0,282}$, показанной на рис. 10 линией 6. Результаты экспериментов, приведенные в [21], показывают, что чем больше длина пробега пленки L , тем раньше начинается переход к турбулентному режиму течения ($Re_t \approx 200$ для $L \approx 400$ мм, и $Re_t \approx 50$ для

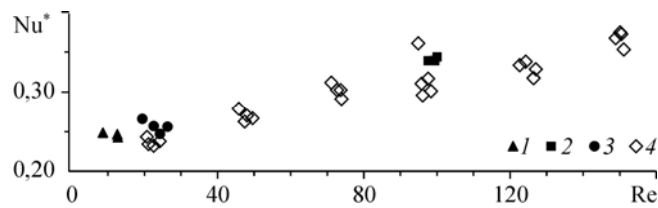


Рис. 11. Безразмерный коэффициент теплоотдачи для режима испарения пленки бинарной смеси фреонов на структурированной поверхности.
 $C_x = 4,4$ (1), 5,8 (2), 10 (3), 14,5 (4) %.

$L \approx 1200$ мм). Результаты по теплоотдаче при испарении фреона R11 на горизонтальных гладких трубах диаметром 25 мм, полученные в [22], показаны на рис. 10 линией 7. В диапазоне малых чисел Рейнольдса 10÷20 экспериментальные данные по теплоотдаче при испарении фреона R11 [21, 22] на горизонтальных и вертикальных трубах удовлетворительно совпадают между собой и с обобщающими зависимостями [19, 20]. В диапазоне чисел Рейнольдса 50÷150 полученные нами экспериментальные данные по теплоотдаче при испарении бинарной смеси удовлетворительно совпадают с данными по испарению фреона R11 на пучке горизонтальных труб [22].

Зависимость безразмерного коэффициента теплоотдачи на вертикальной трубе с горизонтальным оребрением в режиме испарения показана на рис. 11. В отличие от течения на гладкой поверхности безразмерный коэффициент теплоотдачи на структурированной поверхности в исследованном диапазоне расходов практически линейно растет с увеличением числа Рейнольдса. Начальная концентрация летучего компонента в смеси изменялась в диапазоне от 4,4 до 14,5 %. Влияние изменения концентрации в данном диапазоне на теплообмен в режиме испарения незначительно.

На рис. 12 показано сравнение безразмерных коэффициентов теплоотдачи на гладкой и на структурированной поверхностях. При малых расходах жидкости коэффициент теплоотдачи во втором случае ниже, чем в первом. Это связано с тем, что заполнение каналов структурированной поверхности приводит к увеличению эффективной толщины слоя жидкости на поверхности трубы (рис. 3, а) и, соответственно, к увеличению термического сопротивления. При возрастании числа Рейнольдса на поверхности пленки развиваются трехмерные волны с интенсивным движением жидкости в горизонтальных каналах оребренной поверхности. Изменение характеристик волнового течения пленки при больших числах Рейнольдса (рис. 3, б) приводит к интенсификации теплообмена в режиме испарения по сравнению с гладкой поверхностью.

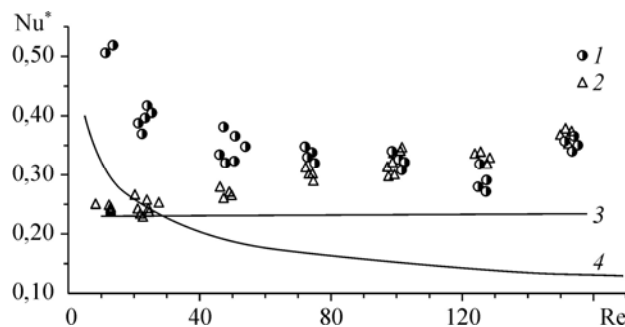


Рис. 12. Сравнение интенсивности теплоотдачи при испарении стекающих пленок. Поверхности: 1 — гладкая, 2 — структурированная; 3 — минимальное число Нуссельта [18]; 4 — решение Нуссельта.

Как уже отмечалось ранее, в квазиавтомодельной области теплообмена в ламинарно-волновых режимах стекания пленки и при испарении, и при конденсации имеется минимальное значение числа $Nu^* = 0,527Ka^{-1/30}$, где Ka — число Капицы, которое зависит только от рода жидкости [18]. Это утверждение базируется на консервативных свойствах толщины остаточного слоя в стекающей пленке. Рассчитанное минимальное значение числа Нуссельта для исследуемой смеси фреонов приведено на рис. 12. Видно, что число Нуссельта на гладкой трубе приближается к этому значению при числе Рейнольдса $Re \approx 120 \div 130$. На структурированной поверхности с горизонтальным оребрением число Нуссельта равно минимальному безразмерному коэффициенту теплоотдачи в диапазоне изменения числа Рейнольдса от 8 до 25. По-видимому, характерным размером, определяющим интенсивность теплопереноса в данном диапазоне расходов, является толщина остаточного слоя, определяемая глубиной впадин горизонтальных каналов оребренной трубы на структурированной поверхности. Здесь же приведен расчет теплоотдачи в пленке по Нуссельту.

В литературе имеются данные, которые показывают многократную интенсификацию теплообмена на структурированных поверхностях [10, 22, 23]. Течение пленки жидкости в этих работах осуществлялось на пластинах и на горизонтальных трубах с вертикально ориентированной структурой. Результаты моделирования теплообмена и результаты экспериментов при течении пленки фреона R11 на поверхности горизонтальных труб с различной геометрией оребрения показывают, что коэффициенты теплоотдачи в ламинарно-волновом режиме течения увеличиваются с увеличением плотности орошения. Это совпадает с полученными результатами настоящей работы. Основным механизмом увеличения теплоотдачи является периодическое смачивание ребер на верхней части оребренной трубы волнами возмущения и испарением очень тонкой пленки, возникающей в результате этого процесса. Коэффициенты теплоотдачи в режиме пузырькового кипения на такой поверхности также существенно возрастают по сравнению с гладкой поверхностью. В работе [23] разработана модель теплоотдачи, основанная на испарении микрослоя жидкости на вершинах ребер в верхней части горизонтальной трубы. Согласно этой модели, интенсификация теплообмена в режиме испарения ламинарно-волновой пленки фреона R11 на горизонтальной оребренной трубе может достигать восьмикратной величины.

Как следует из полученных в данной работе экспериментальных результатов, коэффициенты теплоотдачи при течении пленки на вертикальной структурированной поверхности выбранной геометрии оказываются ниже, чем на гладкой поверхности. В исследованном диапазоне изменения расходов в стекающей пленке горизонтальные каналы оребренной трубы оказываются заполненными жидкостью. Капиллярные силы недостаточны, чтобы организовать дренаж жидкости из каналов и уменьшить толщину пленки на вершинах ребер. Интенсификация теплоотдачи в режиме испарения наблюдается только в условиях развития трехмерной волновой структуры на поверхности стекающей пленки в области более высокой степени орошения.

Для интенсификации теплообмена на поверхности с горизонтальными ребрами необходимо создание специальных дренажных каналов, препятствующих накоплению жидкости во впадинах ребер.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Получены количественные данные по изменению состава бинарной смеси в стекающих пленках в условиях испарения и кипения. Показано, что количество летучей компоненты в стекающей жидкости изменяется значительно быстрее, чем общий расход жидкости в пленке.

В режиме испарения коэффициенты теплоотдачи на гладкой и структурированной поверхностях определяются расходом жидкости и слабо зависят от теплового потока. При малых расходах жидкости коэффициенты теплоотдачи уменьшаются на структурированной поверхности по сравнению с гладкой поверхностью за счет накопления жидкости и увеличения эффективной толщины в каналах микротекстуры. При больших расходах жидкости изменение структуры волновой поверхности пленки приводит к увеличению коэффициентов теплоотдачи по сравнению с гладкой поверхностью. Влияние возникающего в каналах структурированной поверхности буферного слоя при малых расходах жидкости оказывает более существенное негативное влияние на теплоотдачу, чем положительное влияние волнового движения жидкости, наблюдаемое при больших расходах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алексеев С.В., Накоряков В.Е., Покусаев Б.Г. Волновое течение пленок жидкости. Новосибирск: Наука, 1992. 256 с.
2. Воронцов Е.Г., Тананайко Ю.М. Теплообмен в жидкостных пленках. Киев: Техника, 1972. 194 с.
3. Гимбутис Г. Теплообмен при гравитационном течении пленки жидкости. Вильнюс: Мокслас, 1988. 232 с.
4. Холпанов Л.П., Шкадов В.Я. Гидродинамика и тепломассообмен с поверхностью раздела. М.: Наука, 1990. 271 с.
5. Зайцев Д.В., Чиннов Е.А., Кабов О.А., Марчук И.В. Экспериментальное исследование волнового течения пленки жидкости по нагреваемой поверхности // Письма в ЖТФ. 2004. Т. 30, вып. 6. С. 31–37.
6. Pavlenko A.N. Hydrodynamics and heat transfer in boiling and evaporation in cryogenic falling films and applications // Selected Trans. of NATO Advanced Study Inst. Kluwer Academic Publishers. Netherlands. 2003. Vol. 99. P. 181–200.
7. Palen J.W., Wang Q., Chen J.C. Falling film evaporation of binary mixture // AIChE J. 1994. Vol. 40, No 2. P. 207–214.
8. Thome J.R. Engng. Data Book III. Wolverine Tube, Inc. 2004.
9. Hesselgreaves J.E. Compact heat exchanger: selection, design and operation. Pergamon. 2001.
10. Lozano Aviles M. Experiments on falling film evaporation of a water-ethylene glycol mixture on a surface with longitudinal grooves // Ph. D. thesis. Berlin University of Technology, Berlin, Germany. 2007. ISBN 978-3-89963-527-0.
11. Valluri P., Matar O.K., Mendes M.A., Hewitt G.F. Modelling hydrodynamics mass transfer in structured packings — a review // Multiphase Sci. and Technology. 2002. Vol. 14, No 4. P. 303–348.
12. Трифонов Ю.Я. Устойчивость и нелинейные волновые режимы при стекании пленок по гофрированной поверхности // ПМТФ. 2007. Т. 48, № 1. С. 110–120.
13. Pavlenko A., Pecherkin N., Chekhovich V., Volodin O. Hydrodynamics in falling liquid films on surfaces with complex geometry // Microgravity Sci. Technology. Vol. 21, Suppl. Iss. 1. 2009. P. 207–213.
14. 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 (принято в печать).
15. Trifonov Yu.Ya. Stability of a viscous liquid film flowing down a periodic surface // Int. J. of Multiphase Flow. 2007. Vol. 33, No 11. P. 1186–1204.
16. Перепелица Б. В. О влиянии микротекстуры на формирование пленки жидкости на вертикальной поверхности // Теплофизика и аэромеханика. 2011. Т. 18, № 3. С. 519–522.
17. Yagov V.V. Predicting method for heat transfer coefficient at binary mixtures nucleate boiling // Proc. of the 11th Intern. Heat Transfer Conf. Kyongju, Korea. August 23–28, 1998. Vol. 2. P. 545–550.
18. Дорохов А.Р., Гогонин И.И. К расчету теплообмена при стекании тонких пленок жидкости по вертикальной поверхности // Изв. СО АН СССР. Сер. техн. наук. 1989. Вып. 5. С. 15–20.
19. Чжунь К., Себан Р. Теплоотдача к испаряющимся жидким пленкам // Труды Америк. общества инж.-мех. Сер. С. Теплопередача. 1971. Т. 93, № 4. С. 71–77.
20. Alhusseini A.A., Tuzla K. and Chen J.C. Falling film evaporation of single component liquids // Int. J. of Heat Mass Transfer. 1998. Vol. 41, No 12. P. 1623–1632.
21. Struve H. Der Wärmeübergang an einen verdampfenden Riesefilm // VDI-Forschungsheft 534. VDI-Verlag. 1969. P. 5–36.
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 S. Kakaç, A. E. Bergles, F. Mayinger, H. Yuncu. Kluwer Academic Publishers. Dordrecht, Netherlands. 1998. P. 325–346.
23. Gambaryan-Roisman T., Stephan P. Heat transfer analysis of falling film evaporation on structured surfaces // Proc. of the 12th Intern. Heat Transfer Conf., Grenoble, France, August 2002. Vol. 3. P. 449–454.

Статья поступила в редакцию 28 марта 2011 г.