

УДК 536.248

Теплообмен и кризисные явления при кипении в пленках смесей фреонов, стекающих по оребренной трубе*

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

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

²*Новосибирский государственный университет*

E-mail: volodin@ngs.ru

В работе представлены результаты исследования гидродинамики, теплообмена и кризисных явлений в стекающих по поверхностям различной геометрии ламинарно-волновых пленках жидкости. Рабочей жидкостью служила смесь фреонов R21/R114 с начальной концентрацией легкокипящей компоненты 4–16,6 %. Пленочное число Рейнольдса на входе в экспериментальный участок варьировалось от 60 до 700. Плотность теплового потока изменялась в диапазоне 0–5 Вт/см². Визуализация и запись изображения волновой поверхности пленки стекающей жидкости, образования сухих пятен, проводились на высокоскоростную цифровую видеокамеру. Приведены результаты изучения волновой структуры поверхности пленки, измерения коэффициентов теплоотдачи в режиме кипения и критических тепловых потоков при течении пленки по гладкой и структурированной поверхностям.

Ключевые слова: теплообмен, пленочное течение, пузырьковое кипение, кризисные явления, сухие пятна, структурированные поверхности, фреоны, бинарные смеси.

Введение

Пленочные течения жидкостей, являясь эффективным средством межфазного теплообмена, широко используются в различных технологических процессах: абсорбция, ректификация, выпаривание, охлаждение и т. д. В последнее время в связи с тем, что теплообменные поверхности с заданной структурой находят все большее применение в различных технологиях [1], вызывает интерес изучение теплообмена и гидродинамики пленочного течения на таких поверхностях. Многочисленные теоретические и экспериментальные исследования говорят о влиянии структуры поверхности на теплообмен и устойчивость пленочного течения. Однако систематизированные данные для маловязких высокосмачивающих жидкостей при их течении по поверхностям сложной геометрии в литературе практически отсутствуют. В работах [2–6] приведены некоторые результаты исследований

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант 10-08-00645), Правительства РФ (грант 11.G34.31.0035), Правительства Новосибирской области (грант на 2012 г.), ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007-2012 гг.» (ГК № 16.518.11.7010 «Уникальные стенды») и программы Отделения ОЭММПУ РАН (проект 5.5.3).

теплообмена и гидродинамики пленочного течения на поверхностях с различной структурой.

В работе [2] приводится модельный расчет теплоотдачи, проведенный для ламинарно-волновых пленок фреона R11, стекающих по вертикальной медной пластине с треугольными канавками (ширина канавки — 0,5 мм, угол между гранями — 60°) в режиме испарения. Приведенный авторами анализ результатов показывает, что расчетные значения коэффициента теплоотдачи для рифленой поверхности данного типа превышают значения, рассчитанные по модели Нуссельта для гладкой стенки, до 8 раз. Это согласуется с ранее опубликованными результатами экспериментального исследования [3], авторы которого, изучавшие теплоотдачу в пленках на горизонтальных трубах с треугольными канавками, ориентированными по течению пленки (ширина — 0,5 мм, угол между гранями — 60°), сообщают о десятикратном возрастании коэффициента теплоотдачи. Также авторами [2] было показано, что продольные канавки, ориентированные вдоль течения, оказывают стабилизирующее влияние на его устойчивость. Результаты близких по содержанию теоретических и экспериментальных исследований течения пленок жидкостей на теплоотдающих структурированных поверхностях, предназначенных для различных приложений, можно найти также в работах [4–6]. Результаты исследования теплообмена при испарении и кипении смесей представлены в работах [7–10].

В работе [7] авторы показывают, что при увеличении концентрации легкокипящего компонента коэффициент теплоотдачи уменьшается. Анализируя свои данные на смесях вода–этиленгликоль и пропиленгликоль, а также данные [8], полученные для смеси фреонов R11/R113, авторы [7] делают вывод, что минимум коэффициентов теплоотдачи наблюдается при таком составе смеси, при котором имеет место максимальная разница между температурами насыщения жидкой и паровой фаз на диаграмме равновесия. Авторы работы [9] исследовали испарение пленок смесей метанол–вода, изопропанол–вода и метанол–изопропанол внутри вертикальной трубы. Эксперименты показали, что для смесей с большой разницей между температурами кипения и конденсации с увеличением теплового потока растет влияние массопереноса на коэффициент теплоотдачи. 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 в настоящий момент недостаточно. В случае структурированных поверхностей такие исследования практически отсутствуют.

Авторы работы [10] предложили теоретическую модель тепломассопереноса при пузырьковом кипении бинарных смесей. В модели учитывались такие характерные для смесей эффекты, как диффузионный массоперенос и конвекция Марангони. Расчет был проведен для смесей углеводородов, при этом результаты оказались в хорошем согласии с экспериментальными данными.

В настоящей работе приведены результаты изучения волновой структуры поверхности пленок, измерения коэффициентов теплоотдачи в режиме пузырькового кипения пленок смесей. Исследована динамика возникновения сухих пятен, получены величины соответствующих критических тепловых потоков, приведены результаты измерения мольной концентрации компонент смеси R114/R21 для стекающих пленок смесей фреонов на наружной поверхности гладкой и оребренной труб. Данные авторов по коэффициентам теплоотдачи на трубах с гладкой и структурированной поверхностью в режиме испарения для данной смеси приведены в [6].

Описание экспериментальной установки

На рис. 1 приведена схема экспериментальной установки. Из фреоновой емкости 4 с бинарной смесью фреонов R114/R21 жидкость с помощью насоса 5 подается в бак постоянного уровня 2, находящийся в верхней части оптической колонны 1. Из бака постоянного уровня жидкость через щелевой распределитель поступает на рабочий участок 3. Далее жидкость стекает в измерительный сосуд и затем вниз колонны, откуда по трубопроводу возвращается в емкость 4.

Корпус колонны представляет собой теплоизолированный цилиндр из нержавеющей стали внутренним диаметром 270 мм и высотой 1500 мм. На боковой поверхности колонны имеются три оптических окна диаметром 60 мм для визуализации течения и проведения фото- и видеосъемки.

Течение пленки бинарной смеси фреонов с различной концентрацией легкокипящего компонента осуществлялось на вертикально ориентированных трубах из дюралюминия Д16, диаметром 50 мм. Теплопроводность Д16: $\lambda = 169 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$, температуропроводность: $a = 6,6 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$ (значения указаны для 20 °С). В экспериментах использовались трубы с гладкой и структурированной поверхностями. Шаг горизонтально ориентированной текстуры структурированной трубы — 1,5 мм, глубина — 0,4 мм (см. рис. 2). Коэффициент оребрения — 1,77. Коэффициент эффективности ребра, соответствующий максимальной теплоотдаче к кипящей пленке, — 0,99. Толщина стенки рабочих участков — 1 мм для гладкой поверхности и 1,5 мм для структурированной. Размер распределительной щели может изменяться в пределах 50–200 мкм. В данной серии опытов был выбран зазор величиной 100 мкм. Для обогрева рабочего участка использовался нагревательный элемент длиной 70 мм, устанавливаемый внутрь тонкостенной трубы. Область оребрения начиналась на расстоянии 70 мм от распределительной щели и имела протяженность 105 мм. Верхняя граница зоны тепловыделения находилась на расстоянии 87 мм от распределителя жидкости, что обеспечивало течение пленки жидкости по тепловыделяющей поверхности в режиме гидродинамической стабилизации.

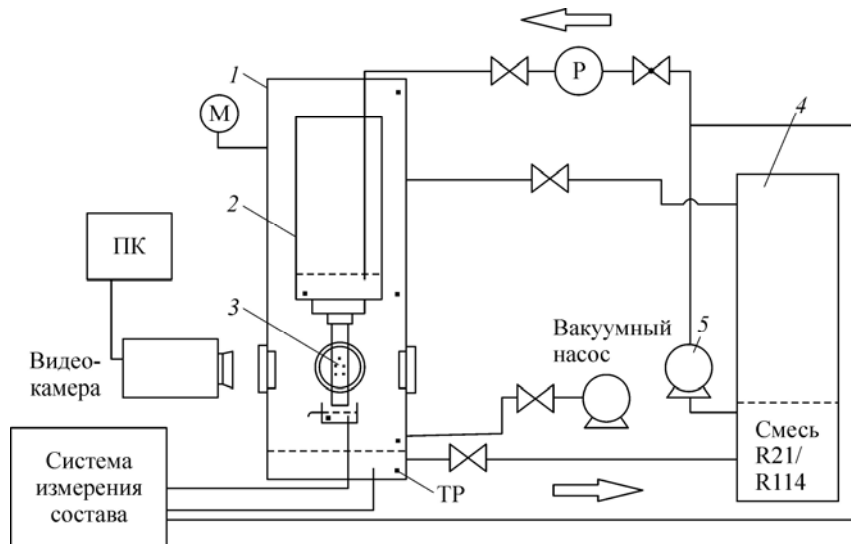


Рис. 1. Схема экспериментальной установки.

1 — оптическая колонна, 2 — бак постоянного уровня, 3 — экспериментальный участок, 4 — фреоновая емкость, 5 — насос, М — манометр, Р — расходомер, ТР — терморезисторы.

Для измерения локальной температуры поверхности по высоте либо по высоте и ширине (для гладкой поверхности) тепловыделяющего участка трубы были установлены четыре либо пять медь-константановых термопар диаметром 0,08 мм, заделанных заподлицо с поверхностью трубы. Шаг между термопарами, установленными по вертикали на структурированной поверхности, — 17 мм, расстояние между началом зоны тепловыделения и верхней термопарой — 10 мм (см. рис. 2). Холодные спаи термопар, погруженные в слой жидкости на дне колонны, находились при одинаковой температуре, которая определялась с помощью малоинерционного терморезистора HEL-700.

Температура в различных участках рабочего объема оптической колонны контролировалась с помощью девяти 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 компонент смеси фреонов измерялась методом газовой хроматографии. Вследствие испарения жидкости с поверхности происходит изменение состава бинарной смеси в стекающей пленке по длине теплоотдающей поверхности. Поэтому 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, осуществлялась 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 R114 и R21 во время эксперимента находилась в условиях насыщения. Эксперименты проведены в диапазоне изменения

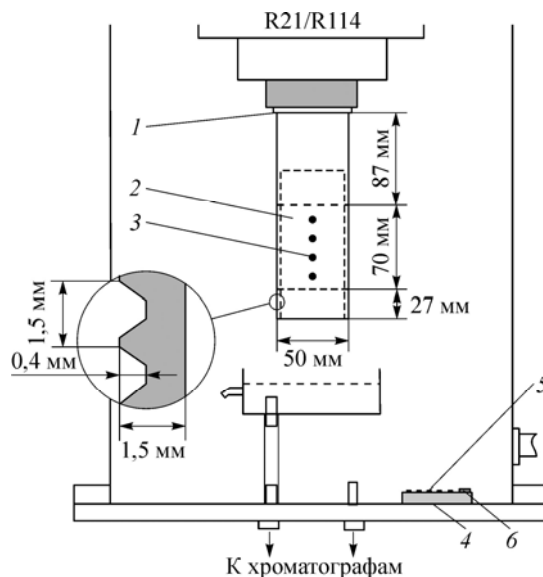


Рис. 2. Схема трубы.

1 — щелевой распределитель, 2 — зона тепловыделения, 3 — термопары, 4 — фторопластовая подложка, 5 — холодные спаи термопар, 6 — терморезистор.

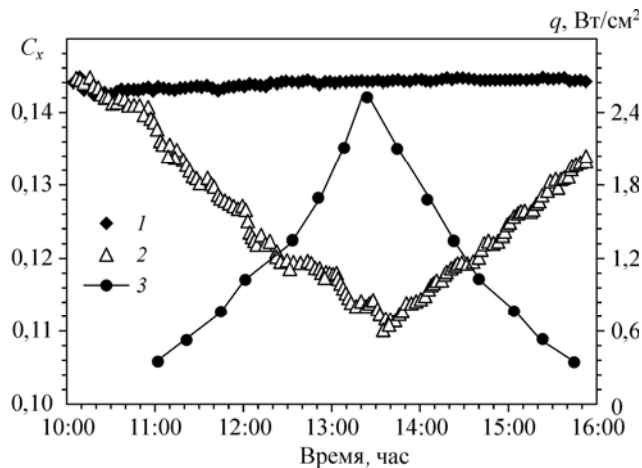


Рис. 3. Изменение концентрации C_x легкокипящей компоненты в зависимости от времени для установившихся режимов и от плотности теплового потока.

1 — концентрация R114 на входе в колонну, 2 — концентрация R114 на выходе из рабочего участка, 3 — плотность теплового потока; $p = 1,8$ бар.

абсолютного давления 1,6 – 2 бар. Число Рейнольдса $Re = 4Q/\pi d\nu$ на входе в рабочий участок изменялось от 70 до 700, где Q — объемный расход жидкости, m^3/c ; d — диаметр трубы, м; ν — кинематическая вязкость жидкости, m^2/c .

Величина плотности теплового потока во время эксперимента варьировалась от 0 до 5 Вт/см². Утечки тепла с торцов обогреваемого участка составляли не более 10 %.

Начальная концентрация летучего компонента C_x в смеси изменялась в диапазоне от 4 до 16,6 %.

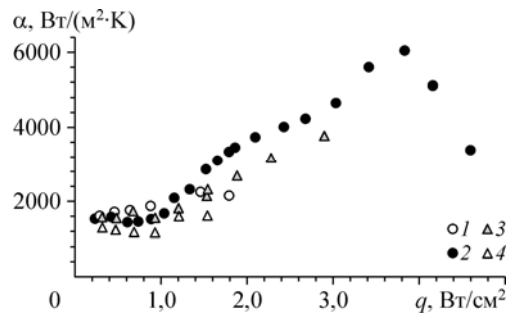
Результаты исследований

На рис. 3 представлены результаты измерения концентрации легкокипящего компонента (фреон R114) бинарной смеси фреонов R114/R21 на входе и выходе тепловыделяющей поверхности в зависимости от времени в установившихся режимах при постепенном пошаговом изменении тепловой нагрузки (линия 3). Опытные данные показывают значительное изменение состава смеси в пленке жидкости по длине рабочего участка, что необходимо учитывать при расчете физических свойств и локальных характеристик пленки жидкости.

На рис. 4 приведены данные по влиянию теплового потока на коэффициент теплоотдачи для гладкой и структурированной поверхностей для двух чисел Рейнольдса — 104 и 412. Значения коэффициента теплоотдачи и плотности теплового потока, как для гладкой, так и для оребренной труб были отнесены к величине площади гладкой поверхности. При тепловых потоках $q \leq 1$ Вт/см² теплообмен осуществляется в режиме испарения по всей длине участка.

Рис. 4. Зависимость коэффициента теплоотдачи от теплового потока для поверхностей: гладкой (1, 2) и структурированной (3, 4) для $Re = 104$ (1, 4), 412 (2, 3).

$p = 1,8$ (1–3), 1,6 (4) бар.



В этом режиме коэффициент теплоотдачи практически не зависит от теплового потока. При увеличении теплового потока режим испарения сменяется режимом кипения. Затем, при приближении к критическим значениям теплового потока, на теплоотдающей поверхности возникают сначала замываемые, а затем и стабильные сухие пятна. При малых числах Рейнольдса замываемые сухие пятна возникают в режиме испарения. За величину критического теплового потока здесь принимается тепловой поток, вызывающий появление на теплоотдающей поверхности устойчивых сухих пятен, следствием чего является резкий рост локальной температуры поверхности. При дальнейшем росте теплового потока размер сухих пятен увеличивается, что в итоге может приводить к полному осушению теплоотдающей поверхности.

На рис. 5 показано поведение разности температур между средней по длине температурой стенки и температурой насыщения смеси фреонов при изменении теплового потока. Стрелками показано направление изменения теплового потока. Увеличение теплового потока примерно до 1 Вт/см^2 приводит практически к линейному росту температурного напора на гладкой и на структурированной поверхностях. При дальнейшем увеличении теплового потока на гладкой трубе начинается пузырьковое кипение, сопровождающееся скачкообразным понижением температурного напора.

При последующем уменьшении теплового потока от максимальных значений до нуля наблюдается ярко выраженный гистерезис. Он выражается в том, что за счет парообразования на готовых центрах этого парообразования режим пузырькового кипения сохраняется при меньших тепловых потоках, и коэффициенты теплоотдачи при одинаковых тепловых потоках при уменьшении тепловой нагрузки становятся выше. На структурированной поверхности, как видно из рисунка, гистерезис практически отсутствует. Температурные напоры, а, следовательно, и коэффициенты теплоотдачи в режиме испарения и неразвитого пузырькового кипения при данных условиях течения пленки близки к соответствующим значениям для гладкой трубы. В режиме более развитого пузырькового кипения температурные напоры на структурированной поверхности становятся выше, чем на гладкой трубе. При дальнейшей обработке данных и для сравнения с известными расчетными зависимостями в качестве температуры стенки принимались значения температуры при увеличении теплового потока и для гладкой, и для структурированной трубы. Тем самым исключались из рассмотрения более высокие значения коэффициентов теплоотдачи на гладкой трубе при гистерезисе, которые не всегда могут быть реализованы на практике.

Одной из особенностей пузырькового кипения, наблюдаемой в экспериментах, является слияние пузырей и их движение в виде конгломератов вместе с пленкой жидкости. Собственно пленка жидкости при достаточно развитом кипении в нижней части трубы представляет собой двухфазный пенный слой, стекающий в виде кипящих струй. В большей степени этот режим характерен для структурированной поверхности. Размер сливающихся пузырей и образующихся конгломератов может достигать

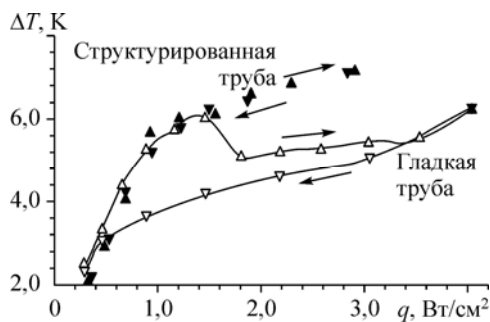


Рис. 5. Зависимость температурного напора «стенка–жидкость» от теплового потока при различных направлениях его изменения: $Re = 420$.

Для поверхностей: гладкой — $p = 2$ бар, $C_x = 16,4 \%$, структурированной — $p = 1,8$ бар, $C_x = 14,6 \%$.

Рис. 6. Теплоотдача при кипении на гладкой трубе.

Расчет по моделям [12] (1), [13] (2). $Re = 104$ (3), 210 (4), 310 (5), 420 (6), 520 (7), 630 (8).

нескольких сантиметров, толщина двухфазного слоя составляет 5–6 мм. Пузыри могут лопаться с образованием капель жидкости, вылетающих с поверхности пленки. Вблизи поверхности раздела в паровой фазе наблюдаются мелкие капли жидкости, витающие рядом с движущейся границей пленки, а также туман, состоящий, вероятно, из более мелких частиц конденсата. Направление движения мелких капель и тумана чаще всего хаотичное.

Результаты измерения коэффициентов теплоотдачи при кипении пленки смеси фреонов на гладкой поверхности показаны на рис. 6. Для малых чисел Рейнольдса в диапазоне 100–200 при тепловых потоках 1,5–2 Вт/см² количество жидкости в пленке в конце рабочего участка вследствие фазового перехода уменьшалось до уровня 50–60 % от начального количества на входе в обогреваемую поверхность. При таких тепловых нагрузках кипение является неразвитым с относительно низкими значениями коэффициентов теплоотдачи. Дальнейшее увеличение теплового потока приводит к образованию сухих пятен на греющей поверхности. При расходах жидкости, соответствующих числам Рейнольдса 300–630, наблюдается более развитое пузырьковое кипение, коэффициенты теплоотдачи практически не зависят от расхода жидкости. Фотоснимок пленочного течения в данном режиме представлен на рис. 7, а. Практически во всех режимах, кроме области $q \approx 1–2$ Вт/см², коэффициенты теплоотдачи на гладкой поверхности оказываются выше расчетных зависимостей, полученных для теплоотдачи при кипении в большом объеме бинарных смесей жидкостей [11, 12] и для теплоотдачи при кипении в стекающей пленке [13]. Обе модели основаны на приближенной модели теплообмена при пузырьковом кипении Лабунцова [14]. В работе [12] учтен дополнительный вклад в теплоперенос доли тепла, затраченного на испарение жидкости на границе сухих пятен под паровыми конгломератами. Поправка, предложенная в работе [11] для учета увеличения действительного температурного

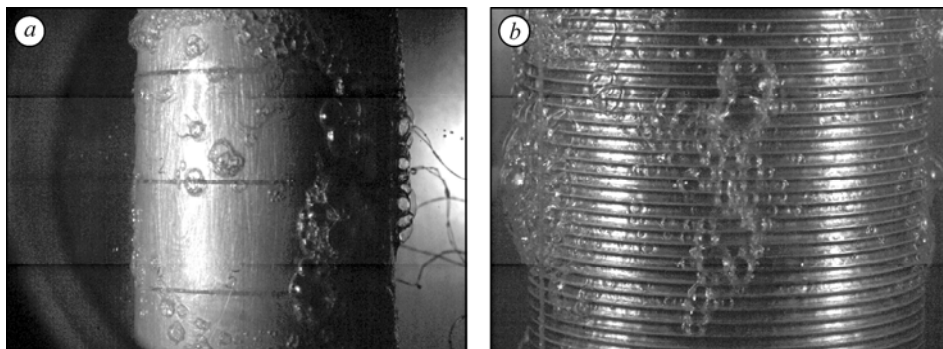
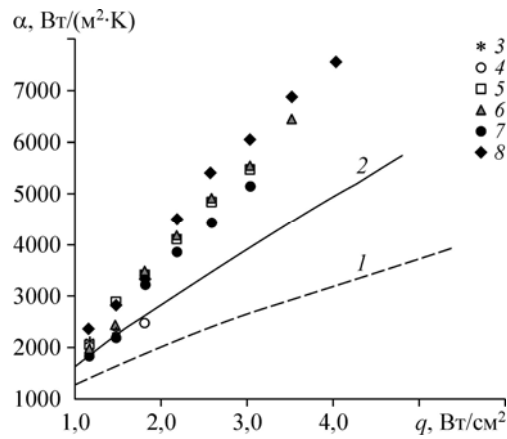


Рис. 7. Кипение пленки на гладкой: $Re = 425$, $q = 3,4$ Вт/см² (а), на структурированной: $Re = 411$, $q = 5,5$ Вт/см² (b) поверхностях.

напора для данной бинарной смеси, оказывается несущественной вследствие малой разности температур индивидуальных веществ, входящих в рабочую жидкость. Формула [13] учитывает интенсификацию теплообмена в кипящих пленках вследствие разбрызгивания и уноса жидкости при схлопывании пузырей, а также свойства теплоотдающей поверхности.

На структурированной поверхности зависимость коэффициентов теплоотдачи от теплового потока при интенсивном пузырьковом кипении аналогичная (рис. 8). Фотоснимок пленочного течения в данном режиме приведен на рис. 7, *b*. Влияние расхода жидкости на теплообмен отсутствует. Измеренные коэффициенты теплоотдачи также сопоставлены с моделями [11–13].

Коэффициенты теплоотдачи на структурированной поверхности в режиме пузырькового кипения оказываются ниже, чем на гладкой, во всем исследованном диапазоне изменения режимных параметров. Различие может быть обусловлено дополнительным термическим сопротивлением как самой оребренной поверхности, так и пленки жидкости в каналах микротекстуры. Доля тепла, затрачиваемого на испарение жидкости под паровыми конгломератами на гладкой поверхности и на оребренной трубе, может быть различной. На оребренной трубе, в отличие от гладкой трубы, характерный размер пленки под паровыми конгломератами определяется шагом и высотой ребер. Толщина пленки и, соответственно, термическое сопротивление под и между паровыми образованиями на оребренной поверхности может быть существенно выше, что может приводить к уменьшению теплоотдачи по сравнению с гладкой трубой. Результаты по коэффициентам теплоотдачи на оребренной трубе удовлетворительно совпадают с расчетом по формуле [13].

Увеличение коэффициентов теплоотдачи в режиме кипения при пленочном течении бинарной смеси фреонов по сравнению с расчетной зависимостью для кипения в большом объеме может быть связано с различным характером кипения. Как уже отмечалось выше, 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 маловязких жидкостей). 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. Большой размер паровых пузырей при кипении в пленке, наблюдаемый авторами в настоящих экспериментах, может быть связан с более интенсивным испарением легкокипящей компоненты в бинарной смеси, что было отмечено выше. Авторами было показано ([6], [15]), что в результате выпаривания жидкости количество легкокипящей компоненты на выходе рабочего участка уменьшается быстрее, чем общий расход.

Кроме этого, в стекающей по гладкой поверхности тонкой пленке жидкости при неразвитом пузырьковом кипении дополнительный вклад в интенсификацию теплообмена вносит значительная составляющая теплообмена при испарении со свободной поверхности пленки в зонах между паровыми образованиями.

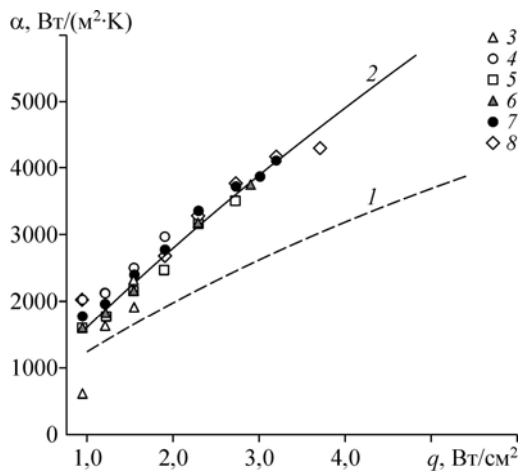


Рис. 8. Теплоотдача при кипении на структурированной трубе.

Расчет по моделям [12] (1), [13] (2). $Re = 104$ (3), 205 (4), 310 (5), 410 (6), 520 (7), 620 (8).

Появлению устойчивых сухих пятен на гладкой 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 замыкаемые сухие пятна могут существовать продолжительное время. При увеличении тепловой нагрузки образуются устойчивые сухие пятна. Размер пятен увеличивается при дальнейшем увеличении тепловой нагрузки.

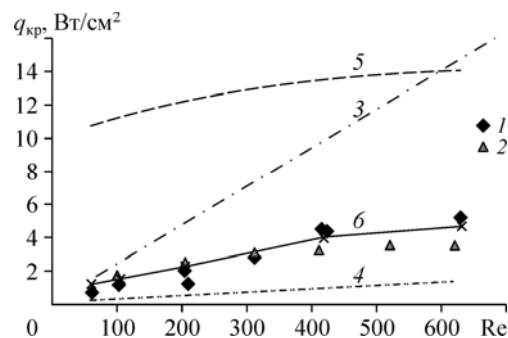
На рис. 9 приведены опытные данные по критическим тепловым потокам, соответствующим условиям появления устойчивых сухих пятен на гладкой и структурированной поверхностях, и сравнение результатов измерений с различными моделями. Из сравнения экспериментальных данных следует, что на структурированной поверхности при малых расходах жидкости в пленке (диапазон пленочного числа Рейнольдса 60–300) величина критического теплового потока оказывается несколько выше по сравнению с гладкой поверхностью вследствие увеличения эффективной толщины пленки в каналах текстуры. Для тонкой пленки, в которой кипение не столь развито на значительной части теплоотдающей поверхности, кризисные явления определяются условиями возникновения сухих пятен в режиме испарения стекающей пленки жидкости. Поэтому увеличение буферного слоя в каналах текстуры увеличивает ее тепловую устойчивость в режиме интенсивного испарения. При больших числах Рейнольдса в диапазоне 300–630 в режимах более развитого кипения в пленке величина критического теплового потока на структурированной поверхности уменьшается по сравнению с гладкой трубкой. По-видимому, это связано с более интенсивным развитием сухих пятен под растущими пузырями на структурированной поверхности, для которой интенсивности теплоотдачи при кипении ниже, чем для гладкой поверхности.

Линия 3 на рис. 9 соответствует расчету теплового потока для полного испарения пленки на выходе с теплоотдающей поверхности. Расчетные значения существенно превосходят экспериментальные значения, поскольку, как было показано в [16], для образования устойчивого сухого пятна достаточно испарить тонкий остаточный слой жидкости в зоне между гребнями крупных волн. При малых расходах жидкости в пленке при слабо развитом волновом процессе экспериментальные значения критического теплового потока, как видно на рис. 9, достаточно близки к кривой полного испарения. Данная кривая дает верхнюю предельную границу критического теплового потока.

Линия 4 соответствует расчету критического теплового потока, предложенному в работе [17]. Зависимость [17] получена при обобщении опытных данных для интенсивного пузырькового кипения фреона R113 в стекающей по внешней поверхности вертикального цилиндра пленке при большой плотности орошения. Авторами были описаны три типа критических условий, сменяющих друг друга по мере увеличения числа Рейнольдса. На рис. 9 приведен расчет по эмпирической зависимости, соответствующей критическим условиям, возникающим при существенном перераспределении жидкости по периметру обогреваемого цилиндра, приводящем к возникно-

Рис. 9. Зависимость критического теплового потока от числа Рейнольдса.

Опытные данные для гладкой (1) и структурированной (2) поверхностей; расчет теплового потока, соответствующего полному испарению на выходе (3). Расчетные зависимости: [17] (4), [18] (5), [16] (6).



вению разрывов в области наиболее тонкой пленки (на центрах парообразования) и появлению устойчивых сухих пятен. Диапазон пленочного числа Рейнольдса для данного типа кризиса 300–3000, диаметр обогреваемого цилиндра — 8,0 мм. Экспериментальные значения критических величин теплового потока, полученные в настоящем исследовании для обоих типов поверхностей, лежат заметно выше расчетной зависимости [17]. Это может объясняться отсутствием в расчетной методике [17] учета влияния более сложной трехмерной структуры волн на перераспределение жидкости в пленке, связанное с периодической подпиткой остаточного слоя жидкостью в режиме распространения крупных трехмерных волн.

Линия 5 на рис. 9 соответствует расчету критического теплового потока, предложенному в работе [18]. В аналитической модели, разработанной авторами [18], кризис кипения связан с отторжением пленки от нагревателя непосредственно на входе тепловыделяющей поверхности, в то время как в настоящей работе, согласно результатам высокоскоростной видеосъемки, развитие кризисных явлений определяется закономерностями возникновения сухих пятен, характерными для режимов испаряющейся волновой пленки жидкости. Сухие пятна возникают в нижней части теплоотдающей поверхности при тепловых потоках, соответствующих неполностью развитому пузырьковому кипению (в терминах классификации режимов кипения в условиях большого объема жидкости). Это принципиальное различие в механизмах развития кризисных явлений объясняет существенное превышение величин критического теплового потока, рассчитанных по модели [18], относительно полученных в настоящей работе опытных данных.

В работе [16] была предложена модель, согласно которой 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:

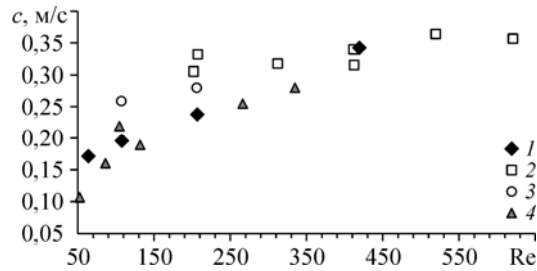
$$q_{кр} = r\rho \left(\frac{\delta_{ост}^3 g}{3\nu \cdot \tilde{l}} + 0,25k\delta_{ост}\tilde{f} \right), \quad (1)$$

где: r — теплота парообразования, Дж/кг; ρ — плотность жидкости, кг/м³; ν — вязкость жидкости, м²/с; g — ускорение свободного падения, м/с²; $\delta_{ост}$ — 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. Линия 6 на рис. 9 соответствует величине критического теплового потока, рассчитанной по зависимости (1). Средняя длина волны λ и фазовая скорость крупных волн \tilde{c} были взяты из экспериментов. Толщина остаточного слоя рассчитывалась следуя результатам [19] также в зависимости от выходного числа Рейнольдса. 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 $k = 0,2$. Из рисунка видно, что зависимость (1) удовлетворительно описывает полученные результаты по условиям возникновения сухих пятен на гладкой и структурированной поверхностях в исследованном диапазоне изменения числа Рейнольдса.

На рис. 10 приведена зависимость средней фазовой скорости крупных волн от числа Re для гладкой и структурированной поверхностей и сравнение с соответствующими экспериментальными данными [19] для азота, полученными ранее

Рис. 10. Средняя фазовая скорость крупных волн на гладкой и структурированной поверхностях.

Гладкая (1) и структурированная (2) поверхности; скорость поперечных волн в горизонтальных каналах текстуры (3); данные [19] для азота, гладкая поверхность (4).



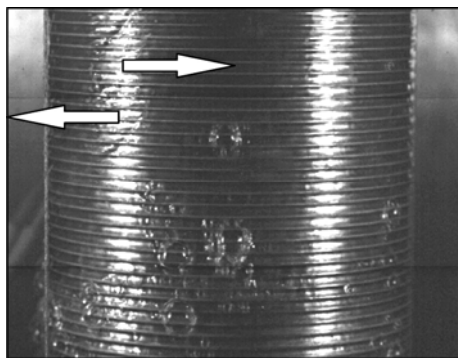
для гладкой поверхности. Бинарные смеси фреонов, использовавшиеся авторами, как и жидкий азот, имеют низкие значения кинематической вязкости, поверхностного натяжения и малые краевые углы смачивания (около 10°).

Из полученных данных следует, что значения скорости крупных волн для приведенных жидкостей близки друг к другу и в исследованных режимах слабо зависят от наличия текстуры на поверхности. Высокоскоростная видеосъемка показала наличие вторичных волн, распространяющихся в горизонтальных каналах текстуры (см. рис. 11). Авторами настоящей работы были проведены измерения скорости вторичных волн, результат которых представлен на рис. 10. Вторичные волны возникают в каналах текстуры при увеличении расхода жидкости, когда при прохождении гребней волн над текстурой часть жидкости растекается по горизонтальным канавкам, образуя сложное волновое течение жидкости с более мелким масштабом волн. Растекание жидкости от соседних волн может происходить во встречных направлениях, порождая возникновение новых волн другого масштаба. Пульсирующее волновое движение жидкости в горизонтальных каналах возникает также от растущих в каналах текстуры паровых пузырей. Эти факторы в режиме испарения (в частности, в диапазоне пленочного числа Рейнольдса 60–300) могут приводить к увеличению коэффициентов теплоотдачи по сравнению с гладкой трубой (см. [6]).

Заключение

В работе проведено сравнение экспериментальных данных по теплоотдаче к стекающей пленке смеси фреонов при пузырьковом кипении на гладкой и структурированной трубах, сопоставление с известными зависимостями для кипения в большом объеме и в стекающей пленке.

Показано, что расчетные зависимости для теплоотдачи при кипении смесей жидкости в большом объеме и для условий пленочного течения жидкости предсказывают более низкие значения коэффициентов теплоотдачи, чем полученные в данных экспериментах для гладкой трубы.



Коэффициенты теплоотдачи при пузырьковом кипении на структурированной трубе данной формы оказываются примерно на 40 % ниже, чем на гладкой трубе в исследованном диапазоне числа Рейнольдса.

Рис. 11. Распространение вторичных волн в горизонтальных каналах структурированной поверхности.

Проведено сравнение опытных данных по критическому тепловому потоку на гладкой и структурированной поверхностях между собой и с расчетом по модели [16]. Показано 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, учитывающей его подпитку при распространении крупных трехмерных волн.

Выполнено сравнение волновых характеристик на гладких и структурированных поверхностях. Обнаружено, что в каналах микротекстуры наблюдается интенсивное нестационарное движение жидкости в горизонтальном направлении при развитии вторичных волн.

Список литературы

1. **Thome J.R.** Engineering Data Book III. Wolverine Tube, Inc. 2004.
2. **Gambaryan-Roisman T., Stephan P.** Heat transfer analysis of falling film evaporation on structured surfaces // Proc. of the 12th Int. Heat Transfer Conf., Grenoble, France, August 2002. Vol. 3. P. 449–454.
3. **Lorentz J.J., Yung D.** Combined boiling and evaporation of liquid films on horizontal tubes // Proc. 5th OTEC Conf. 1978. Vol. 3. P. 46–70.
4. **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.
5. **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.
6. **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. 605–616.
7. **Palen J.W., Wang Qi, Chen J.C.** Falling film evaporation of binary mixtures // AIChE J. 1994. Vol. 40, No. 2. P. 207–214.
8. **Gropp U., Schlünder E.U.** The effect of liquid-side mass transfer on heat transfer and selectivity during surface and nucleate boiling of mixtures in a falling film // Chem. Eng. and Proc. 1986. Vol. 20. P. 103.
9. **Krupiczka R., Rotkegel A., Ziobrowski Z.** Heat transfer to evaporating binary liquid films inside a vertical tube // Proc. of the 5th World Conf. on experimental Heat Transfer, Fluid Mechanics, and Thermodynamics, Thessaloniki, Greece, 24–28 September, 2001. Vol. 1. P. 285–289.
10. **Kern J., Stephan P.** Theoretical model for nucleate boiling heat and mass transfer of binary mixtures // J. Heat Transfer. 2003. Vol. 125, Iss. 6. P. 1106–1115.
11. **Yagov V.V.** Predicting method for heat transfer coefficient at binary mixtures nucleate boiling // Proc. 11-th Int. Heat Transfer Conf., Kyongju, Korea, 23–28 August, 1998. Vol. 2. P. 545–550.
12. **Ягов В.В.** Теплообмен при развитом пузырьковом кипении жидкостей // Теплоэнергетика. 1988. № 2. С. 4–9.
13. **Гогонин И.И.** Теплообмен при кипении жидкости в пленке, движущейся под действием силы тяжести // Инженерно-физический журнал. 2010. Т. 83, № 4. С. 821–826.
14. **Лабунцов Д.А.** Вопросы теплообмена при пузырьковом кипении жидкостей // Теплоэнергетика. 1972. № 9. С. 14–19.
15. **Pecherkin N.I., Pavlenko A.N., Chekhovich V.Yu., Volodin O.A., Tsoi A.N.** Heat transfer and wave characteristics in the films of binary freon mixtures, falling over the structured surface // Proc. 7th Inter. Conf. on Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics, HEFAT 2010, 19–21 July 2010, Antalya, Turkey. P. 451.
16. **Pavlenko A.N., Lel' V.V.** Heat transfer and crisis phenomena in falling films of cryogenic liquid // Russ. J. Eng. Thermophys. 1997. Vol. 7, No. 3–4. P. 177–210.
17. **Ueda T., Inoue M., and Nagatome S.** Critical heat flux and droplet entrainment rate in boiling of falling liquid films // Int. J. Heat Mass Transfer. 1981. Vol. 24, No. 7. P. 1257–1266.
18. **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. Vol. 30, No. 10. P. 2083–2095.
19. **Pavlenko A.N., Lel' V.V., Serov A.F., Nazarov A.D. and Matsekh A.D.** The growth of wave amplitude and heat transfer in falling intensively evaporating liquid films // J. Eng. Thermophys. 2002. Vol. 11, No. 1. P. 7–43.

Статья поступила в редакцию 28 марта 2011 г.