

А. Н. Павленко¹, А. С. Суртаев¹, О. А. Володин¹, В. С. Сердюков^{1,2}

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

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

pavl@itp.nsc.ru, surtaev@itp.nsc.ru
volodin@ngs.ru, vsserd@gmail.com

ОСОБЕННОСТИ ПЛЕНОЧНОГО ТЕЧЕНИЯ ЖИДКОГО АЗОТА ПО КОРРУГИРОВАННЫМ ПЛАСТИНАМ С КОМБИНИРОВАННОЙ МИКРОТЕКСТУРОЙ*

Представлены результаты экспериментального исследования гидродинамики пленочного течения криогенной жидкости по поверхности единичных элементов структурированной насадки. На основе сравнения опытных данных показано влияние формы микротекстуры, диаметра отверстий на зоны растекания пленки жидкости по корругированной поверхности при различных значениях пленочного числа Рейнольдса. Показано, что наличие комбинированной микротекстуры (с периодическим по высоте пластины изменением ее направления) приводит к лучшему растеканию пленки азота по поверхности корругированной перфорированной пластины. Анализ опытных данных показывает, что наличие периодических зон с вертикальным направлением микроканалов на пластинах с комбинированной микротекстурой обеспечивает более значительный переток жидкости через отверстия по сравнению с пластиной, имеющей горизонтальное направление микротекстуры. Использование отверстий меньшего диаметра при сохранении общей площади, занимаемой отверстиями, при малой степени орошения также приводит к увеличению размера зон смачивания на пластине с комбинированной микротекстурой.

Ключевые слова: стекающие пленки жидкости, смачивание, структурированные насадки, комбинированная микротекстура.

Введение

В химической промышленности широко распространены контактные газожидкостные теплообменные аппараты, в которых теплообмен между жидкостью и газом происходит при их непосредственном соприкосновении. К таким аппаратам относятся дистилляционные колонны, градирни, контактные выпарные аппараты, каталитические реакторы, абсорберы, скрубберы и т. д. [1–3]. Использование дистилляционных колонн со структурированными насадками в

сравнении с тарельчатыми колоннами обеспечивает существенно меньшее гидравлическое сопротивление в расчете на единицу переноса, более высокие нагрузки по пару и жидкости, что значительно повышает производительность колонн и снижает затраты энергии на получение полезных продуктов. Это достигается эффективным массообменом при течении вниз по поверхности сложной геометрии тонкой пленки жидкости, как правило, волновой, и движении по перекрестным каналам восходящего турбулизованного потока пара. Однако регу-

* Исследование выполнено в ИТ СО РАН за счет гранта Российского научного фонда (проект № 14-49-00010).

лярные насадки по сравнению с насыпными весьма чувствительны, например по эффективности разделения смесей при дистилляции, к равномерности распределения жидкости по сечению [4]. Результаты исследований и эксплуатации промышленных ректификационных колонн с широко используемыми в настоящее время регулярными насадками показали, что эффективность разделения при увеличении их диаметра может значительно снижаться, что сказывается на производительности и чистоте готовой продукции. Это связано с существенным влиянием неравномерности распределений параметров потоков по сечению и высоте колонны, определяемой как начальными условиями орошения жидкости и ввода пара в насадку, так и внутренними процессами перераспределения потоков жидкости и пара при разделении смесей вследствие целого ряда факторов. Поэтому проблема интенсификации тепло- и массообмена в таких многоканальных системах, дальнейшее развитие оптимальных аппаратов насадочного типа являются чрезвычайно актуальными. Несмотря на широкое использование на практике данных режимов в контактных аппаратах, закономерности гидродинамики и теплообмена при таких течениях, выявление которых служит основой для разработки как конструктивных, так и технологических методов интенсификации процессов разделения смесей, изучены весьма слабо. Исследования особенностей течения пленок различных жидкостей по структурным элементам регулярных насадок интенсивно развиваются в последнее время [5–16]. Строгое теоретическое исследование, моделирование таких течений и процессов весьма затруднено и не является на сегодня решенной задачей в связи с чрезвычайно высокой сложностью их описания [11]. Значительное влияние на эффективность разделения смесей, интенсивность теплообмена при пленочных течениях жидкостей и их смесей по поверхностям, в том числе структурированным, оказывают эффекты перераспределения жидкости, особенности эволюции волновых характеристик на свободной поверхности, динамика образования несмоченных зон, исследуемые, например, в работах [17–28]. Существует лишь ограниченное число работ (см., например, [17–19; 21; 22; 27; 29–34]), посвященных исследованию гидродинамики

и теплообмена при волновых пленочных течениях маловязких высокосмачивающих жидкостей (фреоны и их смеси, азот). В то же время исследования характеристик пленочного течения криогенных жидкостей, фреонов по поверхностям сложной геометрии являются весьма актуальными, поскольку такие гидродинамические режимы реализуются в условиях дистилляции на структурированных насадках при криогенном разделении жидкого воздуха для получения чистых кислорода, азота, аргона и др. продуктов, в пленочных теплообменниках различного назначения.

В работе [29] представлены результаты экспериментальных исследований по особенностям растекания пленки азота по одиночным корругированным пластинам с горизонтальным, вертикальным направлениями микротекстуры, а также при отсутствии микротекстуры при различных значениях пленочного числа Рейнольдса. Было показано, что относительная доля жидкости, удерживаемой в одиночно орошаемом канале одиночных корругированных пластин с углом наклона ребер 47° , существенно зависит от степени орошения. Выявлено, что при малой степени орошения вся жидкость течет только вдоль орошаемого канала в зоне впадины и нижележащей от нее поверхности, не перетекая в нижележащие каналы. При большей степени орошения происходит интенсивный переток жидкости в нижележащие каналы, что обеспечивает смачивание и течение жидкости на значительной части поверхности корругированных пластин в неорошаемой зоне. Авторами работ [30–32] были получены новые опытные данные по влиянию угла наклона крупных ребер на зоны растекания пленки жидкости по одиночной корругированной поверхности при различной степени орошения. Показано значительное влияние угла наклона крупных ребер, перфорации на характеристики течения, размер, форму зон ее растекания по поверхности пластин, расположение зон разрыва пленки жидкости и возникновение устойчивых сухих пятен на гофрированной поверхности. В работах [33; 34] представлены результаты экспериментальных исследований параметров пленочного течения криогенной жидкости по поверхности единичных элементов структурированной насадки, состоящих из двух корругированных пластин. На основе сравнения опытных

данных показано влияние микротекстуры, ее направления относительно направления силы тяжести, угла наклона крупных ребер на распределение жидкости вдоль пакетов при различной степени орошения. Приводятся результаты опытов по зависимости степени перетекания жидкости через контактные точки в пакетах с пластинами от степени орошения.

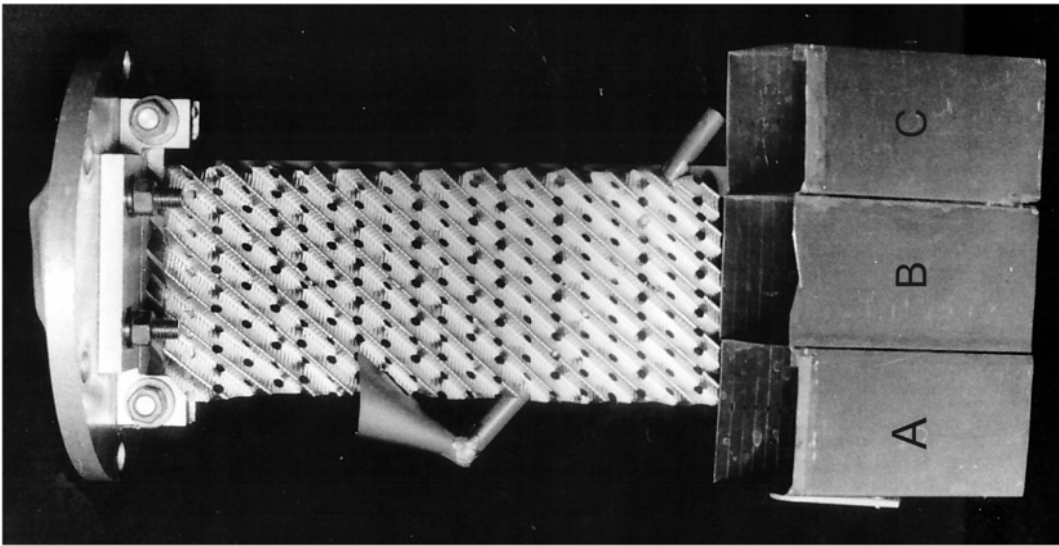
Целью данной работы является экспериментальное изучение особенностей пленочного течения азота по единичным элементам структурированных насадок с комбинированным направлением микротекстуры при различной степени орошения.

Методика эксперимента

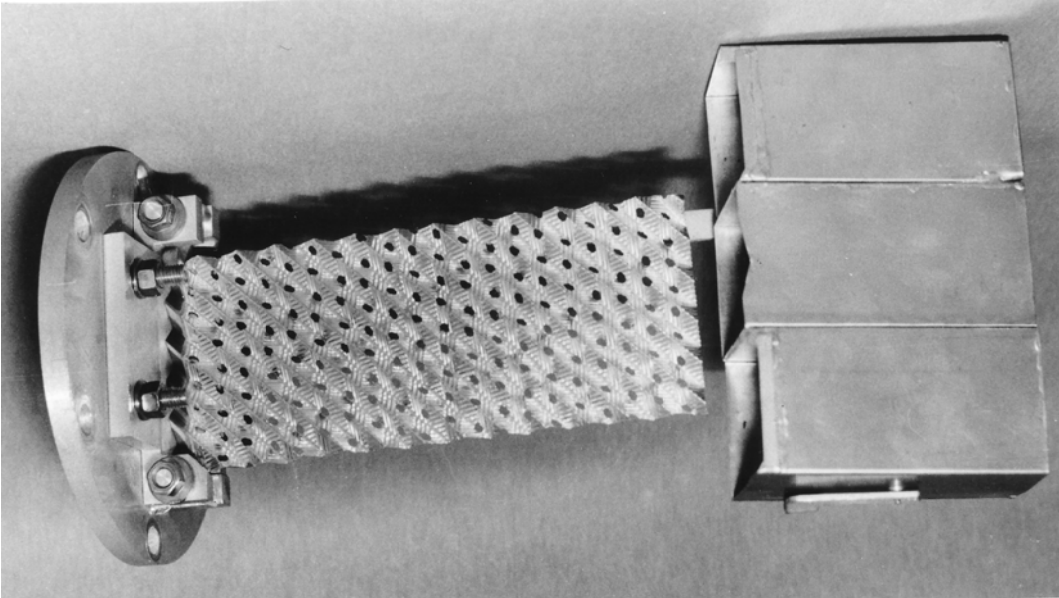
Исследования были проведены на экспериментальной установке, принципиальная схема которой детально описана в [29]. Опытные данные получены при течении жидкого азота, находящегося на линии насыщения, в диапазоне изменения пленочного числа Рейнольдса $Re = 4\Gamma/\nu = 258\text{--}860$. Здесь: $\Gamma = q/l$ – плотность орошения, $\text{м}^2/\text{с}$; q – объемный расход жидкости, $\text{м}^3/\text{с}$; l – периметр орошаемых каналов на верхнем срезе пластины, м ; ν – коэффициент кинематической вязкости, $\text{м}^2/\text{с}$. Рабочая жидкость подается через криогенный трубопровод из гелиевого сосуда в бак постоянного уровня жидкости, размещенный во внутренней полости оптического криостата. Из бака постоянного уровня жидкость через щелевой распределитель поступает на рабочий участок и далее стекает в измерительные сосуды. Из внутренней полости криостата жидкий азот через криогенный трубопровод откачивается в выходной гелиевый сосуд. Через четыре оптических окна выполнялись визуализация течения и съемка с использованием высокоскоростной цифровой видеокамеры Phantom 7.0. Для исключения эффектов испарения жидкой пленки на экспериментальном участке (за счет теплопритоков через боковую, верхнюю и нижнюю поверхности внутренней полости криостата) криогенная емкость защищена вакуумированной полостью, охлаждаемыми экранами и внешней азотной ванной. Были проведены три экспериментальные серии, в которых исследованы закономерности растекания и пленочного течения жидкого азота по поверхности одиночных структуриро-

ванных перфорированных пластин насадок с различной формой микротекстуры при изменении в практически реализуемом при дистилляции диапазоне степени пленочного орошения. В первой серии опыты были проведены при горизонтальном направлении микротекстуры и диаметре отверстий 4,0 мм (рис. 1, а), во второй и третьей сериях – с комбинированной микротекстурой (с периодическим по высоте пластины изменением ее направления) при диаметре отверстий 4,0 и 2,3 мм соответственно (рис. 1, б, в). Для пластин с комбинированной микротекстурой протяженность участков с горизонтальной микротекстурой по высоте пластины составляла 5 мм (три горизонтальных микроканала микротекстуры). Протяженность участков с вертикальной микротекстурой по высоте пластины при этом составляла 8 мм. При проведении опытов на одиночных структурированных пластинах другие геометрические параметры оставались неизменными. Микротекстура имела амплитуду 0,2 мм и шаг 1,5 мм. Толщина пластин из алюминия составляла 0,2 мм. Угол наклона гофра к горизонтали – 47° , высота ребер – 7 мм, длина волны гофрирования – 10,1 мм, угол раскрытия ребер – 60° . Параметры гофрирования пластин, микротекстуры, отверстий соответствуют аналогичным характеристикам целого ряда промышленных структурированных насадок, например, типа Зульцер 500У. Исследования на данных рабочих участках позволили изучить влияние формы микротекстуры, диаметра отверстий на динамику течения жидкости по элементам структурированной насадки при различной степени орошения. Рабочие участки шириной 75 мм и длиной 300 мм присоединялись ко дну бака постоянного уровня. Жидкость поступала на рабочие участки через распределительную щель, образованную двумя пластинами, закрепленными на дне бака.

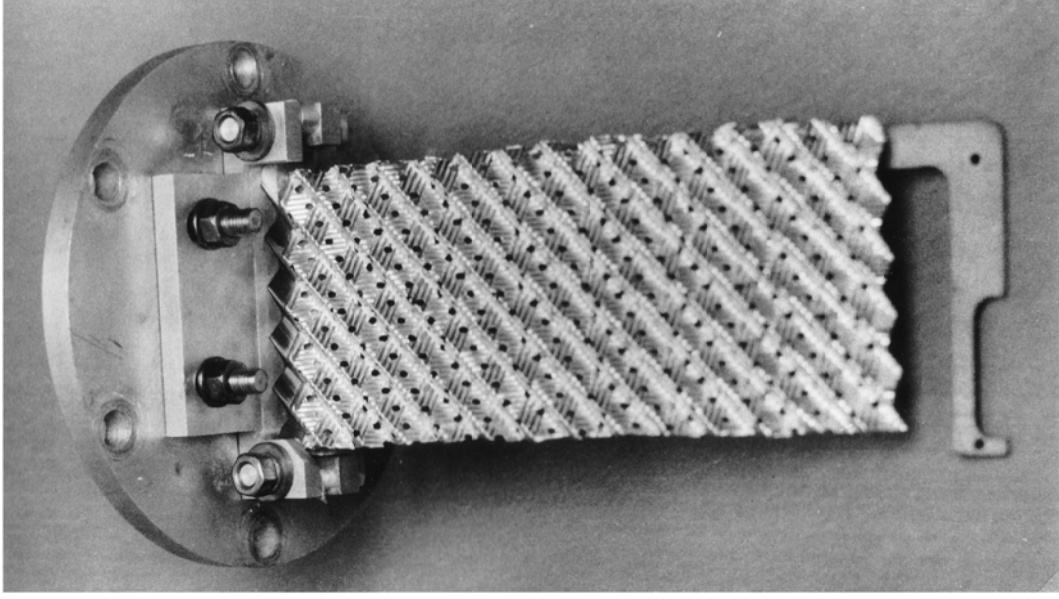
Установка заданного размера щели обеспечивалась прокладкой калиброванной металлической фольги толщиной 50 мкм. Форма распределительной щели имела ту же геометрию и углы изгиба, что и экспериментальные гофрированные пластины. Жидкий азот подавался на фронтальную сторону (по рисункам) пластин. Во время экспериментов было обеспечено равномерное орошение всех каналов на верхнем срезе исследуемых пластин. В экспериментах



а



б



в

Рис. 1. Общий вид экспериментальных секций для исследования пленочного течения азота по гофрированным перфорированным поверхностям: а – пластина с горизонтальным направлением микротекстуры; б, в – с комбинированной микротекстурой. Диаметр отверстий: а, б – 4,0 мм; в – 2,3 мм

применялись два метода орошения. В первом случае в верхней части всех исследованных пластин орошались все пять каналов. Во втором случае (в опытах на рифленой пластине с горизонтальной микротекстурой) орошался только крайний правый канал, что позволило определить объемным методом измерения зависимость относительной доли жидкости, перетекающей из орошаемого канала в неорошаемую часть пластины, от степени орошения. Для этого использовались три мерные емкости, расположенные под исследованными пластинами (см. рис. 1, а). При орошении всех каналов на верхнем срезе пластин дополнительно с регистрацией зон растекания пленки жидкого азота определялись относительные доли жидкости, стекающей с левого и правого нижнего краев пластин, а также со средней нижней части пластин. Для этого также применялся объемный метод измерения с использовани-

ем трех мерных емкостей, расположенных под исследованными пластинами (как показано на рис. 1, а и б).

Результаты и обсуждение

В результате проведенных исследований получены новые опытные данные по динамике течения стекающих пленок азота по поверхности одиночных элементов структурированных насадок в диапазоне изменения пленочного числа Рейнольдса, соответствующего ламинарно-волновому режиму течения. Определены зоны растекания жидкости по поверхности рифленых пластин с различной формой микротекстуры для различных чисел Рейнольдса. Показано, что размер зон растекания жидкости весьма существенно зависит от степени орошения (рис. 2, а, б). Благодаря интенсивному перетоку через вершины крупных каналов с уве-

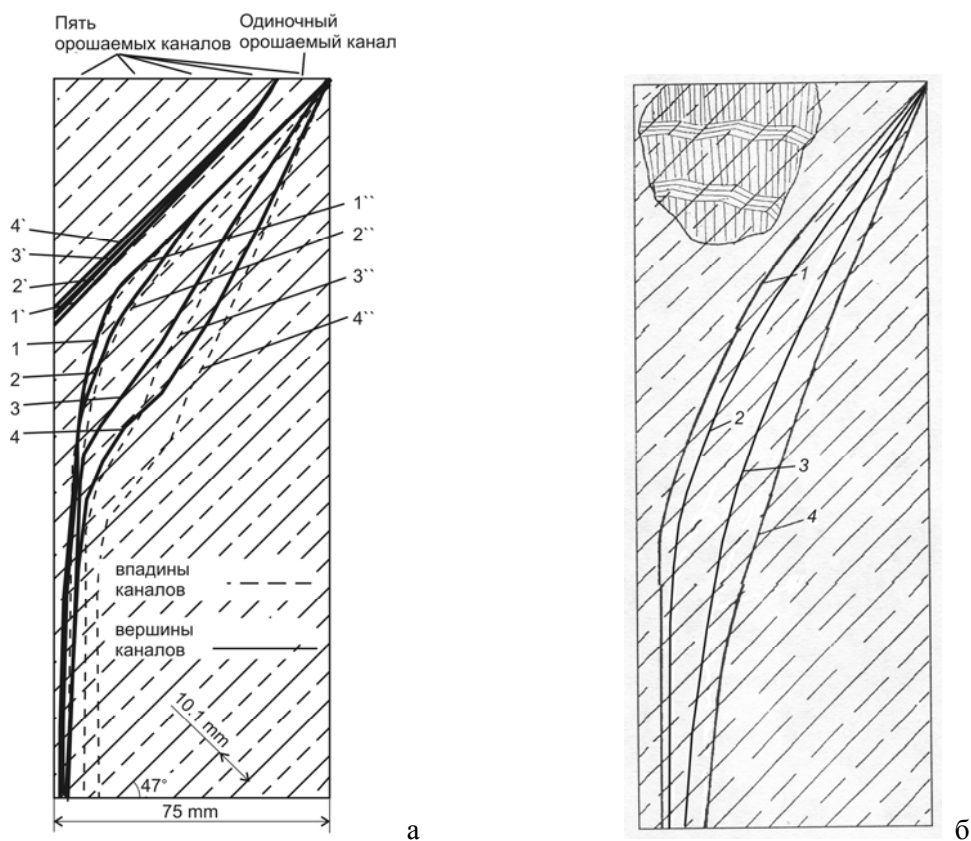


Рис. 2. Границы областей пленочного течения жидкого азота. Диаметр отверстий 4,0 мм (на рисунках не показаны); а – пластина с горизонтальным направлением микротекстуры, одиночно орошаемый канал: 1, 1', 2, 2', 3, 3', 4, 4' – $q = 0,20 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$ ($Re = 258$); $0,35 \cdot 10^{-6}$ (452); $0,52 \cdot 10^{-6}$ (667); $0,67 \cdot 10^{-6}$ (860) соответственно (линии, помеченные цифрами с одним штрихом, соответствуют верхним границам линий смачивания; без штриха – нижним границам линий смачивания); пять орошаемых каналов: 1'', 2'', 3'', 4'' – $q = 1 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$ ($Re = 258$); $1,75 \cdot 10^{-6}$ (452); $2,59 \cdot 10^{-6}$ (667); $3,34 \cdot 10^{-6}$ (860) соответственно (линии, помеченные цифрами с двумя штрихами, соответствуют нижним границам линий смачивания); б – пластина с комбинированной микротекстурой при орошении пяти каналов на верхнем срезе: 1–4 – $1 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$; $1,75 \cdot 10^{-6}$; $2,59 \cdot 10^{-6}$; $3,34 \cdot 10^{-6}$ соответственно

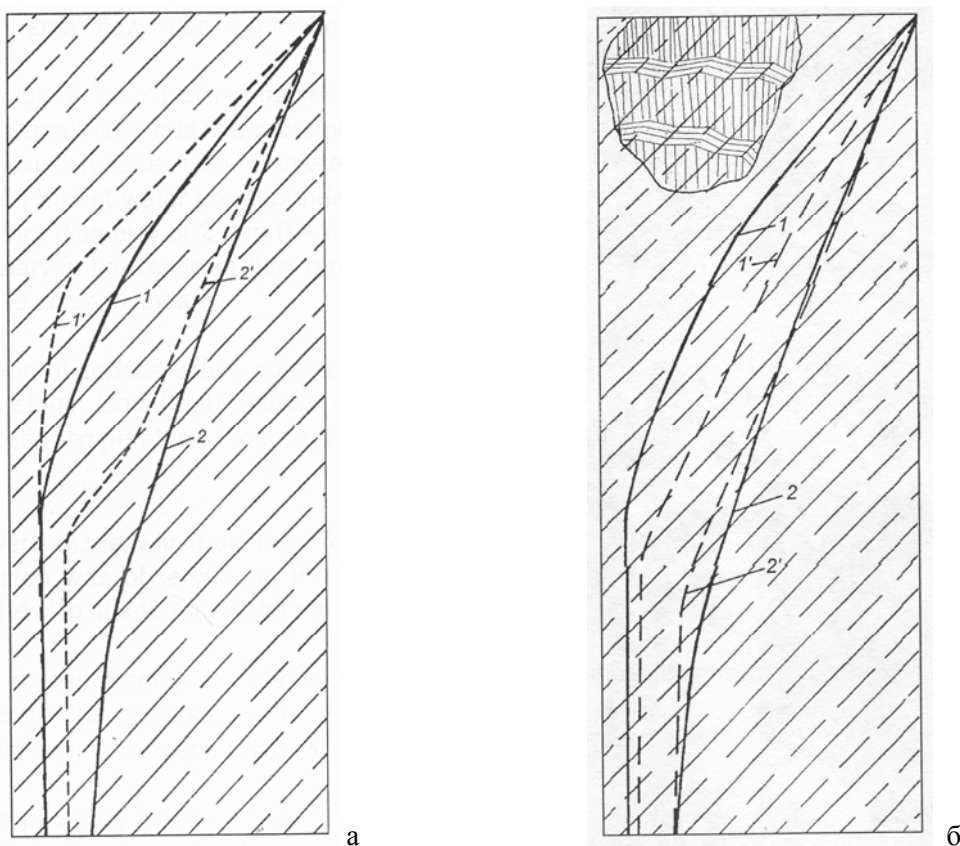


Рис. 3. Границы областей пленочного течения жидкого азота. Орошение пяти каналов на верхнем срезе: *a* – диаметр отверстий 4,0 мм; 1, 2 – пластина с комбинированной микротекстурой; 1', 2' – с горизонтальной микротекстурой; *b* – пластины с комбинированной микротекстурой: 1, 2 – 4,0 мм; 1', 2' – 2,3 мм; 1, 1' – $q = 1 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$ ($Re = 258$); 2, 2' – $3,34 \cdot 10^{-6}$ (860) соответственно

личением расхода жидкости размер зон растекания жидкости в неорошаемой (по каналам) части пластин существенно увеличивается. Из анализа рис. 2, *a*, *b* видно, что при малых значениях степени орошения, и соответственно числа Рейнольдса ($Re = 258$; 452), зона смачивания распространяется не более чем на 1–2 нижележащих канала в левой части пластин. С увеличением степени орошения ($Re = 667$; 860) зона смачивания распространяется на 4–8 нижележащих канала в левой части пластин.

Как показывает сравнение (см. рис. 2), положения нижних границ смоченных зон на пластине с горизонтальной микротекстурой близки друг другу для двух рассмотренных случаев при орошении всех каналов или одиночного канала на верхнем срезе пластины. Здесь следует обратить внимание на то, что при одинаковых плотностях орошения Γ (для обеспечения в опытах аналогичных значений пленочного числа Рей-

нольдса) объемные расходы жидкости q при орошении пяти каналов были в пять раз больше, чем при орошении одиночного канала.

На рис. 3, *a* представлено сравнение размеров зон смоченной поверхности для пластин с горизонтальной и комбинированной микротекстурой при минимальном и максимальном значениях степени орошения. Анализ полученных результатов показывает, что форма микротекстуры оказывает существенное влияние на характер пленочного течения жидкости и размер, форму зон ее растекания по поверхности пластин. Для пластины с комбинированной микротекстурой по сравнению с пластиной, имеющей горизонтальное направление микротекстуры, размер смоченных зон увеличивается при всех указанных значениях степени орошения. В случае горизонтальной микротекстуры при наименьшем значении числа Рейнольдса ($Re = 258$) жидкость практически

не перетекает через вершины каналов из орошаемых каналов в неорошаемую часть пластины. Пленочное течение жидкости в зонах с вертикальными каналами микротекстуры способствует более значительному ее перетоку через вершины крупных ребер, обеспечивая смачивание большей части поверхности пластины. Визуализация течения жидкости на орошаемой (лицевой) и неорошаемой (обратной) сторонах пластины с комбинированной микротекстурой показывает, что наблюдается значительный переток жидкости через отверстия, оказывающий также существенное влияние на размер и форму зон ее растекания. Как показывают результаты высокоскоростной видеосъемки, при комбинированной микротекстуре зоны смачивания на обратной (неорошаемой) поверхности пластин имеют практически аналогичную форму, что и на лицевой (орошаемой) ее части при всех исследованных значениях степени орошения. Это обусловлено взаимными интенсивными перетоками азота через отверстия как с орошаемой части пластины на обратную сторону, так и наоборот, с обратной ее стороны на орошаемую поверхность пластины. Выявлено, что в случае горизонтальной микротекстуры интенсивность перетока жидкости через отверстия значительно более низкая, особенно при малых значениях степени орошения. Очевидно, что более значительный переток жидкости через отверстия на пластине с комбинированной микротекстурой связан с наличием зон с вертикальными каналами, в которых реализуется более интенсивное струйное перетекание жидкости на обратную сторону пластины. Пленочное течение жидкости с распространением вторичных волн вдоль каналов горизонтальной микротекстуры, как следует из результатов экспериментальных исследований [21; 32], способствует более равномерному растеканию, распределению жидкости по ширине каналов пластины, что в итоге способствует снижению перетока жидкости через отверстия.

На рис. 3, б представлено сравнение размеров зон смоченной поверхности для пластин с комбинированной микротекстурой при различных диаметрах отверстий для минимального и максимального значений степени орошения. Видно, что при малой степени орошения размер зон смоченной поверхности на корругированной пластине с

диаметром отверстий 2,3 мм значительно больше, чем при диаметре отверстий 4,0 мм. При большей степени орошения нижние границы зон смачивания практически одинаковы для обеих пластин. Существенное различие в размере зон смачивания при малом расходе жидкости, по-видимому, связано с различным общим количеством перетекаемой жидкости с лицевой стороны пластины на обратную и с обратной на лицевую через отверстия разного диаметра. Как показывает анализ результатов высокоскоростной видеосъемки, при малой толщине пленки, и соответственно низкой скорости набегающей жидкости, основной переток через отверстия диаметром 4,0 мм, как правило, наблюдается только с вертикального (центрального) микроканала микротекстуры, примыкающего к верхнему полупериметру отверстий. Жидкость, набегающая на отверстие диаметром 4,0 мм по двум близлежащим вертикальным микроканалам на верхнем полупериметре, обтекает его. Необходимо отметить, что общая доля площади, занятой отверстиями разного размера, для обеих пластин одинакова. Соответственно общее количество отверстий диаметром 2,3 мм на пластине примерно втрое больше, чем отверстий диаметром 4,0 мм. Очевидно, что при малой степени орошения общее количество жидкости, перетекающей через отверстия меньшего размера, будет значительно больше, чем на пластине с отверстиями большего размера. Это объясняет указанное выше увеличение размера смоченной зоны на пластине с меньшим диаметром отверстий при малых расходах жидкости. При максимальном значении степени орошения переток жидкости через отверстия диаметром 4,0 мм наблюдается со всех вертикальных микроканалов, примыкающих к верхнему полупериметру отверстий (так же как и для пластины с отверстиями диаметром 2,3 мм). Как следствие, общие количества жидкости, перетекающей через отверстия, становятся близкими друг другу для данных двух пластин. Это является основным фактором, определяющим сближение нижних границ зон смачивания на пластинах, имеющих комбинированную микротекстуру, с различным диаметром отверстий при больших значениях степени орошения.

Таким образом, показано влияние формы микротекстуры, размера отверстий на ха-

рактеристики течения, динамику и расположение зон разрыва пленки жидкости и возникновение устойчивых сухих пятен на гофрированной поверхности при различных способах и степени орошения. Выявленные закономерности, несомненно, представляют интерес для разработчиков конструктивных элементов дистилляционных колонн, для создания современных моделей тепло- и массообмена при противоточном течении парожидкостного потока в структурированных насадках различной геометрии и их тестирования в широком диапазоне изменения степени орошения.

Заключение

Представлены результаты экспериментальных исследований по изучению характера, особенностей пленочного течения азота по поверхности единичных элементов структурированных насадок. Получены новые опытные данные по влиянию формы микротекстуры, диаметра отверстий на зоны растекания пленки жидкости по корругированной поверхности при различных значениях пленочного числа Рейнольдса. Показано, что наличие комбинированной микротекстуры приводит к лучшему растеканию пленки азота по поверхности корругированной перфорированной пластины. Наличие периодических зон с вертикальным направлением микроканалов на пластинах с комбинированной микротектурой обеспечивает более значительный переток жидкости через отверстия по сравнению с пластиной, имеющей горизонтальное направление микротекстуры. Использование отверстий меньшего диаметра при сохранении общей площади, занимаемой отверстиями, при малой степени орошения также приводит к увеличению размера зон смачивания на пластине с комбинированной микротектурой.

Полученные результаты важны как для разработки оптимальных форм структурированных поверхностей, совершенствования конструкций распределителей жидкости с целью интенсификации тепло- и массообмена и повышения эффективности разделения смесей при дистилляции на структурированных насадках для широкого диапазона изменения степени орошения, так и для построения моделей описания процессов разделения смесей в данных условиях, учитывающих реальный характер пленочного

течения жидкости по поверхностям сложной геометрии.

Список литературы

1. *Behrens M.* Hydrodynamics and mass transfer performance of modular catalytic structure packing // Doctor Diss. Delft University of Technology. Delft, 2006. 279 p.

2. *Soulaine C., Horgue P., Franc, J., Quintard M.* Gas-liquid flow modeling in columns equipped with structured packing // *AIChE J.* 2014. Vol. 60. P. 3665–3674.

3. *Oluji'ca Z., Rietfortb T., Jansenb H., Zich E.* Performance characteristics of an intermediate area high performance structured packing // *Chemical Engineering Research and Design.* 2015. Vol. 99. P. 14–19.

4. *Павленко А. Н., Печеркин Н. И., Чехович В. Ю., Жуков В. Е., Сандер С., Хоуптон П.* Экспериментальное исследование влияния неравномерности орошения на входе структурированной насадки на эффективность разделения смеси фреонов // *Теоретические основы химической технологии.* 2009. Т. 43, № 1. С. 3–13.

5. *Yoshiyuki I., Xi C.* Development of numerical prediction of liquid film flows on packing elements in absorbers // *IHI Engineering Review.* 2011. Vol. 44. P. 1–8.

6. *Viva A., Aferka S., Brunazzi E., Marchot P., Crine M., Toye D.* Processing of X-ray tomographic images: a procedure adapted for the analysis of phase distribution in Mellapak Plus 752.Y and Katapak-SP packings // *Flow Measurement and Instrumentation.* 2011. Vol. 22. P. 279–290.

7. *Пушинов А. С.* Влияние формы насадки и ее геометрических характеристик на гидродинамику и эффективность процессов тепло- и массообмена в колонных аппаратах с регулярной и насыпной и насадкой // *Химическая промышленность.* 2012. Т. 89, № 4. С. 170–180.

8. *Протасов С. К., Боровик А. А., Матвейко Н. П.* Исследование новой регулярной насадки // *Химическая промышленность.* 2013. Т. 90, № 2. С. 97–101.

9. *Grunig J., Kim S.-J., Kraume M.* Liquid film flow on structured wires: fluid dynamics and gas-side mass transfer // *AIChE. J.* 2013. Vol. 59. Is. 1. P. 295–302.

10. *Janzen A., Steube J., Aferka S., Kenig E. Y., Crine M., Marchot P., Toye D.* Investigation of liquid flow morphology inside a

- structured packing using X-ray tomography // *Chemical Engineering Science*. 2013. Vol. 102. P. 451–460.
11. Pavlenko A. N., Zhukov V. E., Pecherkin N. I., Chekhovich V. Yu., Volodin O. A., Shilkin A., Grossmann C. Investigation of flow parameters and efficiency of mixture separation on a structured packing // *AIChE J.* 2014. Vol. 60. Is. 2. P. 690–705.
12. Li H., Wang F., Wang C., Gao X., Li X. Liquid flow behavior study in SiC foam corrugated sheet using a novel ultraviolet fluorescence technique coupled with CFD simulation // *Chemical Engineering Science*. 2015. Vol. 123. P. 341–349.
13. Pavlenko A. N., Li X., Zhukov V. E., Pecherkin N. I., Volodin O. A., Surtaev A. S., Gao X., Zhang L., Sui H., Li H. Effect of dynamically controlled irrigation of a structured packing on mixture separation efficiency // *Journal of Engineering Thermophysics*. 2015. Vol. 24. No. 3. P. 210–221.
14. Yao Y., Pavlenko A. N., Volodin O. A. Effects of layers and holes on performance of wire mesh packing // *Journal of Engineering Thermophysics*. 2015. Vol. 24. No. 3. P. 222–236.
15. Лантева Е. А., Лантев А. Г. Прикладные аспекты явлений переноса в аппаратах химической технологии и теплоэнергетики (гидромеханика и тепломассообмен) / Под ред. Н. Н. Зиятдинова. Казань: Печать-Сервис XXI век, 2015. 236 с.
16. Фарахов М. И., Лантев А. Г., Башаров М. М. Модернизация массообменных аппаратов новыми насадками в химической технологии // *Теоретические основы химической технологии*. 2015. Т. 49, № 3. С. 247–252.
17. 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.
18. Christians M., Thome J. R. Falling film evaporation on enhanced tubes, part 1: Experimental results for pool boiling, onset-of-dryout and falling film evaporation // *Int. J. of Refrigeration*. 2012. Vol. 35. No. 2. P. 300–312.
19. Володин О. А., Павленко А. Н., Печеркин Н. И., Сердюков В. С. Испарение и кипение пленки бинарной смеси фреонов на вертикальном цилиндре с сетчатым покрытием // *Вестн. Новосиб. гос. ун-та. Серия: Физика*. 2014. Т. 9, вып. 1. С. 70–78.
20. Сердюков В. С., Суртаев А. С., Володин О. А. Исследование динамики парообразования при кипении в стекающих недогретых пленках жидкости // *Вестн. Новосиб. гос. ун-та. Серия: Физика*. 2014. Т. 9, вып. 2. С. 145–155.
21. Pecherkin N. I., Pavlenko A. N., Volodin O. A. Heat transfer and critical heat flux at evaporation and boiling in refrigerant mixture films falling down the tube with structured surfaces // *Intern. J. Heat Mass Transfer*. 2015. Vol. 90. P. 149–158.
22. Pecherkin N. I., Pavlenko A. N., Volodin O. A. Heat transfer and crisis phenomena at the film flows of freon mixture over vertical structured surfaces // *Heat Transfer Engineering*. 2016. Vol. 37. No. 3–4. P. 257–268.
23. Чиннов Е. А. Изменение пульсаций температуры в нагреваемой пленке жидкости // *Письма в ЖТФ*. 2015. Т. 41, вып. 15. С. 53–59.
24. Shatskiy E. N., Chinnov E. A. Synchronous measurement of thickness and surface temperature fields in falling heated liquid film // *High Temperature*, 2016. Vol. 54. No. 6. P. 901–904.
25. Chinnov E. A. Enhancement of thermocapillary effect in heated liquid films for large waves at high Reynolds numbers // *J. Heat Transfer*. 2016. Vol. 138. No. 9. P. 092901–092901-8.
26. Chinnov E. A. Formation of the unsteady thermocapillary structures in the residual layer of three-dimensional waves // *Intern. J. Heat Mass Transfer*. 2017. Vol. 108. P. 2053–2059.
27. Chernyavskii A. N., Pavlenko A. N. Numerical simulation of heat transfer and determination of critical heat fluxes at nonsteady heat generation in falling wavy liquid films // *Intern. J. Heat Mass Transfer*. 2017. Vol. 105. P. 648–654.
28. Lu Y., Stehmann F., Yuan S., Scholl S. Falling film on a vertical flat plate – Influence of liquid distribution and fluid properties on wetting behavior // *Applied Thermal Engineering*. 2017. 16 p.
29. Павленко А. Н., Володин О. А., Сердюков В. С. Особенности пленочного течения азота по структурированным поверхностям // *Вестн. Новосиб. гос. ун-та. Серия: Физика*. 2015. Т. 10, вып. 1. С. 33–41.

30. Павленко А. Н., Володин О. А., Сердюков В. С. О влиянии угла наклона ребер на растекание пленки жидкости по структурированной поверхности // Вестн. Новосиб. гос. ун-та. Серия: Физика. 2015. Т. 10, вып. 1. С. 42–49.

31. Павленко А. Н., Li X., Li H., Gao X., Володин О. А., Суртаев А. С., Сердюков В. С. Влияние микротекстуры, угла наклона ребер и перфорации поверхностей сложной геометрии на растекание жидкости // ПЖТФ. 2015. Т. 41, вып. 16. С. 21–28.

32. Pavlenko A. N., Volodin O. A., Surtayev A. S. Hydrodynamics in falling liquid films on surfaces with complex geometry // Applied Thermal Engineering. 2016. Vol. 114. P. 1265–1274.

33. Павленко А. Н., Суртаев А. С., Володин О. А., Сердюков В. С. Распределение жидкого азота при пленочном течении в единичных элементах структурированных насадок // Вестн. Новосиб. гос. ун-та. Серия: Физика. 2016. Т. 11, вып. 2. С. 12–20.

34. Павленко А. Н., Суртаев А. С., Володин О. А., Сердюков В. С. О влиянии угла наклона ребер на распределение жидкого азота при пленочном течении в единичных элементах структурированных насадок // Вестн. Новосиб. гос. ун-та. Серия: Физика. 2016. Т. 11, вып. 2. С. 21–27.

Материал поступил в редколлегию 01.05.2017

A. N. Pavlenko¹, A. S. Surtayev¹, O. A. Volodin¹, V. S. Serdyukov^{1,2}

¹ Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS
1 Acad. Lavrentiev Ave., Novosibirsk, 630090, Russian Federation

² Novosibirsk State University
2 Pirogov Str., Novosibirsk, 630090, Russian Federation

pavl@itp.nsc.ru, surtayev@itp.nsc.ru
volodin@ngs.ru, vsserd@gmail.com

THE FEATURES OF THE FILM FLOW OF LIQUID NITROGEN OVER THE CORRUGATED PLATES WITH COMBINED MICROTTEXTURE

Experimental results on hydrodynamics of cryogenic liquid film flow over the surface of the single elements of the structured packing are presented. Based on the comparison of experimental data, the effect of microtexture form, diameter of the holes on the zones of liquid film spreading over a corrugated surface is shown for different values of the film Reynolds number. It is shown that the presence of combined microtexture (with the periodic change in its direction at the height of the sheet) leads to a better spreading of the liquid nitrogen film on the surface of the corrugated perforated sheet. Analysis of experimental data shows that the presence of the periodic zones with vertical orientation of the microchannels on the sheets with the combined microtexture provides the greater flow of liquid through the holes compared to the sheet having the horizontal direction of microtexture. The use of smaller holes, while maintaining the same total area occupied by holes, at the small degree of irrigation also leads to increasing size of the wetting zones on the sheet with combined microtexture.

Keywords: flowing liquid films, wetting, structured packings, combined microtexture.