

03

Влияние микротекстуры, угла наклона ребер и перфорации поверхностей сложной геометрии на растекание жидкости

© А.Н. Павленко¹, Х. Ли², Н. Ли², Х. Гао², О.А. Володин¹,
А.С. Суртаев¹, В.С. Сердюков¹

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

² School of Chemical Engineering and Technology, Tianjin University,
Tianjin 300072, China
E-mail: pavl@itp.nsc.ru

Поступило в Редакцию 20 марта 2015 г.

Представлены результаты экспериментального исследования растекания пленки азота по поверхности единичных элементов структурированной насадки. На основе сравнения опытных данных показано влияние горизонтальной микротекстуры, перфорации, угла наклона больших ребер на зоны растекания пленки жидкости по корругированной поверхности при различных значениях пленочного числа Рейнольдса. Приводятся результаты опытов по зависимости относительной доли жидкости, удерживаемой в одиночно орошаемом канале корругированных пластин различной толщины, от степени орошения.

Режимы пленочного течения жидкостей и их смесей на поверхностях сложной геометрии широко используются в современных теплообменных аппаратах: дистилляционных колоннах, градирнях, каталитических реакторах, абсорберах, в теплообменниках холодильной техники, в системах термостабилизации различного назначения [1–4]. Это обусловлено тем, что течение тонких пленок жидкости обеспечивает высокие теплообменные характеристики при малых температурных и концентрационных напорах. Наиболее эффективным способом интенсификации теплообмена в таких системах является структурирование поверхности с использованием ребрения, нанесения различных микротекстур, капиллярно-пористых, сетчатых или нанопокровов, создание градиентных смачивающих свойств. Основной проблемой для

высокоэффективной работы оборудования, использующего структурированные поверхности, является обеспечение равномерного течения пленки жидкости по поверхности сложной геометрии [5]. В последнее время начинают интенсивно развиваться как теоретические, так и экспериментальные исследования по изучению влияния параметров структурирования поверхности на гидродинамику пленочного течения жидкости [6,7].

Целью данной работы является экспериментальное изучение особенностей пленочного течения азота по единичным элементам регулярных насадок, влияния параметров структурирования на растекание жидкости по поверхности сложной геометрии.

Исследования были проведены на экспериментальной установке, принципиальная схема которой описана в [8]. Опытные данные получены при течении жидкого азота в диапазоне изменения пленочного числа Рейнольдса $Re = 4\Gamma/\nu = 40 - 4000$, соответствующем ламинарно-волновому и турбулентному режимам течения. Здесь: $\Gamma = q/l$ — плотность орошения, m^2/s ; q — объемный расход жидкости, m^3/s ; l — периметр орошаемых каналов на верхнем срезе пластины, m ; ν — коэффициент кинематической вязкости, m^2/s . Были проведены три экспериментальные серии, в которых исследованы закономерности растекания и пленочного течения жидкого азота по поверхности одиночных корругированных пластин с углом наклона больших ребер 47° : на перфорированной пластине с горизонтальной микротекстурой, на перфорированной пластине при отсутствии микротекстуры, на пластине при отсутствии микротекстуры и отверстий. В двух дополнительных сериях опыты были проведены с использованием корругированных перфорированных пластин с микротекстурой при углах наклона больших ребер 30 и 75° соответственно. При проведении опытов на одиночных структурированных пластинах другие геометрические параметры оставались неизменными. Микротекстура имела амплитуду 0.2 mm и шаг 1.5 mm ; толщина пластин из алюминия составляла 0.2 mm , высота ребер — 7 mm , длина волны гофрирования — 10.1 mm , угол раскрытия ребер — 60° , диаметр отверстий составлял 4 mm . Параметры гофрирования пластины, микротекстуры, отверстий соответствуют аналогичным характеристикам целого ряда промышленных структурированных насадок, например типа Зульцер 500У. В опытах с углом наклона ребер 47° аналогичные опыты были проведены также при толщине пластины 0.15 mm . Рабочие участки шириной 75 mm и длиной 300 mm

присоединялись ко дну бака постоянного уровня. Жидкость в виде пленки поступала на рабочие участки через распределительную щель, образованную двумя пластинами. Форма распределительной щели имела ту же геометрию и углы изгиба, что и экспериментальные гофрированные пластины. Жидкий азот подавался на фронтальную сторону пластин. Во время экспериментов было обеспечено равномерное орошение каналов на верхнем срезе исследуемых пластин. В экспериментах на пластинах с углом наклона ребер 47° использовались два метода орошения. В первом случае в верхней части пластин орошались все пять каналов. Во втором случае (в опытах на рифленной перфорированной пластине с микротекстурой) орошался только один крайний правый канал, что позволило определить объемным методом измерения зависимость относительной доли жидкости, перетекающей из орошаемого канала в неорошаемую часть пластины, от степени орошения. Визуализация течения и съемка осуществлялись через оптические окна с использованием высокоскоростной цифровой видеокамеры Phantom 7.0.

Показано, что размер зон растекания жидкости весьма существенно зависит от степени орошения. Благодаря интенсивному перетоку через вершины крупных каналов с увеличением расхода жидкости размер зон растекания жидкости в неорошаемой (по каналам) части пластин существенно увеличивается (рис. 1). Анализ полученных результатов показывает, что наличие микротекстуры оказывает существенное влияние на характер пленочного течения жидкости и размер, форму зон ее растекания по поверхности пластин. Наличие горизонтальной микротекстуры оказывает наибольшее влияние при малой степени орошения (при числах Рейнольдса меньше 300), когда средняя толщина пленки жидкости становится значительно меньше амплитуды микротекстуры. При наличии микротекстуры при малых значениях степени орошения размер смоченных зон в зоне неорошаемых каналов заметно уменьшается (сравнить рис. 1, *a*, *b*). При наименьшем значении числа Рейнольдса ($Re = 258$) жидкость практически не перетекает из орошаемых каналов в неорошаемую часть пластины. В то же время, как показывает визуализация, наличие микротекстуры способствует более равномерному распределению пленки жидкости по периметру больших каналов корругированной пластины. Это согласуется с выводами теоретического исследования [7], на основе которого было показано, что наличие горизонтальной микротекстуры препятствует

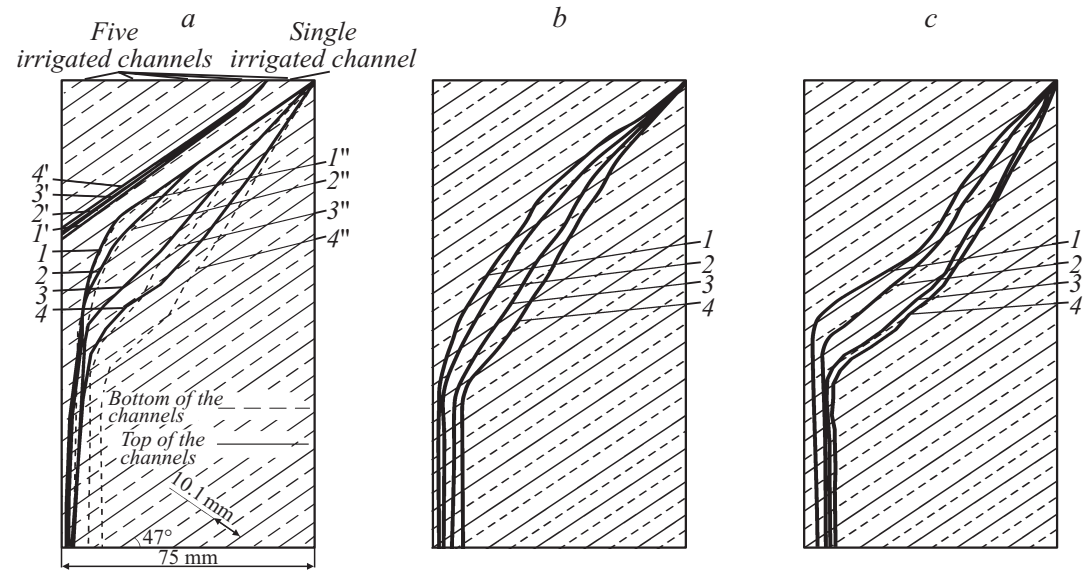


Рис. 1. Границы областей пленочного течения жидкого азота. Угол наклона ребер 47° , диаметр отверстий 4 mm (на рисунке не показаны), толщина пластин 0.2 mm. *a* — перфорированная пластина с горизонтальным направлением микротекстуры, одиночно орошаемый канал: 1, 1'; 2, 2'; 3, 3'; 4, 4' — $q = 0.20 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ ($Re = 258$); $0.35 \cdot 10^{-6}$ (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'' (линии, помеченные цифрами с двумя штрихами, соответствуют нижним границам линий смачивания). *b, c* — перфорированная пластина без микротекстуры (*b*) и пластина без микротекстуры и без отверстий (*c*) при орошении пяти каналов на верхнем срезе: 1, 2, 3, 4 — $q = 1 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ ($Re = 258$), $1.75 \cdot 10^{-6}$ (452), $2.59 \cdot 10^{-6}$ (667), $3.34 \cdot 10^{-6}$ (860).

образованию струйного течения и может увеличивать относительную долю смоченной поверхности.

Визуализация течения жидкости на орошаемой (лицевой) и неорошаемой (обратной) сторонах пластин показывает, что наблюдается значительный переток жидкости через отверстия, оказывающий также влияние на размер и форму зон ее растекания. Показано, что интенсивность перетока через отверстия существенно зависит как от локального расхода жидкости в каналах, так и от их расположения на поверхности каналов. Анализ кинофотограмм показывает, что при уменьшении плотности орошения одиночных каналов до значений $0.05 \cdot 10^{-4} - 0.07 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$ (в зависимости от расположения отверстий) переток азота через отверстия полностью прекращается. Эта область изменения величины Γ соответствует диапазону изменения пленочного числа Рейнольдса Re от 115 до 160. При значениях $Re \leq Re_{char.1} \approx 100$ наблюдается и полное прекращение перетока азота через вершины крупных ребер. В то же время обтекание жидкостью отверстий, расположенных у вершин каналов, способствует более интенсивному ее перетоку через ребра. Таким образом, отверстия способствуют перетеканию жидкости в нижележащие каналы корругированной пластины за счет как многократных перетоков жидкости через них (с орошаемой стороны пластины на обратную и наоборот), так и снижения порогового значения для ее перетока через вершины каналов. Размер смоченных зон на орошаемой стороне пластины с отверстиями существенно уменьшается по сравнению с данными для пластины без отверстий при малой степени орошения, когда переток жидкости через отверстия на обратную сторону пластины заметно снижает общий расход жидкости на ее орошаемой стороне, а обратный поток через отверстия еще незначителен и еще не компенсирует взаимные общие перетоки с разных сторон пластины (сравнить данные при $Re = 258$ и $Re = 452$ на рис. 1, *b, c*).

Зависимость относительной доли жидкости, удерживаемой в одиночно орошаемом канале, от степени орошения приведена на рис. 2. На рисунке величина q_{irrig} соответствует объемному расходу жидкости на входе в орошаемый канал, q_{hold} — объемному расходу жидкости, стекающей с левого края орошаемого канала. При малой степени орошения ($Re \leq re_{char.1} \approx 100$) вся жидкость течет только вдоль орошаемого канала. С увеличением степени орошения относительная доля жидкости, удерживаемой в орошаемом канале, резко уменьшается

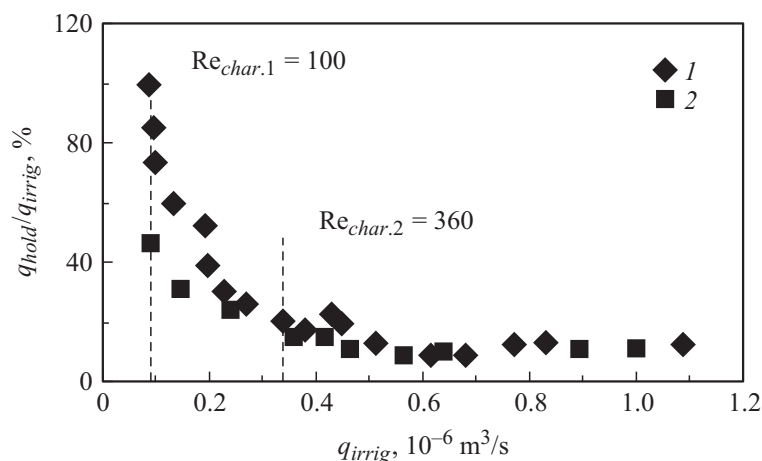


Рис. 2. Зависимость относительной доли азота, удерживаемого в одиночно орошаемом канале, от степени орошения. Угол наклона ребер 47° , горизонтальное направление микротекстуры, диаметр отверстий 4 мм; 1, 2 — толщина пластин: 0,2; 0,15 мм.

благодаря перетоку в нижележащие каналы, и затем при достижении $Re = Re_{char.2} \approx 360$ ее значение выходит на постоянное значение. Как показывает сравнение кривых на рис. 1, а, положения нижних границ смоченных зон в то же время близки друг другу для двух рассмотренных случаев при орошении всех пяти каналов или одиночного канала на верхнем срезе пластины. Как показывает визуализация, при малых расходах жидкости в случае орошения одиночного канала жидкость течет преимущественно в нижней части поверхности и впадине канала (рис. 1, а). Верхняя часть поверхности канала частично или полностью (в зависимости от степени орошения) остается несмоченной. Разрыв стекающей пленки будет приводить к выпадению значительной части поверхности из процесса массообмена и в конечном итоге снижать эффективность работы пленочного аппарата при уменьшении степени орошения (в особенности при $Re \leq Re_{char.1}$).

Анализ полученных результатов показывает, что размер и форма зон растекания жидкости весьма существенно зависят и от угла наклона ребер. Наиболее интенсивное растекание жидкости по поверхности пластины в зоне неорошаемых каналов наблюдается при угле

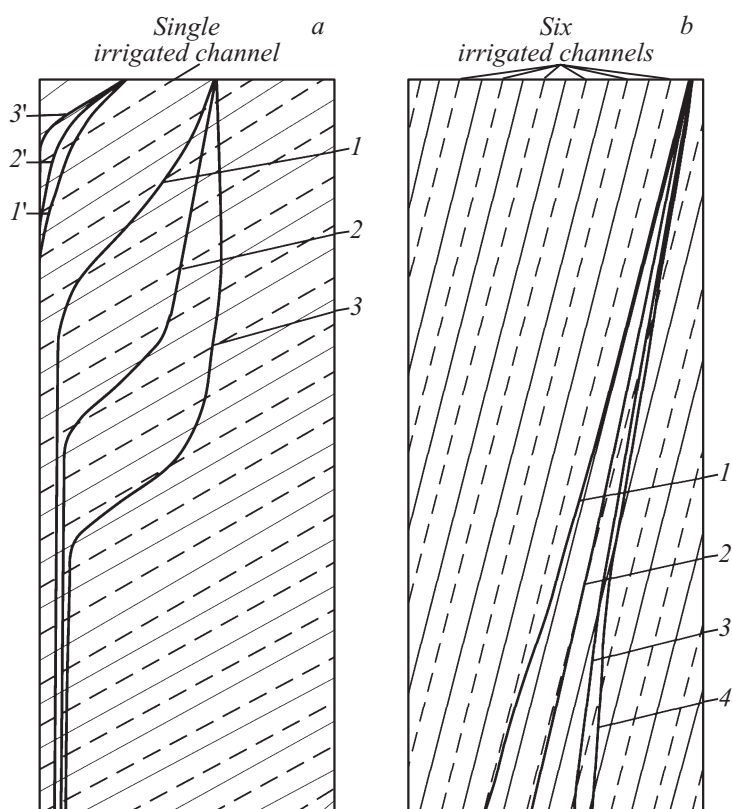


Рис. 3. Границы областей пленочного течения жидкого азота на рифленых поверхностях (отверстия на рисунке не показаны). *a* — угол наклона ребер 30° : 1, 1'; 2, 2'; 3, 3' — $q = 0.35 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ ($Re = 304$), $1.34 \cdot 10^{-6}$ (1164); $4.6 \cdot 10^{-6}$ (3996); *b* — 75° : 1, 2, 3, 4 — $q = 1.05 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ ($Re = 228$), $2.42 \cdot 10^{-6}$ (526), $3.33 \cdot 10^{-6}$ (708), $5.84 \cdot 10^{-6}$ (1268).

наклона ребер 30° (сравнить кривые на рис. 1, *a* и 3, *a, b*). Результаты высокоскоростной видеосъемки показывают, что при наибольшем угле наклона ребер наиболее интенсивное течение жидкости сосредоточено во впадинах каналов. При максимальном значении числа Рейнольдса (кривая 4 на рис. 3, *b*) жидкость смачивает частично лишь поверхность

двух нижележащих неорошаемых каналов. При близких значениях числа Рейнольдса на пластине с углом наклона ребер 30° течение жидкости распространяется на поверхность шести нижележащих неорошаемых каналов (рис. 3, *a*), на пластине с углом наклона ребер 47° (рис. 1, *a*) — на поверхность четырех нижележащих неорошаемых каналов.

Выявленные закономерности представляют интерес для разработчиков конструктивных элементов дистилляционных колонн и других теплообменных аппаратов при создании оптимальных форм структурированных поверхностей, совершенствовании конструкций распределителей жидкости с целью интенсификации теплообмена. Полученные результаты важны для развития современных моделей теплообмена при противоточном течении парожидкостного потока в структурированных насадках, учитывающих реальный характер пленочного течения жидкости по поверхностям сложной геометрии, и их тестирования в широком диапазоне изменения степени орошения.

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

Список литературы

- [1] Каган А.М., Лаптев А.Г., Пушинов А.С., Фарахов М.И. // Контактные насадки промышленных теплообменных аппаратов / Под ред. А.Г. Лаптева. Казань: Отечество, 2013. 454 с.
- [2] Чиннов Е.А., Абдуракипов С.С. // Письма в ЖТФ. 2013. Т. 39. В. 5. С. 41–47. (*Chinnov E.A., Abdurakipov S.S. // Tech. Phys. Lett. 2013. V. 39. N 3. P. 248–251.*)
- [3] Чиннов Е.А., Шатский Е.Н. // Письма в ЖТФ. 2014. Т. 40. В. 1. С. 16–23. (*Chinnov E.A., Shatskiy E.N. // Tech. Phys. Lett. 2014. V. 40. N 1. P. 7–9.*)
- [4] Чернявский А.Н., Павленко А.Н. // Письма в ЖТФ. 2014. Т. 40. В. 23. С. 1–8. (*Chernyavskii A.N., Pavlenko A.N. // Tech. Phys. Lett. 2014. V. 40. N 12. P. 1039–1041.*)
- [5] Pavlenko A.N., Zhukov V.E., Pecherkin N.I. et al. // *AIChE J.* 2014. V. 60. N 2. P. 690–705.
- [6] Grunig J., Kim S.J., Kraume M. // *AIChE J.* 2013. V. 59. N 1. P. 295–302.
- [7] Yoshiyuki I., Xi C. // *IHI Engineering Review.* 2011. V. 44. N 2. P. 1–8.
- [8] Павленко А.Н., Суртаев А.С., Цой А.Н. и др. // ТВТ. 2014. Т. 52. № 6. С. 886–894. (*Pavlenko A.N., Surtaev A.S., Tsoi A.N. et al. // High Temperature.* 2014. V. 52. N 6. P. 861–868).