

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*

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЖИДКОГО АЗОТА ПРИ ПЛЕНОЧНОМ ТЕЧЕНИИ В ЕДИНИЧНЫХ ЭЛЕМЕНТАХ СТРУКТУРИРОВАННЫХ НАСАДОК*

Представлены результаты экспериментального исследования 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 на распределение жидкости вдоль пакета при различной степени орошения. Приводятся результаты опытов по исследованию зависимости степени перетекания жидкости через контактные точки в пакетах с пластинами от степени орошения. Показано, что наличие микротекстуры и ее направление оказывают существенное влияние на перераспределение вдоль пакета локального расхода жидкости, стекающей по структурированной поверхности сложной геометрии.

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

Введение

В химической, криогенной промышленности широко распространены контактные газожидкостные теплообменные аппараты, в которых тепло- и массообмен между жидкостью и газом происходит при их непосредственном соприкосновении. К таким аппаратам относятся дистилляционные колонны, градирни, контактные выпарные аппараты, каталитические реакторы, абсорберы, скрубберы и др. [1–4]. Использование колонн со структурированными насадками в сравнении с тарельчатыми колоннами обеспечивает существенно меньшее гидравлическое сопротивление в расчете на единицу пере-

носа, более высокие нагрузки по пару и жидкости, что значительно повышает производительность колонн и снижает затраты энергии на получение полезных продуктов. Однако регулярные насадки по сравнению с насыпными весьма чувствительны, например, по эффективности разделения смесей при дистилляции, к равномерности распределения жидкости по сечению [5]. 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 гидро-

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

динамики, а также тепло- и массообмена 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 [6–16]. Строгое теоретическое исследование, моделирование таких течений и процессов не является на сегодня решенной задачей в связи с чрезвычайно высокой сложностью их описания [17]. Значительное влияние на эффективность разделения смесей, интенсивность тепло- и массообмена 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 [5; 14; 18–22]. Ограниченное число работ (см., например, [18; 20–22]) посвящено исследованию гидродинамики и тепло- и массообмена при волновых пленочных течениях маловязких высокосмачивающих жидкостей (фреоны и их смеси, азот). В то же время исследования параметров пленочного течения, распределения по поверхности сложной геометрии криогенных жидкостей в элементах структурированных насадок являются весьма актуальными, поскольку такие гидродинамические режимы реализуются в условиях дистилляции при криогенном разделении жидкого воздуха для получения чистых кислорода, азота, аргона и других продуктов. Экспериментальные данные по зависимости интенсивности перетока жидкости через контактные точки от степени орошения в структурированных насадках важны для построения и валидации различных теоретических моделей при численном моделировании гидродинамических, а также тепло- и массообменных процессов при дистилляции с использованием таких контактных устройств.

В работе [21] представлены результаты экспериментальных исследований по влиянию микротекстуры и ее направления на зоны растекания пленки азота по одиночной корругированной пластине 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 поверхности, не перетекая в находящиеся ниже каналы. При большей степени орошения происходит интенсивный переток жидкости в нижележащие каналы, обеспечивая смачивание и течение жидкости на значительной части поверхности корругированных пластин в неорошаемой зоне. Авторами работы [22] 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.

Целью данной работы является экспериментальное изучение особенностей пленочного растекания азота в единичных элементах структурированных насадок, состоящих из двух плотно прижатых друг к другу корругированных пластин, при различной степени орошения.

Методика эксперимента

Исследования были проведены на экспериментальной установке, принципиальная схема которой приведена на рис. 1. Опытные данные получены при течении жидкого азота, находящегося на линии насыщения, в диапазоне изменения пленочного числа Рейнольдса

$$Re = 4 \cdot \Gamma / \nu = 40 - 2500.$$

Здесь $\Gamma = q/l$ – плотность орошения, m^2/c ; q – объемный расход жидкости, m^3/c ; l – периметр орошаемых каналов на верхнем срезе пластины, m ; ν – коэффициент кинематической вязкости, m^2/c . Рабочая жидкость подается через криогенный трубопровод из гелиевого сосуда в бак постоянного уровня жидкости, размещенный во внутренней полости оптического криостата.

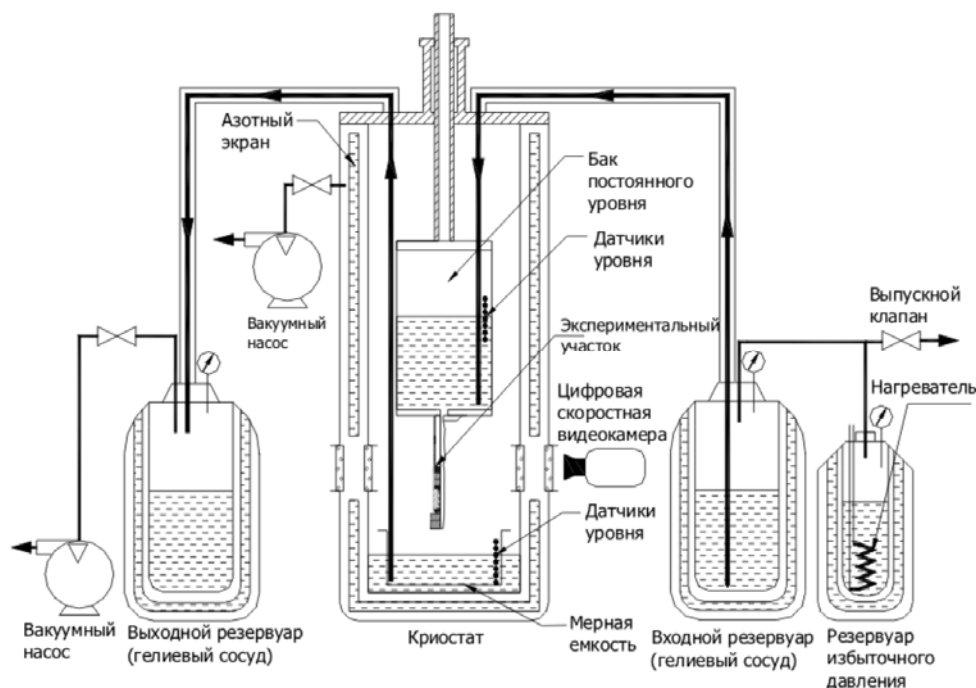


Рис. 1. Схема экспериментальной установки для исследования характеристик пленочного течения азота по структурированным поверхностям

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 опытов, в которых исследованы закономерности растекания и пленочного течения жидкого азота в пакетах по поверхности структурированных перфорированных пластин насадок при различном направлении микротекстуры (рис. 2, а, б) и в отсутствие микротекстуры (рис. 2, в) при изменении в практически реализуемом при дистилляции диапазоне степени пленочного орошения.

При проведении опытов на пакетах из структурированных пластин 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 гофр к горизонтали составлял 47° , высота ребер – 7 мм, длина волны гофрирования – 10,1 мм, угол раскрытия ребер – 60° , диаметр отверстий – 4 мм. Параметры гофрирования пластины, микротекстуры, отверстий соответствуют аналогичным характеристикам целого ряда промышленных структурированных насадок, например типа Зульцер 500У. Исследования на данных рабочих участках позволили изучить влияние микротекстуры, ее ориентации на динамику течения жидкости по элементам структурированной насадки при различной степени орошения. Одна из двух пластин шириной 75 мм и длиной 300 мм в пакете присоединялась ко дну бака постоянного уровня. Жидкость подавалась на пластину через щель распределительного устройства, образованную двумя пластинами, закрепленными на дне бака. Установка заданного размера щели обеспечивалась прокладкой калиброванной металлической фольги толщиной 50 мкм. Форма

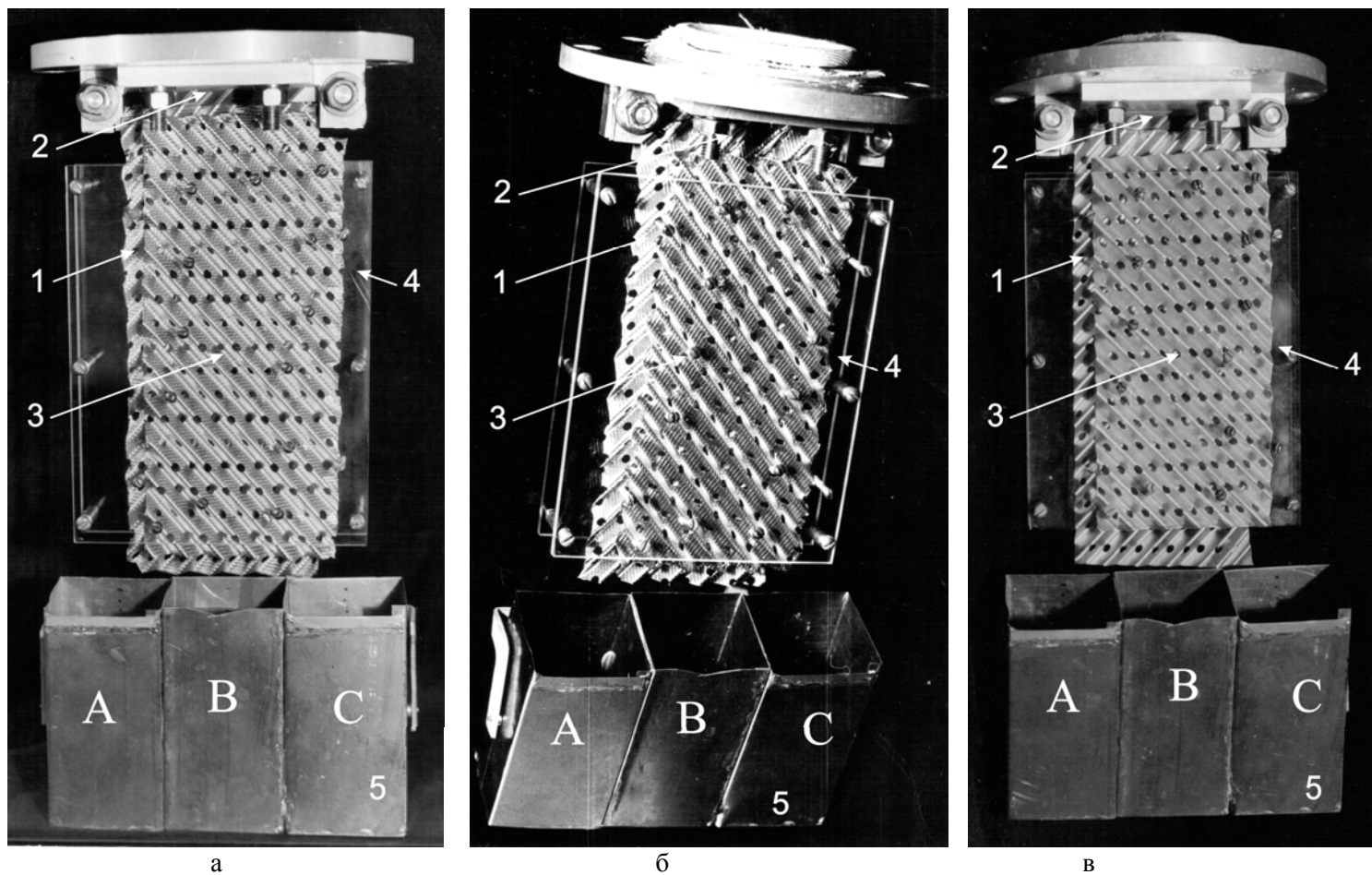


Рис. 2. Общий вид экспериментальной секции. Угол наклона крупных ребер 47° :
 1 – орошаемая пластина; 2 – распределительное устройство; 3 – неорошаемая пластина; 4 – прозрачные прижимные пластины; 5 – мерные сосуды А, В, С
 для измерения стекающих потоков азота с различных зон по ширине пакета, состоящего из двух плотно прижатых друг к другу структурированных пластин.
 Пластины с горизонтально (а) и вертикально (б) ориентированной микротекстурой и без микротекстуры (в)

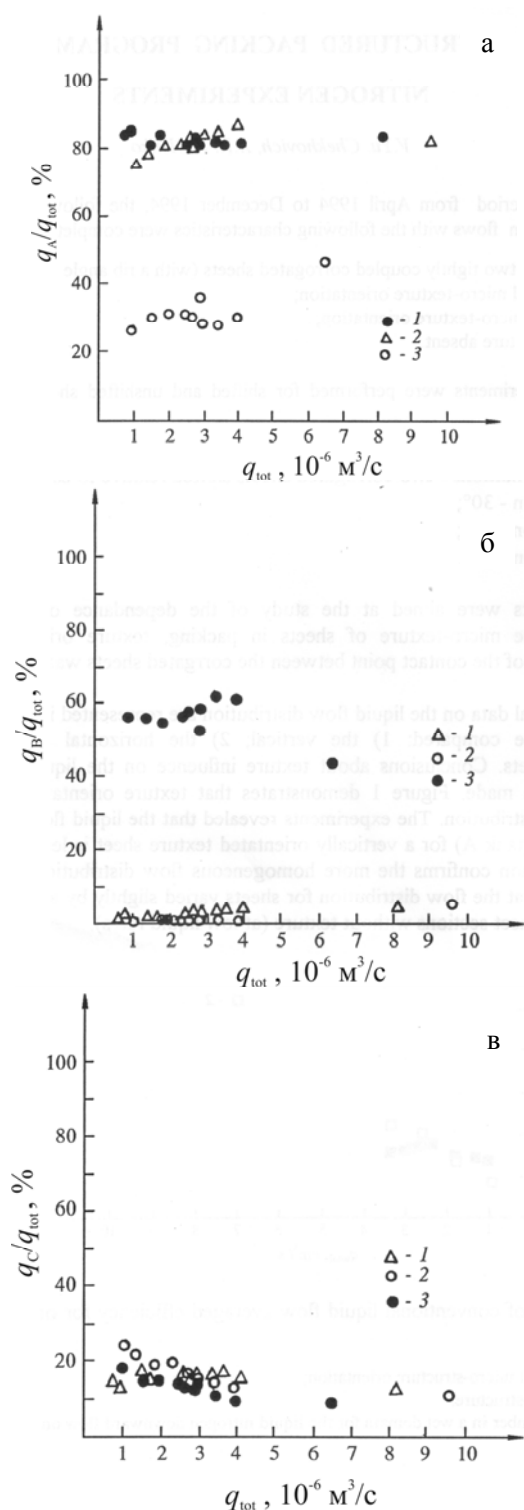


Рис. 3. Зависимости относительных долей жидкости, стекающей с нижнего среза пластин в различных по ширине пакета зонах, от степени орошения: а – зона в окрестности левого края орошаемой пластины (емкость А); б – средняя часть пакета (В); в – зона в окрестности правого края неорошаемой пластины (С). 1 – пластины без микротекстуры; 2, 3 – соответственно с горизонтально и вертикально ориентированной микротекстурой

распределительной щели имела ту же геометрию и углы изгиба, что и экспериментальные гофрированные пластины. Жидкий азот подавался на фронтальную сторону задней пластины. Во время экспериментов было обеспечено равномерное орошение каналов на верхнем срезе пластин. В верхней части всех исследованных пластин орошались все пять каналов. Неорошаемая пластина в пакетах плотно прижималась по всей поверхности к орошаемой пластине в сборке с использованием прозрачных стеклянных пластин с фиксирующими винтами. Неорошаемая пластина была смещена в данных опытах относительно орошаемой пластины вправо по горизонтали на 1 см с целью предотвращения попадания жидкости, стекающей с левого вертикального края орошаемой пластины, на неорошаемую пластину. В [21; 22] было показано, что при орошении одиночных структурированных пластин вся жидкость стекает по наклонным ребрам на левый вертикальный боковой край. При проведении данных опытов на пакетах использовались три мерные емкости (А, В, С), расположенные под исследованными пластинами (см. рис. 2). В экспериментах объемным методом регистрировался локальный расход жидкости, стекающей с окрестности левого края орошаемой пластины (емкость А), со средней части пакета (емкость В) и с правой части пакета (регистрация жидкости, стекающей с окрестности правого вертикального среза неорошаемой пластины, емкость С). Относительная доля жидкости, стекающей суммарно в емкости В и С, характеризует степень перераспределения жидкости в пакете исключительно вследствие ее перетока через контактные точки. В данных экспериментальных сечениях нижний горизонтальный край неорошаемых пластин находился несколько выше нижнего горизонтального среза орошаемых пластин для возможности регистрации наличия стока жидкости по ширине пакета с орошаемой пластины.

Результаты и обсуждение

В результате проведенных исследований получены новые опытные данные (рис. 3) для распределения локального расхода стекающих пленок азота по ширине пакетов структурированных насадок различной геометрии в диапазоне изменения пленочного

числа Рейнольдса, соответствующего ламинарно-волновому и турбулентному режимам течения. На рис. 3 величина q_{tot} соответствует объемному расходу жидкости на входе орошаемой пластины, q_A, q_B, q_C – объемный расход жидкости, стекающей в измерительные сосуды А, В, и С соответственно. Как видно из сравнения опытных данных, представленных на рис. 3, распределения относительных долей жидкости, стекающей в пакетах с пластин с горизонтальной микро-текстурой и пластин без микро-текстуры, близки друг к другу. Для пакета без микро-текстуры на пластинах относительная доля жидкости q_A/q_{tot} , стекающей с левого края орошаемой пластины, составляет (81–85) % и слабо зависит от степени орошения. Для пластин с горизонтальной микро-текстурой в пакете величина q_A/q_{tot} при орошении в области малых расходов жидкости монотонно возрастает в диапазоне (75–87) % с увеличением степени орошения. В области наибольших значений степени орошения соответствующие относительные доли жидкости $q_A/q_{\text{tot}}, q_B/q_{\text{tot}}, q_C/q_{\text{tot}}$ для двух рассмотренных выше случаев практически совпадают. Это объясняется тем, что при пленочном течении в области больших расходов жидкости происходит затопление впадин горизонтальной микро-текстуры, и ее влияние на распределение жидкости в пакете снижается. Как было отмечено, на основании результатов опытов, представленных в [21], при орошении одиночных структурированных пластин с горизонтальной микро-текстурой и без микро-текстуры вся жидкость стекает по наклонным ребрам на левый вертикальный боковой край, т. е. выполняется условие $q_A/q_{\text{tot}} = 1$. Существенное уменьшение величины q_A/q_{tot} в пакете указывает на значительное влияние перетока жидкости через контактные точки на распределение жидкости в структурированной насадке.

Как видно из сравнения опытных данных, представленных на рис. 3, а, б, ориентация микро-текстуры оказывает весьма существенное влияние на распределение по ширине пакета стекающей жидкости. Для пластин с вертикальной микро-текстурой относительная доля жидкости q_A/q_{tot} , стекающей с левого края орошаемой пластины, снижается почти в три раза. Происходит ее

перераспределение в центральную часть пакета. Это объясняется значительным отличием в характере растекания пленки жидкости на пластинах с горизонтальной микро-текстурой (так же, как и при ее отсутствии) в сравнении с пластинами при наличии вертикальной микро-текстуры. В исследовании [21] было показано, что при орошении одиночных пластин с горизонтальной микро-текстурой и при отсутствии микро-текстуры область течения пленки жидкости ограничена зонами орошаемых каналов и нескольких нижележащих каналов (в зависимости от степени орошения) в верхней части пластин. При вертикальном направлении микро-текстуры зона растекания жидкости распространяется на всю поверхность неорошаемых каналов во всем исследованном диапазоне изменения степени орошения. Пленочное течение жидкости по вертикальным каналам микро-текстуры способствует более значительному ее перетoku через вершины крупных ребер, обеспечивая смачивание всей поверхности пластины. В этом случае, как показывает визуализация, также существенно увеличивается переток жидкости через отверстия с одной стороны пластины на другую, заметно влияющий на перераспределение потока жидкости по поверхности пластин. Указанные особенности и соответствующий переток жидкости через контактные точки по всей поверхности орошаемой пластины определяют наблюдаемое значительное перераспределение жидкости по ширине пакета с насадкой, имеющей вертикальную микро-текстуру.

В результате обработки опытных данных, полученных для пакетов с горизонтальной микро-текстурой и при ее отсутствии, получена зависимость средней величины условного перетока жидкости через одну контактную точку $q_{c.п}$ от степени орошения (рис. 4). Величина $q_{c.п}$ определялась следующим образом:

$$q_{c.п} = q_B + q_C/N,$$

где N – общее число контактных точек в смоченной зоне на орошаемой пластине. Величина N была определена по результатам обработки опытных данных для зон растекания пленки жидкого азота на одиночных пластинах с горизонтальной микро-текстурой и без микро-текстуры, представленных в [21]. При расчете величины $q_{c.п}$

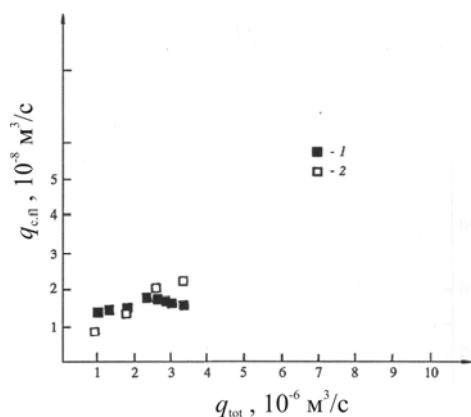


Рис. 4. Зависимость средней величины условного перетока жидкости через одну контактную точку $q_{с.п}$ от степени орошения: 1 – пластины с горизонтально ориентированной микротекстурой; 2 – без микротекстуры

предполагается, что взаимные вторичные перетоки с неорошаемой пластины на орошаемую пластину и наоборот компенсируют друг друга. Визуализация процесса показывает, что в средней и правой частях пакета (в измерительные емкости В и С соответственно) жидкость стекает только с неорошаемой пластины, а в левой части пакета (в измерительную емкость А) жидкость стекает только с орошаемой пластины. Из рис. 4 видно, что средняя величина перетока жидкости через одну контактную точку $q_{с.п}$ для пакета, состоящего из пластин с горизонтальной микротекстурой, остается практически постоянной в исследованном диапазоне степени орошения. Для пакета, состоящего из пластин без микротекстуры, наблюдается монотонное увеличение $q_{с.п}$ с ростом степени орошения.

Заключение

Представлены результаты экспериментальных исследований распределения жидкого азота при пленочном течении в единичных элементах структурированных насадок. Получены новые опытные данные о влиянии микротекстуры и ее направления на характер растекания жидкости в пакете, состоящем из двух корругированных пластин, при различной степени орошения. Показано, что изменение ориентации микротекстуры с горизонтального направления на вертикальное приводит к существенному перераспределению локального расхода стекающей жидко-

сти по ширине пакета. Приведены зависимости средней величины перетока жидкости через одну контактную точку в пакетах с корругированными пластинами с горизонтальной микротекстурой и без микротекстуры от степени орошения.

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 и верификации моделей описания процессов разделения смесей в данных условиях, учитывающих реальный характер пленочного течения жидкости в структурированных насадках различной геометрии.

Список литературы

1. Каган А. М., Лантев А. Г., Пушинов А. С., Фарахов М. И. Контактные насадки промышленных теплообменных аппаратов / Под ред. А. Г. Лантева. Казань: Отечество, 2013. 454 с.
2. Лантев А. Г., Башаров М. М. Эффективность теплообмена и разделения гетерогенных сред в аппаратах нефтегазохимического комплекса. Казань: Печать – Сервис XXI век, 2016. 344 с.
3. Лантева Е. А., Лантев А. Г. Прикладные аспекты явлений переноса в аппаратах химической технологии и теплоэнергетики (гидромеханика и теплообмен) / Под ред. Н. Н. Зиятдинова. Казань: Печать – Сервис XXI век, 2015. 236 с.
4. 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.
5. 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.
6. Boyer C., Fanget B. Measurement of liquid flow distribution in trickle bed reactor of large diameter with a new gamma-ray tomo-

graphic system // *Chemical Engineering Science*. 2002. Vol. 57. P. 1079.

7. *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.

8. *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.

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

10. *Grunig J., Kim S.-J., and 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.

11. *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.

12. *Oluji'ca Z., Rietfort 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.

13. *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.

14. *Pavlenko A. N., Li X., Zhukov V. E., Pecherkin N. I., Volodin O. A., Surtayev 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.

15. *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.

16. *Pavlenko A. N., Zeng J., Pecherkin N. I., Zhukov V. E., Volodin O. A.* Separation effi-

ciency and pressure drop of SiC ceramic and Mellapak structured packings // *Journal of Engineering Thermophysics*. 2016. Vol. 25. No. 1. P. 1–14.

17. *Keller T., Eiswirth R., Knosche C., Pavlenko A., Pecherkin N., Zhukov V.* Maldistribution in packed columns– new findings, old challenges // *Proc. of 10th Intern. Conference on Distillation & Absorption*, 2014. Friedrichshafen, Germany, 2014. 10 p.

18. *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.

19. *Чиннов Е. А., Шатский Е. Н.* Амплитуды трехмерных волн в неизотермической пленке жидкости // *Письма в ЖТФ*. 2013. Т. 39, вып. 5. С. 41–47.

20. *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 // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2015. Vol. 90. P. 149–158.

21. *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.

22. *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.

A. N. Pavlenko¹, **A. S. Surtaev**¹, **O. A. Volodin**¹, **V. S. Serdyukov**^{1,2}

¹ *Institute of Thermal Physics of 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, surtaev@itp.nsc.ru
volodin@ngs.ru, vsserd@gmail.com*

DISTRIBUTION OF LIQUID NITROGEN AT THE FILM FLOW IN THE SINGLE ELEMENTS OF THE STRUCTURED PACKING

Experimental results on the parameters of the film flow of cryogenic liquid over the surface of single elements of the structured packing consisting of two corrugated plates are presented. The effect of microtexture and its direction relative to the direction of gravity on liquid distribution along the packing at different irrigation degrees is shown based on the comparison with experimental data. Experimental results on the degree of liquid flowing through the contact points in the packing with plates are presented relative to the irrigation degree. It is shown that microtexture and its direction have a significant influence on redistribution of the local liquid flow, flowing on the structured surface of complex geometry, along the packing.

Keywords: flowing liquid films, wetting, structured packings, microtexture, contact points.