

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*

О ВЛИЯНИИ УГЛА НАКЛОНА РЕБЕР НА 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 угла наклона крупных ребер на распределение жидкости вдоль пакета при различной степени орошения. Показано, что изменение угла наклона ребер приводит к существенному перераспределению локального расхода стекающей жидкости по ширине пакета. Характер данного перераспределения также существенно зависит от степени орошения.

Ключевые слова: стекающие пленки азота, гофрированные пластины, структурированные насадки, контактные точки.

Введение

В настоящее время структурированные насадки все более широко используются в дистилляционных колоннах, градирнях, контактных выпарных аппаратах, каталитических реакторах, абсорберах, скрубберах и др. [1–4]. С целью повышения эффективности разделения смесей, увеличения производительности дистилляционных колонн интенсивно развиваются исследования по разработке новых типов, форм структурированных насадок, совершенствованию способов орошения массообменной поверхности распределителями жидкости [5–7]. 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 [8–10].

В работе [11] представлены результаты экспериментальных исследований влияния 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

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

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 лежащей ниже поверхности, не перетекая в нижележащие 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 [12] были получены новые опытные данные о влиянии 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 работе [13] представлены результаты экспериментального исследования параметров пленочного течения криогенной жидкости по поверхности единичных элементов структурированной насадки, состоящих из двух корругированных пластин с углом наклона ребер 47° . 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 зависимости степени перетекания жидкости через контактные точки в пакетах с пластинами от степени орошения.

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

Методика эксперимента

Исследования были проведены на экспериментальной установке, принципиальная схема которой детально описана в [13]. Опытные данные получены при течении жидкого азота, находящегося на линии на-

сыщения, 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, м; 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. 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. Были проведены три экспериментальные серии опытов, в которых исследованы закономерности растекания и пленочного течения жидкого азота в пакетах по поверхности структурированных перфорированных пластин насадок с различным углом наклона крупных ребер (рис. 1) при изменении в практически реализуемом при дистилляции диапазоне степени пленочного орошения. Угол наклона гофра к горизонтали на исследуемых пластинах составлял 30 , 47 и 75° соответственно. При проведении опытов на пакетах из структурированных пластин другие геометрические параметры оставались неизменными. Горизонтально ориентированная микротекстура имела амплитуду $0,2$ мм и шаг $1,5$ мм. Толщина пластин из алюминия составляла $0,2$ мм, 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 500.

Исследования на данных рабочих участках позволили изучить влияние угла наклона крупных ребер 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

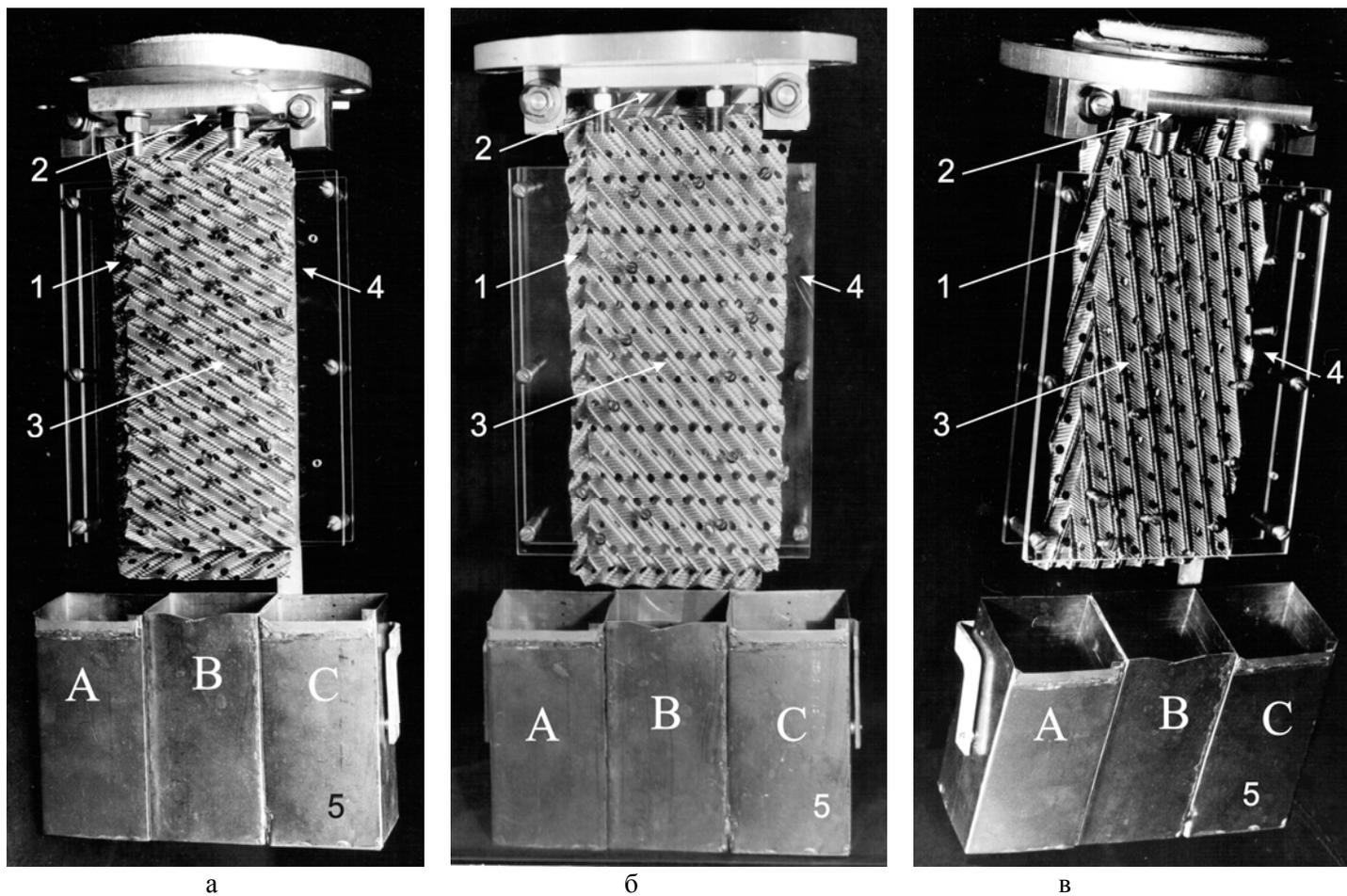


Рис. 1. Общий вид экспериментальной секции:
 1 – орошаемая пластина; 2 – распределительное устройство; 3 – неорошаемая пластина; 4 – прозрачные прижимные пластины; 5 – мерные сосуды А, В, С
 для измерения стекающих потоков азота с различных зон по ширине пакета, состоящего из двух плотно прижатых друг к другу структурированных пластин.
 Угол наклона крупных ребер: а – 30°; б – 47°; в – 75°

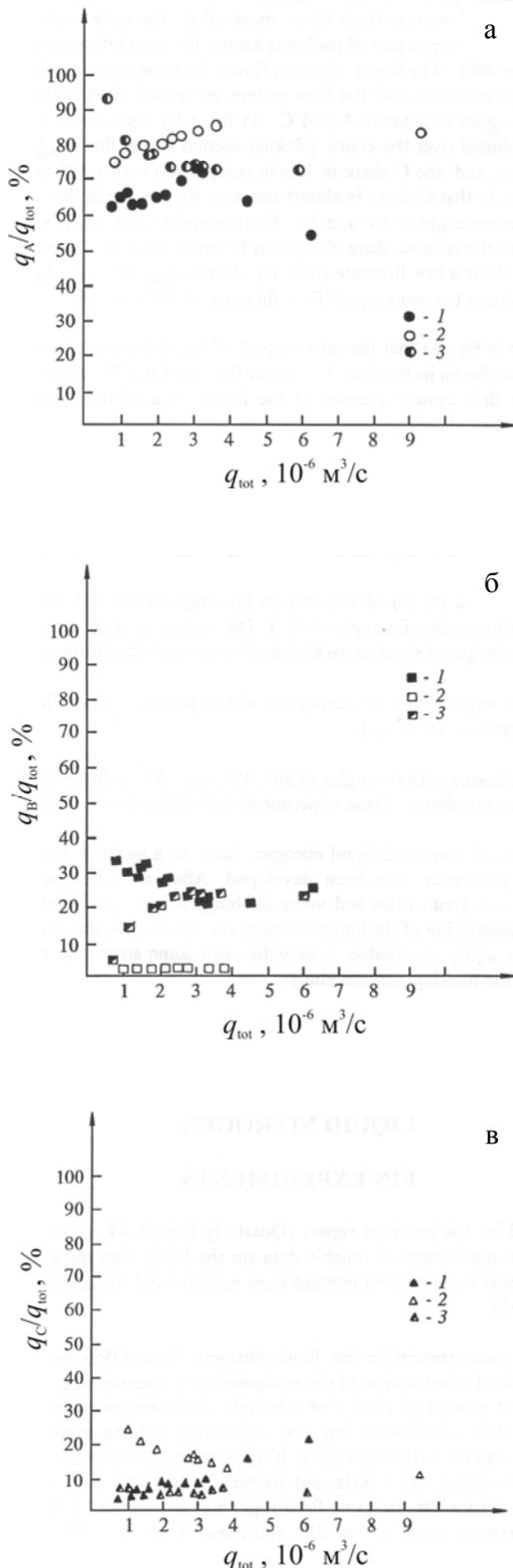


Рис. 2. Зависимости относительных долей жидкости, стекающей с нижнего среза пластин в различных по ширине пакета зонах, от степени орошения: а – зона в окрестности левого края орошаемой пластины (емкость А); б – средняя часть пакета (В); в – зона в окрестности правого края неорошаемой пластины (С). Пластины с углом наклона ребер: 1 – 30°; 2 – 47°; 3 – 75°

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. Формы распределительной щели для использованных экспериментальных секций имели ту же геометрию и углы изгиба, что и 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 каналы. 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. При проведении данных опытов на пакетах использовались три мерные емкости (А, В, С), расположенные под исследованными пластинами (см. рис. 1). В экспериментах объемным методом регистрировались локальные расходы 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). В данных экспериментальных секциях 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. 2) для распределения локального расхода стекающих пленок азота по ширине пакетов структурированных насадок различной геометрии в диапазоне изменения пленочного числа Рейнольдса, соответствующего лами-

нарно-волновому и турбулентному режимам течения. На рис. 2 величина q_{tot} соответствует объемному расходу жидкости на входе орошаемой пластины, q_A, q_B, q_C – объемные расходы жидкости, стекающей в измерительные сосуды А, В и С соответственно. Как видно из сравнения опытных данных, представленных на рис. 2, распределения относительных долей жидкости q_A/q_{tot} , q_B/q_{tot} , q_C/q_{tot} , стекающей в пакетах с пластин, зависят от угла наклона крупных ребер. Угол наклона больших ребер оказывает весьма существенное влияние на распределение по ширине пакета стекающей жидкости. Для пакета с углом наклона ребер 47° относительная доля жидкости q_B/q_{tot} , стекающей с пластин в центральной части пакета, минимальна и составляет не более (1–2) %. При этом относительная доля жидкости q_C/q_{tot} , стекающей с пластин с правой части пакета для данного угла наклона ребер, наоборот, максимальна в области малых значений степени орошения. Величина q_A/q_{tot} при орошении в области малых расходов жидкости соответственно монотонно возрастает в диапазоне (75–87) % с увеличением степени орошения. В исследовании [12] было показано, что при орошении одиночных пластин с углом наклона ребер 47° область течения пленки жидкости ограничена зонами орошаемых каналов и нескольких нижележащих каналов (в зависимости от степени орошения) в верхней части пластин. Переток жидкости через контактные точки именно в верхней части пластин и объясняет практически отсутствие стекания жидкости с центральной части пакета в этом случае. Значительное возрастание относительного расхода стекающей жидкости в центральной части пакетов с углами наклона ребер 30 и 75° обусловлено увеличением перетока жидкости через расположенные ниже контактные точки вследствие расширения вниз по пакету смоченных зон на орошаемых пластинах (как следует из результатов исследования [12] при орошении одиночных пластин с углами наклона ребер 30 и 75°). Отметим, что с уменьшением степени орошения для пакета с углом наклона ребер 75° величина q_B/q_{tot} резко уменьшается, несмотря на относительно большее количество контактных точек в смоченной зоне для данной орошаемой пластины. Это

является следствием того, что, как было показано в [12], при малых расходах жидкости наиболее интенсивное течение пленки жидкости на корругированной пластине с наибольшим углом наклона ребер сосредоточено во впадинах орошаемых каналов. При увеличении степени орошения увеличение перетока жидкости через вершины больших каналов приводит к возрастанию перетока жидкости через контактные точки и соответственно к росту величины q_B/q_{tot} . Как следует из анализа опытных данных, представленных на рис. 2, б, в области высокой степени орошения относительные доли стекающей жидкости q_B/q_{tot} в центральной части пакетов с углами наклона ребер 30 и 75° становятся практически одинаковыми и составляют (22–26) %.

В промышленных дистилляционных установках структурированная насадка устанавливается с последовательным поворотом слоев на фиксированный угол друг относительно друга. Характерная высота отдельных слоев структурированной насадки составляет, как правило, 100–300 мм. Для компактного размещения с фиксированным зазором структурированной насадки в цилиндрическом корпусе дистилляционной колонны ее сегменты изготавливаются со смещением близлежащих листов друг относительно друга по горизонтали. Сдвигка отдельных листов сегментов структурированной насадки составляет (0–30) мм. В серии экспериментов нами были проведены дополнительные опыты по изучению влияния указанной сдвигки корругированных листов на распределение жидкости в единичных элементах структурированной насадки. С этой целью был изготовлен экспериментальный участок без сдвигки в пакете друг относительно друга по горизонтали двух корругированных пластин с углом наклона ребер 47° . Сравнение опытных данных показывает, что при отсутствии сдвигки величина q_A/q_{tot} существенно снижается. Это связано с тем, что в этом случае происходит частичный возврат жидкости, стекающей с окрестности левого вертикального края орошаемой пластины, на неорошаемую пластину. Этот эффект оказывает заметное влияние на перераспределение стекающей жидкости по ширине пакета. Указанные особенности, связанные с данными концевыми эффектами, необходимо учитывать

как при корректном задании граничных условий в ходе проведения численного моделирования гидродинамических и массообменных процессов при дистилляции на структурированных насадках, так и при отработке технологии изготовления слоев структурированной насадки и конструировании распределителей жидкости.

Заключение

Представлены результаты экспериментальных исследований распределения жидкого азота при пленочном течении в единичных элементах структурированных насадок. Получены новые опытные данные о влиянии угла наклона больших ребер на характер растекания жидкости в пакетах, состоящих из двух корругированных пластин, при различной степени орошения. Показано, что изменение угла наклона ребер приводит к существенному перераспределению локального расхода стекающей жидкости по ширине пакета. Характер данного перераспределения также существенно зависит от степени орошения. Степень взаимосвязанного влияния этих двух параметров определяется различной интенсивностью перетока жидкости через активно действующие контактные точки в смоченных зонах переменных размера и формы.

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. 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.

6. Pavlenko A. N., Zeng J., Pecherkin N. I., Zhukov V. E., Volodin O. A. Separation efficiency and pressure drop of SiC ceramic and Mellapak structured packings // Journal of Engineering Thermophysics. 2016. Vol. 25. No. 1. P. 1–14.

7. 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.

8. 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.

9. 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.

10. Павленко А. Н., Ли Х., Ли Н., Гао Х., 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

11. 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.

12. 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.

13. Павленко А. Н., Суртаев А. С., Володин О. А., Сердюков В. С. Распределение жид-

кого азота при пленочном течении в единичных элементах структурированных насадок // Вестн. Новосиб. гос. ун-та. Серия: Физика. 2016. Т. 11, вып. 2. С. 12–20.

Материал поступил в редколлегию 11.04.2016

A. N. Pavlenko¹, A. S. Surtaev¹, O. A. Volodin¹, 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*

**ABOUT INFLUENCE OF INCLINATION ANGLE OF RIBS
ON THE DISTRIBUTION OF LIQUID NITROGEN AT A FILM FLOW
IN A SINGLE STRUCTURED PACKING ELEMENTS**

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 inclination angle of large ribs on liquid distribution along the packing at different irrigation degrees is shown based on the comparison with experimental data. It is shown that changing the angle of the ribs leads to a substantial redistribution of local flow rate of the flowing liquid across the width of the package. The character of this redistribution significantly depends on the degree of irrigation.

Keywords: flowing liquid films, corrugated sheets, structured packing, contact points.