Теплофизика и аэромеханика, *2023*, *том 30*, *№ 3*

УДК 532.51

Влияние случайных факторов на растекание жидкости по листам структурированной насадки

Б.В. Перепелица

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

E-mail: perep@itp.nsc.ru

Течение жидкости по волнистым пластинам регулярных насадок во многом определяет процессы тепло- и массопереноса в дистилляционных колоннах. Важную роль в распределении жидкости по листам структурированных насадок играют не только характеристики микротекстуры поверхности насадки, но и расположение точек орошения в распределителе жидкости относительно листов в пакетах структурированной насадки. Установлено, что даже незначительное смещение точки орошения относительно каналов регулярной насадки может приводить к заметному перераспределению жидкости по листам упаковки. Знание детальной структуры потока в разделительной колонне позволяет лучше понять физическую природу механизмов, управляющих течением. В работе экспериментально показано, как можно с помощью перераспределителей жидкости в виде наклонных пластин с горизонтальной микротекстурой уменьшить негативное влияние неопределенности, связанной с положением точек орошения, на распределение жидкости под слоем структурированой насадки.

Ключевые слова: ректификационная колонна, структурированная насадка, гофрированные листы, сопло, перераспределитель жидкости, неравномерное распределение.

Введение

Течение жидкости по волнистым пластинам во многом определяет процессы тепло- и массопереноса в разделительных колоннах с регулярными насадками. Структура течения жидкой фракции в колоннах недостаточно изучена. Эффективность разделения насадочных ректификационных и абсорбционных колонн зависит от взаимодействия газообразной и жидкой фаз внутри элементов насадки. Структурированные насадки обычно имеют сложную поверхность с пластинчатыми, пирамидальными или тетраэдрическими микроструктурами и с более крупными треугольными или синусоидальными макроструктурами, образующими чередующиеся наклонные каналы. Геометрические параметры микроструктур, обеспечивающих растекание жидкости по поверхности насадки, обычно сопоставимы с толщиной пленки жидкости и имеют размеры от долей до 1 – 2 миллиметров. Гидравлический диаметр взаимно пересекающихся наклонных каналов насадки, по которым движется паровая фаза, обратно пропорционален удельной поверхности насадки и имеет размеры порядка 4 – 16 мм.

© Перепелица Б.В., 2023

Первые работы по исследованию стекания вязкой пленки жидкости по волнистым поверхностям появились в 80 – 90-х годах прошлого столетия [1 – 5]. Авторы рассматривали влияние угла наклона каналов к основному направлению потока и удельной поверхности на производительность и эффективность колонны. В работе [6] изучалось течение пленки вязкой жидкости по волнистым поверхностям. Отметим, что существует лишь несколько экспериментальных результатов по исследованию течения жидкости внутри реальных насадок в колонне. Авторы [7] исследовали распределение толщины пленки жидкости интрузивным методом непосредственно внутри пакетов структурированной насадки и обнаружили увеличение толщины пленки в областях контакта соседних листов и впадинах наклонных каналов насадки. В работах [8, 9] исследовалось течение пленки жидкости по поверхностям со сложной геометрией, а в работе [10] были представлены результаты по распределению жидкости в структурированной насадке в условиях противоточного течения пара в процессе разделения смеси в дистилляционной колонне. Как отмечалось в [11], более глубокое понимание сложного поведения потока в разделительных колоннах необходимо для улучшения прогнозирования производительности разделения и оптимизации геометрии структурированных насадок и оно имеет решающее значение.

Важную роль в характере распределения жидкости по листам упаковок играет расположение точек орошения в распределителях жидкости. Знание детальной структуры потока позволяет лучше понять физическую природу механизмов, управляющих течением, и выбрать методы управления потоком с целью повышения эффективности работы колонн. В настоящей работе представлены результаты экспериментального исследования течения жидкости в пакетах структурированной насадки с различной геометрией, которые показывают, что неоднородность распределения жидкости под слоем насадки связана с неопределенностью положения точек орошения. Установлено, что даже незначительное смещение точки орошения относительно листов насадки может приводить к заметному перераспределению жидкости в насадке. Устранить элементы неопределенности, связанные с положением места орошения, можно с помощью перераспределителей жидкости в виде наклонных пластин с микротекстурой.

Экспериментальная установка

Эксперименты по распределению жидкости проводились на двух типах структурированной насадки с различной удельной поверхностью: 650 и 500 $м^2/м^3$. Угол наклона ребер первой насадки (тип 1) составлял 48°, второй насадки (тип 2) — 45°. Для проведения экспериментов гофрированные листы насадок разного типа были собраны в пакеты. Пакет структурированной насадки первого типа имел длину 500 мм и общую толщину 36 мм, в него входило 9 гофрированных листов насадки. Пакет насадки второго типа имел длину 370 мм, толщину 36 мм, в него входило 6 гофрированных листов насадки. Высота пакетов насадки была одинаковой и составляла ≈ 210 мм.

Подвод жидкости для орошения пакетов насадки осуществлялся через одиночное сопло диаметром 2,4 мм. Положение точки орошения относительно листов насадки могло изменяться. В качестве рабочей жидкости использовался этиловый спирт. Распределение расхода жидкости под листами измерялось весовым способом. В качестве приемников жидкости использовалось 22 емкости сечением 25×63 мм. Таким образом, определялось количество жидкости, стекающее с пластин на участках протяженностью 25 мм каждый. Расход жидкости изменялся от 3 до 8 мл/с.

Результаты исследований и их обсуждение

При натекании жидкости на упаковку образуются сложные вихревые потоки, происходит разрушение струи с образованием более мелких струй и капель. Уже первые наблюдения картины течения жидкости в исследуемой области показали, что возможно много разнообразных сценариев растекания жидкости в зависимости от места натекания струи на упаковку. Для измерения распределения жидкости под насадкой в качестве наиболее характерного расположения точек натекания струи были выбраны три положения, отмеченные на рис. 1. В точке *a* струя натекает на ребро, направленное вниз и вправо, в точке *b* струя натекает на ребро, направленное вниз и налево; в точке *c* струя натекает на точку контакта соседних листов упаковки. Орошаемые листы располагались в середине пакета. Расстояние между точками орошения имело размер, сопоставимый с размером канала насадки, и составляло несколько миллиметров.

На рис. 2 приведены данные измерений распределения жидкости под упаковкой в виде зависимости относительного расхода Q_i/Q от положения точки орошения. Как видно из полученных данных, количество жидкости, стекающее по листам упаковки, сильно зависит от места орошения. В случае орошения ребра упаковки (точки *a* и *b* на рис. 1) жидкость движется вдоль этого ребра и максимальное количество жидкости собирается на выходе из него. При этом наблюдаются характерные максимумы расхода на расстоянии примерно ± (150 – 170) мм от положения точки орошения (кривые *1* и *2* на рис. 2). Аналогичные максимумы наблюдались в экспериментах [12] при орошении слоя насадки Sulzer 500X одиночной струей. В случае орошения точки контакта листов насадки (точка *c*) жидкость растекается равномерно между соседними листами и в распределении жидкости на выходе из пакета характерных максимумов не наблюдается (кривая *3*). Поскольку в процессе работы колонны контролировать места падения струй на насадку невозможно, то вероятно возникновение экстремальных ситуаций, когда в области около стенки (или в другом месте упаковки большого диаметра) будет орошаться большое количество листов в точках ребер с направлением в определенную сторону. Такие ситуации маловероятны, но возможны. В этом случае будет возникать большая неоднородность в распределении жидкости под упаковкой, которая может сохраняться в нижележащих слоях упаковки. Наблюдаемое распределение жидкости носит случайный характер, и для его описания необходимо использовать аппарат теории вероятностей и статистики экстремальных значений.

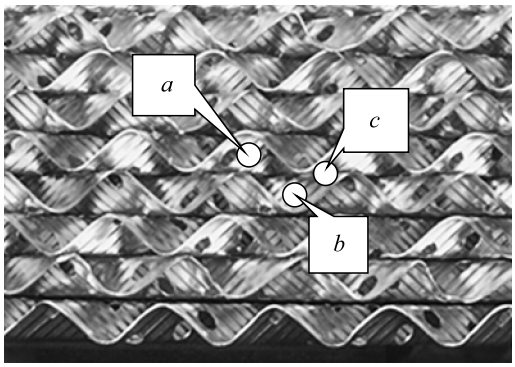

Рис. 1. Точки орошения листов насадки.

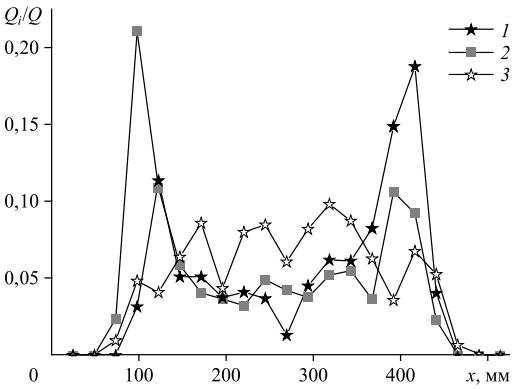

Рис. 2. Распределение жидкости на выходе из пакета насадки типа 1. Q = 7,6 (*1*), 7,8 (*2*), 7,7 (*3*) мл/с.

Решением указанной проблемы может служить подход, связанный с устранением неопределенности места натекания струи на упаковку. Для достижения этой цели существуют различные способы. Например, если медленно перемещать сопло относительно упаковки на небольшое расстояние в различных направлениях, то распределение жидкости под упаковкой будет более равномерным. Другой способ ликвидации неопределенности может заключаться в создании направленного течения жидкости от сопла к упаковке с использованием перераспределителя жидкости. Перераспределителем жидкости в экспериментах служила плоская наклонная пластинка с горизонтальной микротекстурой, помещенная между соседними листами упаковки. Использовалась пластина шириной около 10 см, высотой около 5 см. На расстоянии примерно 10 мм от нижнего края пластина изгибалась под углом к горизонтали на 56 градусов. Затем вертикальный участок этой пластины высотой 10 мм зажимался между листами упаковки. В силу того, что жидкость очень хорошо растекается по пластине на ширину около 8 см (рис. 3) и характер растекания слабо зависит от места контакта струи с пластинкой, была получена довольно широкая пленка жидкости, подтекающая к листу упаковки с одной стороны.

В зависимости от ориентации наклонной пластины перераспределителя к листам насадки жидкость из сопла будет подтекать либо к листу, ребра которого направлены в одну сторону, либо к соседнему листу, ребра которого направлены в противоположную сторону (рис. 4). В экспериментах с разной ориентацией пластины перераспределителя подвод жидкости осуществлялся в верхней части перераспределителя, расположенного в середине упаковки. На рис. 4*a* показан случай орошения каналов, направленных влево, а на рис. 4*b* орошаются каналы, направленные вправо. Распределение жидкости под пакетом насадки для этих экспериментов приведено на рис. 5. Стрелка здесь указывает положение струи орошающей жидкости. Характер распределения жидкости под насадкой для случаев, изображенных на рис. 4*a* и 4*b*, оказался аналогичен распределению для случая орошения только одного из ребер наклонного канала на рис. 2. Как видно из полученных данных, количество жидкости, стекающее вдоль наклонных каналов насадки, сильно зависит от ориентации пластины перераспределителя, поскольку жидкость течет главным образом вдоль орошаемых ребер. Доля жидкости, стекающей вдоль ребер, составляет около 30 % от полного расхода жидкости и мало зависит от места натекания струи на перераспределитель.

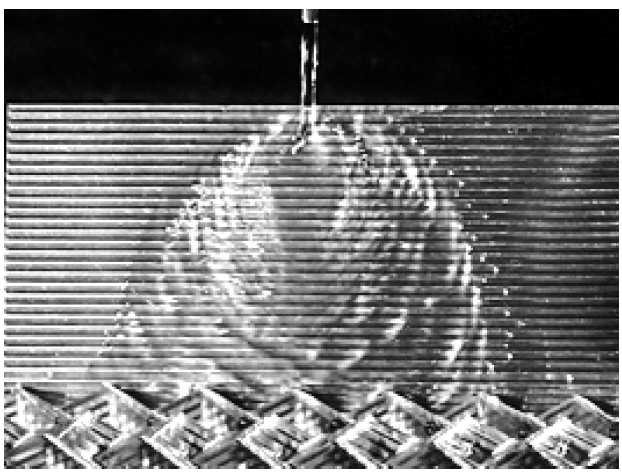

Рис. 3. Растекание струи жидкости по наклонной пластинке с горизонтальной микротекстурой.

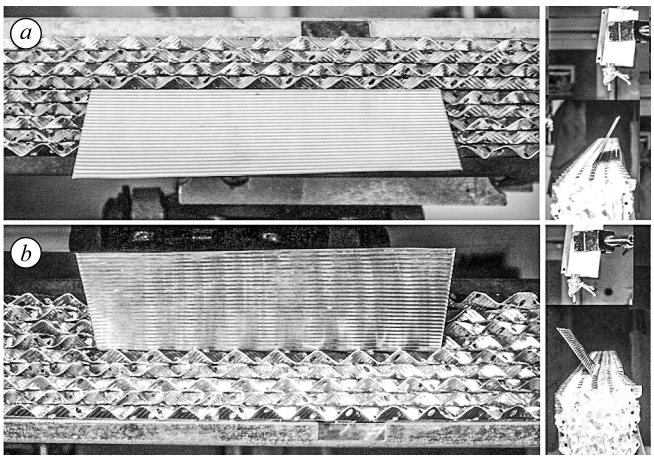

Рис. 4. Перераспределитель жидкости в виде наклонных пластин с микротекстурой на пакете насадки типа 1.
Случаи орошения каналов, направленных влево (*a*) и вправо (*b*).

Для организации более равномерного растекания жидкости по листам упаковки можно использовать две наклонные пластины. Один из вариантов установки двух наклонных пластин показан на рис. 6. В экспериментах по измерению распределения жидкости под насадками обе пластины орошались из одинаковых сопел при определенном расходе. Таким образом, появлялась возможность контролировать процесс растекания жидкости по упаковке и изменять положение и наклон пластин для того, чтобы получить достаточно равномерное или другое нужное нам распределение жидкости под упаковкой. Аналогичным образом устанавливались наклонные пластины перераспределителя жидкости и на насадке второго типа.

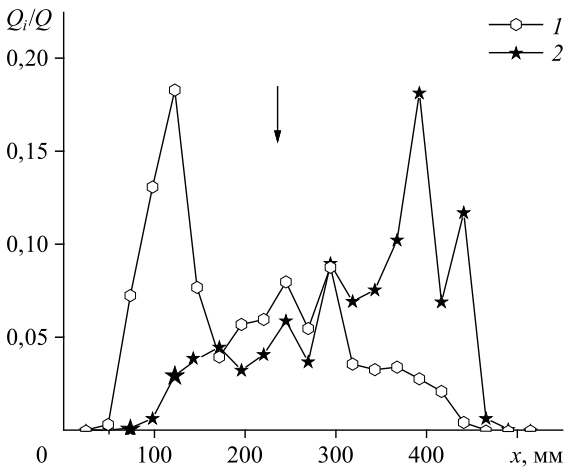

Рис. 5. Распределение относительного локального расхода жидкости под насадкой типа 1 в зависимости от положения пластины перераспределителя жидкости.
1 — пластина орошает лист, каналы которого направлены влево,
2 — пластина орошает лист, каналы которого направлены вправо.

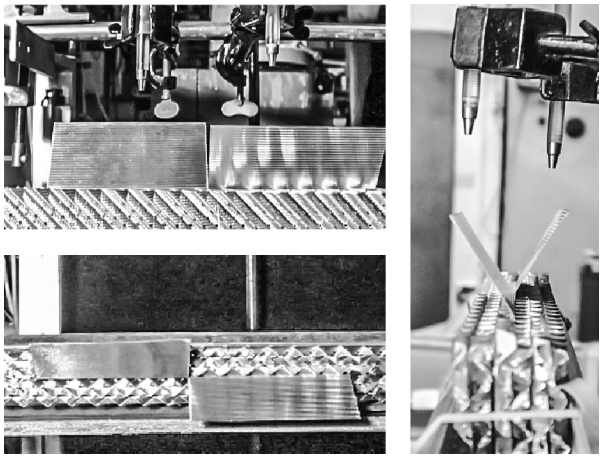

Рис. 6. Перераспределитель жидкости в виде двух наклонных пластин на пакете насадки типа 2.

На рис. 7 приведены результаты измерения распределения локального расхода жидкости под пакетами структурированных насадок с различной величиной удельной поверхности и с разными углами наклона ребер при их орошении через распределитель жидкости в виде двух наклонных пластин. Расходы жидкости в различных сериях экспериментов были одинаковы. Точки орошения наклонных пластинок незначительно перемещались. Из полученных данных видно, что распределение жидкости по ширине пакетов насадки более равномерное по сравнению с орошением из одиночного сопла (рис. 2). Ширина зоны растекания жидкости на насадке с углом наклона ребер 48° (рис. 7*a*) в среднем меньше, чем на насадке с углом наклона ребер 45° (рис. 7*b*). Колебания расхода в одном сечении достигают 20 – 30 %. Точно воспроизвести распределение локального расхода жидкости под слоем насадки практически невозможно, так как жидкость в пакете, состоящем из листов структурированной насадки, после попадания на насадку перераспределяется между соседними листами в точках контакта ребер взаимно пересекающихся наклонных каналов. Количество точек контакта определяется соотношением длины волны гофрирования листов, составляющей 10 – 12 мм, и длины наклонного канала,

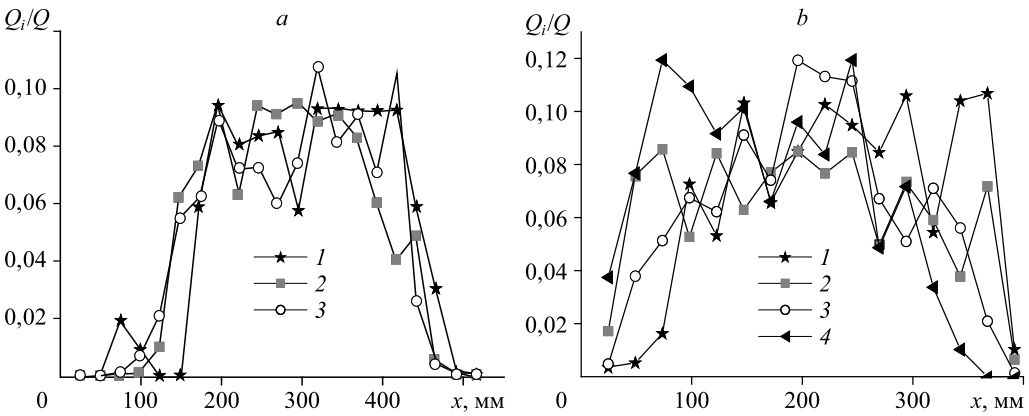

Рис. 7. Распределение относительного локального расхода жидкости на выходе из пакетов структурированной насадки.

a — насадка первого типа, *b* — насадка второго типа;
a: Q = 15,4 (*1*), 16 (*2*), 15,8 (*3*); *b*: Q = 15,6 (*1*), 16,2 (*2*), 15,3 (*3*), 15,9 (*4*).

которая в зависимости от угла наклона ребер изменяется в диапазоне от 250 до 300 мм. Кроме того, течение жидкости по поверхности структурированной насадки определяется параметрами микротекстуры поверхности, условиями смачивания поверхности насадки, свойствами рабочей жидкости. Для одного типа насадки и рабочей жидкости растекание жидкости по листам упаковки будет зависеть от условий начального орошения, которое вносит элементы неопределенности.

Заключение

Результаты экспериментального исследования течения жидкости в пакетах структурированной насадки различной конфигурации позволяют сделать следующие выводы.

1. Неоднородность распределения жидкости под пакетом структурированной насадки связана с местом натекания струи жидкости на гофрированный лист. Неопределенность положения точек орошения существенно влияет на растекание жидкости по листам упаковки. Степень неоднородности носит случайный характер.

2. Влияние элементов неопределенности растекания жидкости по листам упаковки, связанных с положением места орошения, можно устранить с помощью перераспределителей в виде двух наклонных пластин с горизонтальной микротекстурой.

Список литературы

1. **Chang H.-C.** Wave evolution on a falling film // Annu. Rev. Fluid Mech. 1994. Vol. 26. P. 103–136.
2. **Vlachogiannis M., Bontozoglou V.** Observations of solitary wave dynamics of film flows // J. Fluid Mech. 2001. Vol. 435. P. 191–215.
3. **Zhao L., Cerro R. L.** Experimental characterization of viscous film flows over complex surfaces // Intern. J. Multiphase Flow. 1992. Vol. 6. P. 495–516.
4. **Vlachogiannis M., Bontozoglou V.** Experiments on laminar film flow along a periodic wall // J. Fluid Mech. 2002. Vol. 457. P. 133–156.
5. **Перепелица Б.В.** О влиянии микротекстуры на формирование пленки жидкости на вертикальной поверхности // Теплофизика и аэромеханика. 2011. Т. 18, № 3. С. 519–522.
6. **Трифонов Ю.Я.** Стекание вязких пленок по волнистым поверхностям // Прикл. механика и техн. физика. 2004. Т. 45, № 3. С. 97–110.
7. **Alekseenko S.V., Markovich D.M., Evseev A.R., Bobylev A.V., Tarasov B.V., Karsten V.M.** Experimental investigation of local film thickness and velocity distribution inside liquid falling films on corrugated structured packings // AICHE J. 2008. Vol. 54, No. 6. P. 1424–1430.
8. **Pavlenko A., Pecherkin N., Chekhovich V., Volodin O.** Hydrodynamics in falling liquid films on surfaces with complex geometry // Microgravity Sci. Technol. 2009. Vol. 21, Suppl. 1. P. 207−213.
9. **Pavlenko A., Pecherkin N., Zhukov V., Meski G., Houghton P.** Overview of methods to control the liquid distribution columns with structured packing: Improving separation efficiency // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2020. Vol. 132. P. 110092-1–110092-11.
10. **Павленко А.Н., Печеркин Н.И., Чехович В.Ю., Жуков В.Е., Сандер С., Хауптон П., Серов А.Ф., Назаров А.Д.** Разделение смесей и распределение жидкости на структурированной насадке в крупномасштабной модели дистилляционной колонны // Теорет. основы химич. технологии. 2006. Т. 40, № 4. С. 355–365.
11. **Gerke S.J., Leuner H., Repke J.-U.** Experimental investigation of local film thickness and velocity distribution inside liquid falling films on corrugated structured packings // Chem. Engng Trans. 2018. Vol. 69. P. 1– 6.
12. **Zhukov V. Pavlenko A., Slesareva E.** Experimental investigation of freon mixture spreading over the structured Sulzer 500X packing at single drip irrigation // J. Physics: Conf. Series. 2019. Vol. 1369. P. 012049-1– 012049-6.

Статья поступила в редакцию 24 декабря 2022 г.,
после доработки — 7 февраля 2023 г.,
принята к публикации 2 марта 2023 г.