

УДК 536.2+53.07

Распределение параметров потока газа на выходе из структурированной насадки*

В.Е. Жуков, А.Н. Павленко, Е.Ю. Сухорукова, А.Н. Чернявский

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

E-mail: zhukov@itp.nsc.ru

Данные экспериментальных исследований гидродинамики противоточных потоков жидкости и пара в дистилляционных колоннах со структурированными насадками необходимы для верификации расчетных моделей, описывающих гидродинамику и процессы тепло- и массообмена в промышленных дистилляционных колоннах. В работе представлено описание конструкции многоточечного термоанемометра с координатным устройством, разработанного для измерений скорости потока пара в условиях струйного орошения насадки при противоточном потоке фаз смеси фреонов. Тестирование измерительной системы проведено на потоке воздуха, проходящего через 210-миллиметровый слой структурированной насадки Sulzer 500X. Измерения проводились на крупномасштабной исследовательской модели дистилляционной колонны диаметром 900 мм. Получены экспериментальные данные по распределению локальной скорости потока воздуха на выходе из однослойной насадки Sulzer 500X. Сканирование пакета насадки с шагом 1 и 5 мм показало наличие периодической ячеистой структуры распределения скорости газового потока, коррелирующей со структурой исследуемой насадки.

Ключевые слова: дистилляционные колонны, структурированная насадка, анемометр.

Введение

Разделительные колонны широко используются в химической, нефтеперерабатывающей, криогенной, пищевой и других отраслях промышленности. Разделение двух- и многокомпонентных смесей на отдельные компоненты либо удаление нежелательных примесей осуществляется в колонне на контактных устройствах с развитой поверхностью. Тепломассообменные процессы реализуются на поверхности раздела фаз пар–жидкость в условиях противоточного течения фаз.

В зависимости от конструкции контактные устройства делятся на регулярные насадки [1–3] и засыпные [4–7]. Эффективность, гидродинамические и массообменные характеристики контактных устройств существенно различаются в зависимости от типа и конструкции последних [8]. Выбор устройства делается исходя из требований к конкретному технологическому процессу. Засыпки в ряде случаев могут быть рекомендованы

* Исследование выполнено в ИТ СО РАН в рамках государственного задания ИТ СО РАН, проект № 121031800216-1.

для использования в процессах высокого давления, так как имеют невысокий перепад давления при значительной эффективности [9]. Также данный вид контактных устройств широко используется в агрессивных средах ввиду достаточно простой процедуры замены засыпки.

Структурированные насадки имеют регулярные геометрические параметры по всему сечению колонны, что особенно важно для крупномасштабных колонн диаметром несколько метров. Условие равномерного распределения жидкой фазы по поверхности насадки и равномерного распределения противоточной паровой фазы по сечению колонны является главным требованием для высокоэффективной работы разделительных колонн. Достижение хорошего качества распределения жидкости по сечению колонны обеспечивается применением насадки, содержащей слой, состоящие из корругированных листов. Однако в колоннах диаметром более 0,5–1 м наблюдается формирование крупномасштабной неравномерности распределения жидкости по сечению колонны [10]. Корругированные листы, из которых собирается слой структурированной насадки, имеют сложную конфигурацию, которая характеризуется большим числом параметров [11, 12]. Данная конфигурация включает элементы крупной корrugации, из которых формируется канальная структура насадки, а также отверстия и элементы микротекстуры, обеспечивающие растекание жидкости в горизонтальном направлении. Для успешного моделирования процесса растекания жидкости по структурированной насадке в связи со сложностью конфигурации насадки необходимы данные экспериментальных исследований как для отдельных элементов насадки, так и для пакетов этих элементов. В работе [13] проводились исследования растекания жидкого азота по одиночному листу структурированной насадки Sulzer 500Y при орошении его одиночной струей. В работе [14] этот же процесс рассматривался относительно пакета из двух листов насадки. Растекание смеси фреонов по пакету структурированной насадки Sulzer 500X при орошении одиночной струей в отсутствие противоточного потока пара исследовалось в работе [15]. Были проведены измерения распределения жидкости в диапазоне расхода в струе 2,5–60 мл/с, которые показали, что зона растекания при орошении одиночной струей ограничивается каналами корrugации, исходящими от точки орошения. Орошение пакета структурированной насадки двумя струями с расходом 21 мл/с в каждой, отстоящими друг от друга на расстоянии 134 мм, соизмеримом с проекцией канала корrugации (130 мм), приводит к распределению жидкости, соответствующему суммарному расходу от каждой струи в любой координате насадки [16]. Данный результат характеризует отсутствие значительного перетока жидкости с одного листа на другой через точки контакта вершин каналов корrugации. В работе [17] проводилось исследование формирования крупномасштабной неравномерности распределения жидкости на выходе из структурированной насадки Sulzer 500X в условиях разделения смеси фреонов R114/R21 в диапазоне нагрузки по пару $1,3 < F\text{-factor} < 2 \text{ Па}^{0,5}$. Полученные экспериментальные данные используются для развития и верификации модели [18, 19] для применения в отношении процессов дистилляции на структурированных и засыпных насадках.

Экспериментальные данные по влиянию противоточного парового потока на растекание жидкой фазы в структурированной насадке, а также по влиянию растекания жидкой фазы на перераспределение противоточного парового потока необходимы для развития и верификации моделирования массообменных процессов в разделительных колоннах. В настоящей работе приводится описание модернизации измерительной аппаратуры экспериментального стенда крупномасштабной модели дистилляционной колонны

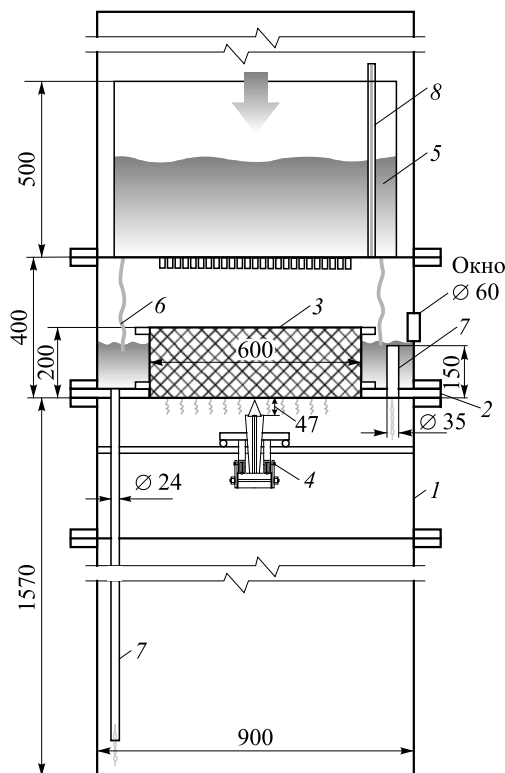
для изучения влияния растекания жидкой фазы на перераспределение противоточного парового потока. Разработка данной аппаратуры выполнена исходя из требования работы устройства в условиях парожидкостной среды смеси фреонов R114/R21, поскольку эта смесь является рабочей жидкостью стенда и ее характеристики подбирались для моделирования в условиях температуры окружающей среды процессов разделения криогенных смесей. Верификация устройства проводится на воздушном потоке в условиях крупномасштабной дистилляционной колонны с насадкой Sulzer 500X.

1. Описание экспериментального стенда и применяемых методик

Исследования проводились на крупномасштабной исследовательской модели дистилляционной колонны диаметром 900 мм. Стенд предназначен для моделирования гидродинамики и массообмена при разделении криогенных смесей. Подробное описание стенда приведено в работах [20, 21]. Моделирование процессов разделения криогенных жидкостей на стенде выполняется в условиях температуры окружающей среды на смеси фреонов R114/R21. На рис. 1 схематично изображена колонна с установленной в ней аппаратурой, с помощью которой проводились измерения растекания жидкости на выходе из насадки при орошении одной и двумя струями жидкости при противоточном потоке пара [16]. Один слой исследуемой структурированной насадки Sulzer 500X (3) располагался в верхней части колонны на расстоянии 200 мм ниже днища распределителя жидкости. Для проведения исследований влияния растекания жидкости по насадке на перераспределение противоточного потока пара необходимо дополнительное оснащение колонны измерительной системой, расположенной над слоем исследуемой насадки и определяющей распределение локальных скоростей пара на выходе из насадки. Для этой цели над слоем насадки диаметром 600 мм, установленной в цилиндрической секции с нижним и верхним крепежными фланцами, были смонтированы пластинчатые короба с вертикальными стенками на всю толщину слоя насадки. На рис. 2 показано расположение этих коробов (B и D) и их геометрические размеры. На центральном коробе (D) установлена измерительная система, в области A и C размещена насадка. Для исследования распределения локальных скоростей потока пара предназначена область насадки С. Над продольной средней линией этой области расположены орошающие отверстия, которые могут открываться и закрываться в любой заданной комбинации.

Рис. 1. Схематичное изображение колонны с установленной в ней измерительной аппаратурой для исследования растекания жидкости на выходе из насадки [16].

1 — корпус колонны, 2 — опорный фланец, 3 — насадка, 4 — измеритель расхода жидкости, 5 — распределитель жидкости, 6 — байпасный поток, 7 — дренажные трубы, 8 — уровень; размеры приведены в мм.



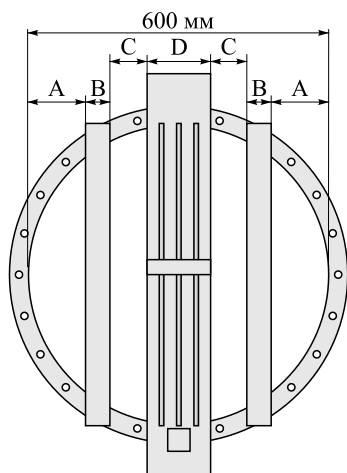


Рис. 2. Расположение дополнительных конструктивных элементов над слоем насадки Sulzer 500X.
A = 116 мм, B = 50 мм, C = 70 мм, D = 128 мм.



Рис. 3. Фотография конструкции координатного устройства с размещенным на нем многоточечным измерителем-анемометром.

1.1. Оснащение колонны системой измерения поля локальных скоростей газа

Для измерения локальных характеристик распределения противоточного потока паровой фазы смеси фреонов R114/R21 на выходе из структурированной насадки Sulzer 500X было разработано и изготовлено координатное устройство с размещенным на нем многоточечным измерителем-анемометром, на конструкцию которого авторами получен патент [22]. Ряд элементов конструкции (в том числе запатентованный защитный козырек) выполнен методом трехмерной печати из полиэтилена низкого давления, который устойчив к агрессивным средам, в том числе фреонам. Расположение координатного устройства относительно насадки и фотография измерительной системы на координатном устройстве приведены на рис. 3. Данная измерительная система предназначена для работы в среде паров смеси R114/R21. В рамках настоящей публикации представлены измерения в потоке воздуха.

1.1.1. Координатное устройство

Координатное устройство изготавливалось частично из стандартных элементов 3D-принтеров, но с учетом того, что устройство должно работать в среде смеси фреонов, часть элементов была доработана (шаговый двигатель), а еще часть (линейные подшипники) заменена на специально разработанные конструкции, выполненные методом трехмерной печати из полиэтилена. Координатное устройство располагалось по диаметральной оси колонны параллельно листам насадки. Диапазон перемещения каретки с измерительным оборудованием был симметричен оси колонны и равнялся 600 мм. Разрешающая способность перемещения каретки составляла 1 мм с точностью 0,1 мм.

1.1.2. Многоточечный термоанемометр

Для измерения скорости пара смеси фреонов был разработан 4-точечный термоанемометр. В качестве чувствительного элемента термоанемометра используются платиновые тонкопленочные резисторы HEL-700 номинального сопротивления 1000 Ом,

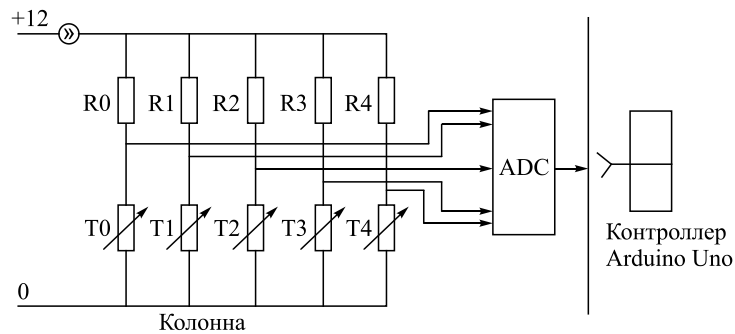


Рис. 4. Принципиальная схема 4-точечного термоанемометра.

габаритные размеры которых составляют $1,27 \times 1,65 \times 0,1$. Резисторы ориентированы узкой стороной по нормали к парогазовому потоку, а стороной $1,27 \times 1,65$ — параллельно направлению перемещения каретки координатного устройства. Принципиальная схема термоанемометра приведена на рис. 4. Данный термоанемометр реализован по схеме постоянного тока через датчик. Датчики T1–T4 размещаются в измеряемом газовом потоке, а датчик T0 — в гильзе из тонкостенной нержавеющей трубки внутренним диаметром 7,6 мм. Гильза находится в защищенном от газового потока месте при температуре окружающих паров смеси фреонов. Дифференциальный сигнал между измерителями T1–T4 и сравнительным датчиком T0 подается на дифференциальные входы модулей АЦП (16-битные АЦП ADS1115), которые преобразуют разностный аналоговый сигнал в цифровой код. Вся аналоговая часть измерителя, включая АЦП, смонтирована на каретке координатного устройства и находится внутри колонны. Цифровой сигнал выводится из колонны через герметичный разъем на контроллер Arduino Uno, который располагается вне колонны.

1.1.3. Защитный козырек

В дистилляционной колонне невозможно исключить появление капель конденсата смеси фреонов, которые образуются на стенках распределителя жидкости. Их попадание на термодатчики может привести к искажению результата измерения. Для защиты термодатчиков от таких капель был разработан и изготовлен блок защитных козырьков [22], трехмерная модель которого и фотография готового образца представлены на рис. 5. Блок изготовлен из полиэтилена низкой плотности (LDPE) методом аддитивных технологий. Пористая структура изделия, образованная в результате печати на 3D-принтере, способствует удержанию в желобе козырька падающей капли и направлению ее за пределы зоны чувствительного элемента анемометра.

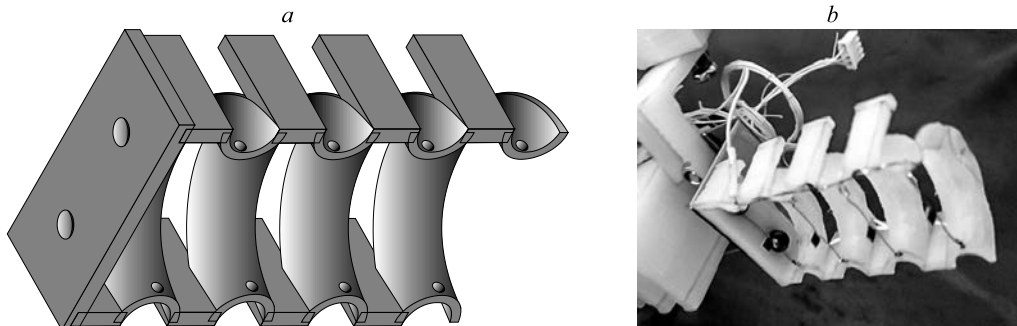


Рис. 5. Трехмерная модель блока защитных козырьков (a) и фотография готового образца (b).

1.1.4. Программный комплекс

Программная часть системы измерения локальных скоростей газа представляет собой комплекс из встраиваемого программного обеспечения («прошивки») контроллера Arduino Uno и управляющего приложения для персонального компьютера на базе операционной системы Windows. Взаимодействие «прошивки» и управляющего приложения осуществляется посредством шины USB в режиме виртуального COM-порта.

Встраиваемое программное обеспечение осуществляет выполнение получаемых от управляющего приложения команд, а именно: обеспечивает перемещение шагового двигателя на заданное расстояние. Также оно осуществляет оперативное управление режимом работы АЦП, запускает и останавливает сбор данных. С целью уменьшения количества электромагнитных наводок и повышения точности выполняемых измерений во время сбора данных шаговый двигатель полностью обесточивается. На стороне контроллера также осуществляется медианная фильтрация данных, получаемых с АЦП. Прошедшие фильтрацию данные отправляются управляющему приложению для их последующей обработки, хранения и визуализации.

Управляющее приложение предоставляет пользователю графический интерфейс, позволяющий осуществлять управление системой измерения локальных скоростей газа как в режиме одиночных команд, так и в режиме автоматического проведения измерений в установленных диапазонах координат с заданными пространственным шагом и временными интервалами. Приложение также обеспечивает визуализацию получаемых данных в режиме реального времени, а кроме того предоставляет возможность сохранения этих данных в формате CSV, совместимом с Microsoft Excel, что облегчает последующую обработку данных.

2. Измерение распределения скорости воздушного потока на выходе из насадки Sulzer 500X

Перед использованием созданной измерительной системы для измерения распределения скорости потока пара смеси фреонов на выходе из структурированной насадки был проведен ряд тарировочных и тестовых экспериментов в воздушном потоке. Для тарировки многоточечного анемометра был изготовлен стенд, состоящий из трубы длиной 1050 мм внутренним диаметром 104 мм. В нижней части трубы была установлена решетка турболизатора, под которой располагался вентилятор с регулируемым приводом постоянного тока. С помощью стандартного термоанемометра VT110 была проведена тарировка скорости воздуха в трубе при различной скорости вращения вентилятора. Были испытаны две модели анемометра. Одна модель была оснащена блоком защитных козырьков, на другой они отсутствовали. Результаты испытаний образцов анемометров приведены на рис. 6 (датчики обозначены T1 – T4).

Как видно из диаграммы, наличие козырьков приводит к замедлению потока в области расположения датчиков анемометра. Однако это замедление практически не сказывается на чувствительности анемометра и может быть учтено посредством тарировки. На рис. 7 приведена аппроксимация тарировочных испытаний, которая использовалась в измерениях распределения локальной скорости потока воздуха в колонне. Для аппроксимации применялась степенная зависимость $V = 1,8 \cdot 10^{-6} U_{\text{анем}}^{2,9}$. Она хорошо аппроксимирует область скоростей выше 0,4 м/с, но существенно занижает значения в области низких скоростей.

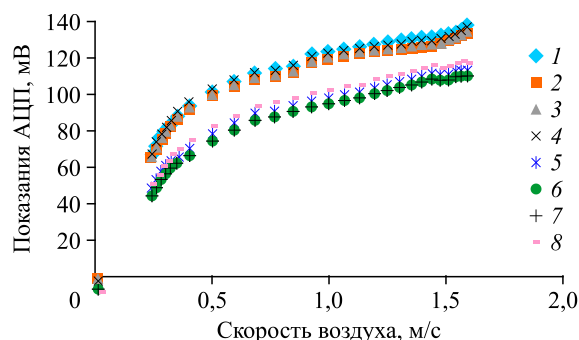


Рис. 6. Результаты тарировочных испытаний блока анемометров на воздушном потоке.

Блок анемометров без защитных козырьков:

1 — T1, 2 — T2, 3 — T3, 4 — T4; блок анемометров

с защитными козырьками: 5 — T1, 6 — T2, 7 — T3, 8 — T4.

Собранная на координатном устройстве измерительная система и исследуемый слой насадки были установлены в колонну, в которой проводились измерения распределения локальной скорости воздушного потока на выходе из насадки. Воздушный поток нагнетался вентилятором через фланец в нижней части колонны, проходил через дырчатый лист — исследуемый слой структурированной насадки Sulzer 500X — и измерялся непосредственно на выходе из насадки.

На рис. 8 приведены показания анемометров при измерении распределения скорости потока воздуха по сечению исследуемого пакета насадки. Измерения проводились с шагом перемещения координатного устройства 5 мм. Расстояние между датчиками составляло 12 мм. Датчик T2 располагался над средней линией пакета насадки. Как видно из диаграммы, результаты измерений имеют очень большой разброс. Для того чтобы определить,

Рис. 7. Аппроксимация данных тарировки анемометра в воздухе.

1 — результаты тарировки,
2 — аппроксимирующая зависимость
 $V = 1,8 \cdot 10^{-6} U_{\text{анем}}^{2,9}$.

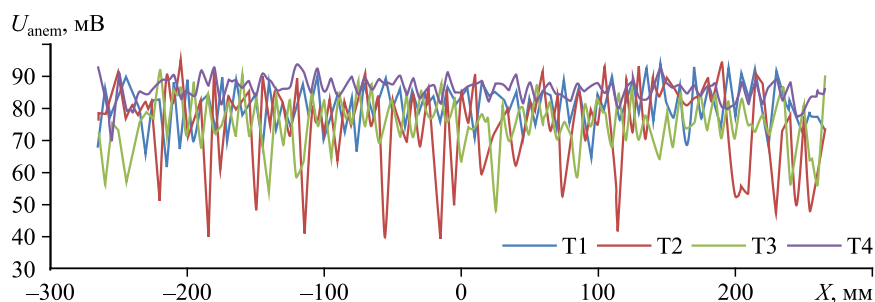
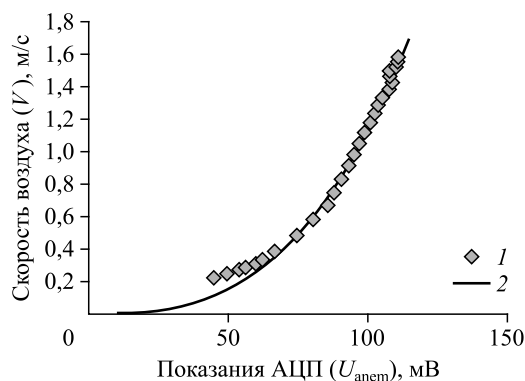


Рис. 8. Показания анемометра при измерении распределения скорости потока воздуха по сечению исследуемого пакета насадки Sulzer 500X.

Шаг 5 мм; координаты датчиков относительно средней линии насадки:

T1 = -12 мм, T2 = 0 мм, T3 = 12 мм, T4 = 24 мм.

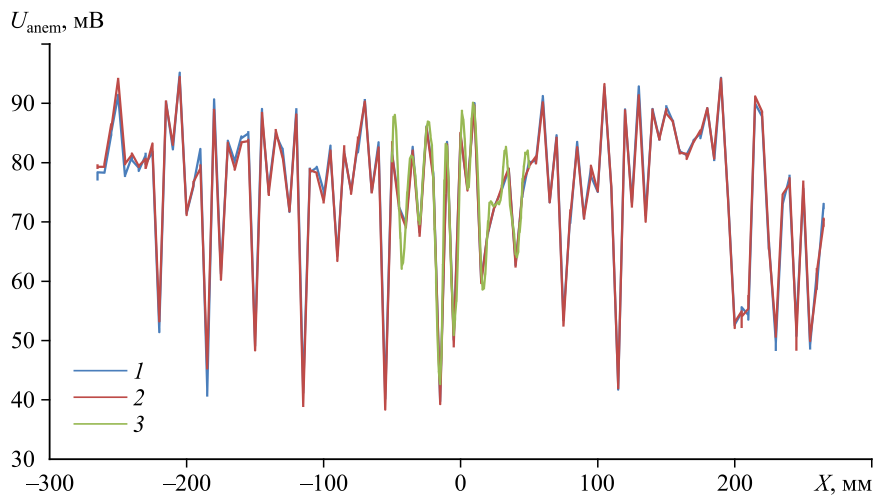


Рис. 9. Показания анемометра при повторных измерениях распределения скорости потока воздуха по сечению пакета насадки Sulzer 500X. Координата датчика относительно средней линии насадки 0 мм; 1 — шаг 5 мм, 2 — повторные измерения с шагом 5 мм, 3 — шаг 1 мм.

является ли такой значительный разброс данных по площади пакета насадки результатом погрешности измерений или отражает неравномерность скорости потока воздуха, были проведены повторные измерения, в том числе с другим шагом перемещения измерителя (1 мм). На рис. 9 представлены данные датчика, расположенного над средней линией насадки, при повторных измерениях с шагом 5 мм и с шагом 1 мм в диапазоне от -50 до 50 мм. Из диаграммы видно, что результаты измерений имеют очень хорошую воспроизводимость в одних и тех же пространственных координатах. Это свидетельствует о хорошей стабильности гидродинамики течения воздуха через насадку, хорошей стабильности измерительной системы и хорошей точности воспроизведения координаты датчика в различных сериях измерений. Таким образом, результаты измерений отражают неравномерность распределения скорости потока воздуха.

На рис. 10 приведены диаграммы распределения скорости потока воздуха для двух значений средней скорости потока воздуха через сечение насадки (Q_1 и Q_2). Измерения

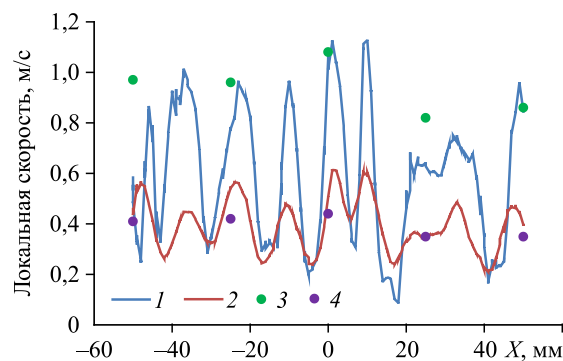


Рис. 10. Зависимость локальной скорости потока от координаты в центральной части насадки при двух значениях (Q_1 и Q_2) общего расхода воздуха через колонну. Шаг изменения координаты 1 мм; 1 — T2, Q_1 ; 2 — T2, Q_2 ; 3 — VT110, Q_1 ; 4 — VT110, Q_2 .

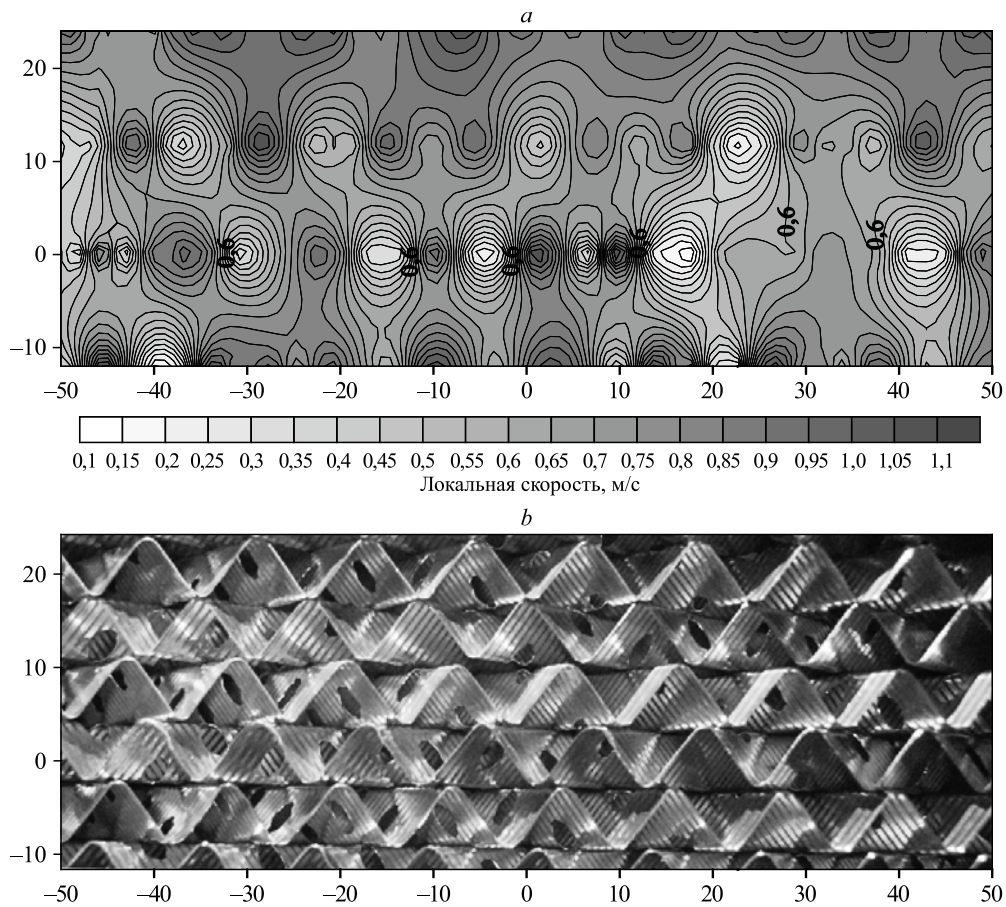


Рис. 11. Сканирование четырьмя датчиками центральной области насадки с шагом 1 мм для расхода по колонне Q_1 .
 а — топограмма распределения скорости, м/с; б — фотография насадки Sulzer 500X.

выполнены в центральной области пакета насадки с шагом 1 мм. На диаграмме приведены данные для датчика Т2, расположенного над средней линией насадки. Для сравнения на диаграмме нанесены значения скорости, измеренные анемометром VT110 в соответствующих координатах при точности позиционирования измерителя ± 3 мм.

На рис. 11 представлены топограммы распределения локальных скоростей потока воздуха, построенные по результатам сканирования четырьмя датчиками центральной области насадки с шагом 1 мм. На приведенных топограммах наблюдается достаточно регулярная ячеистая структура распределения скорости потока воздуха, период которой коррелирует с периодом ячеек насадки. Учитывая, что датчик анемометра реагирует на скорость потока независимо от его направления, можно предположить, что максимальные значения скорости соответствуют скорости в ядре потока, выходящего из канала насадки, а минимальные значения — точкам пространства, где происходит смешение потоков, выходящих из каналов с разными направлениями. В этих точках возможно образование вихревых структур либо взаимное торможение разнонаправленных потоков.

Заключение

Разработана и изготовлена многоточечная система измерения скорости пара с координатным устройством, способная функционировать в условиях парокапельного потока смеси фреонов R114/R21. Получены экспериментальные данные по распределению локальной скорости потока воздуха на крупномасштабной исследовательской модели дистилляционной колонны диаметром 900 мм на выходе из однослойной насадки Sulzer 500X. Тестирование измерительной системы в колонне в потоке воздуха показало, что течение потока воздуха через насадку носит стабильный характер. Это проявляется в хорошей воспроизводимости результатов измерений в одних и тех же пространственных точках в различных сериях измерений. Сканирование пакета насадки с шагом 1 и 5 мм показало наличие периодической ячеистой структуры распределения скорости газового потока.

Список литературы

1. Manh T.D., Nam N.D., Babazadeh H., Moradi R. Characterization of new wire gauze-structured packing: experimental study // Chem. Engng Technol. 2020. Vol. 43, No. 12. P. 2469–2476.
2. Gao H., Liu S., Luo X., Zhang H., Liang Z. Investigation of hydrodynamic performance and effective mass transfer area for sulzer DX structured packing // AIChE. 2018. No. 64. P. 3625–3637.
3. Hassanvand A., Esmaili-Faraj S.H., Moghaddam M.S., Moradi R. Characterization of a new structured packing by computational fluid dynamics // Chem. Engng Technol. 2021. Vol. 44, No. 1. P. 156–163.
4. Kang S.J., Lim D.H. A study on the hydraulic characteristics of rashig super-ring random packing in a counter-current packed tower // Clean Technol. 2020. Vol. 26, No. 2. P. 102–108.
5. Hlawitschka M.W., Schmidt S., Bart H.-J., Schultes M. Raschig super-ring operating characteristics in unpulsed liquid–liquid extraction columns // Chem. Engng Technol. 2015. Vol. 38. P. 446–454.
6. Hanusch F., Rehfeldt S., Klein H. Liquid maldistribution in random packed columns: experimental investigation of influencing factors // Chemie Ingenieur Technik. 2017. Vol. 89, No. 11. P. 1550–1560.
7. Dzhonova-Atanasova D., Petrova T., Semkov Kr., Darakchiev S., Stefanova K., Nakov S., Popov R. Experimental investigation of liquid distribution in open-structure random packings as a basis for model refinement // Chem. Engng Transact. 2018. Vol. 70. P. 2077–2082.
8. Schultes M. Raschig super-ring: a new fourth generation packing offers new advantages // Chem. Engng Res. Design. 2003. Vol. 81, No. 1. P. 48–57.
9. Bu S.S., Yang J., Zhou M., Wang Q.W., Li S.Y., Guo Z.X. On contact point modifications for forced convective heat transfer analysis in a structured packed bed of spheres // Nuclear Engng Design. 2014. Vol. 270. P. 21–33.
10. Stoter C.F. Modelling of maldistribution in structured packings: From detail to column design. Doctoral thesis. Delft University of Technology: Delft, 1993. 183 p.
11. Spiegel L., Duss M. Distillation, equipment and processes. Chapter 4. Structured packings. Elsevier Inc., 2014. P. 145–181.
12. Olujić Ž. Distillation, equipment and processes. Chapter 1. Types of distillation column internals. Elsevier Inc., 2014. P. 1–34.
13. Pavlenko A.N., Volodin O.A., Surtaev A.S. Hydrodynamics in falling liquid films on surfaces with complex geometry // Applied Thermal Engng. 2017. Vol. 114. P. 1265–1274.
14. Павленко А.Н., Суртаев А.С., Володин О.А., Сердюков В.С. Распределение жидкого азота при пленочном течении в единичных элементах структурированных насадок // Вестн. НГУ. Серия: Физика. 2016. Т. 11, № 2. С. 12–20.
15. Zhukov V.E., Pavlenko A.N., Slesareva E.Yu., Pecherkin N.I., Meski G., Houghton P. Experimental investigation of freon mixture spreading over the structured Sulzer 500X packing at single drip point irrigation // J. Phys.: Conf. Ser. 2019. Vol. 1369. P. 012049-1–012049-6.
16. Sukhorukova E.Yu., Zhukov V.E. Freon mixture spreading over the structured Sulzer 500X packing irrigated with two single jets // AIP Conf. Proceedings. 2021. Vol. 2422, Iss. 1. P. 040008-1–040008-4.
17. Pavlenko A.N., Zhukov V.E., Sukhorukova E.Yu., Dzhonova-Atanasova D.B., Stefanova K.V. Experimental study of liquid flow maldistribution in sulzer 500X structured packing and rashig super-ring random packing // J. Engng Thermophys. 2021. Vol. 30. P. 171–183.
18. Boyadjiev Chr., Boyadjiev B., Doichinova M., Popova-Krumova P. Modeling of column apparatus processes. 2nd ed. Springer Intern. Publishing, 2018. 456 p.

19. **Boyadjiev Chr., Boyadjiev B.** New approach to modeling and simulation of chemical and mass transfer processes in column apparatuses // *Recent Innovat. Chem. Engng. (Formerly Recent Patents on Chem. Engng.)*, 2019. Vol. 12, No. 1. P. 79–95.
20. **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*. 2014. Vol. 60, Iss. 2. P. 690–705.
21. **Павленко А.Н., Жуков В.Е., Печеркин Н.И., Назаров А.Д., Серов А.Ф., Миськив Н.Б.** Автоматизированная система управления распределителем жидкости дистилляционного исследовательского стенда со структурированной насадкой // *Автометрия*. 2017. Т. 53, № 1. С. 9–24.
22. **Пат. 2747098РФ, МПК⁵¹ G01P 5/10, G01K 7/16, G01K 1/08.** Термоанемометр для измерения скорости газа в противоточном газокапельном потоке / Павленко А.Н., Жуков В.Е., Слесарева Е.Ю.; патентообладатель ИТ СО РАН. № 2020120031; заявл. 09.06.2020; опубл. 26.04.2021, Бюл. № 12.

*Статья поступила в редакцию 28 июня 2022 г.,
после доработки — 6 июля 2022 г.,
принята к публикации 2 сентября 2022 г.*