

УДК 532.5, 536.7

**АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ
РАСПРЕДЕЛИТЕЛЕМ ЖИДКОСТИ
ДИСТИЛЛЯЦИОННОГО ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО СТЕНДА
СО СТРУКТУРИРОВАННОЙ НАСАДКОЙ***

А. Н. Павленко¹, В. Е. Жуков¹, Н. И. Печеркин¹,
А. Д. Назаров^{1,2,3}, А. Ф. Серов¹, Н. Б. Миськив^{1,3},
Х. Li¹, В. Jiang¹, Н. Sui¹, Н. Li¹, Х. Gao¹

¹*Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН,
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 1*

²*Новосибирский государственный университет,
630090, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 1*

³*Новосибирский государственный технический университет,
630073, г. Новосибирск, просп. К. Маркса, 20*

E-mail: nazarov@itp.nsc.ru

Приведено описание автоматизированной системы сбора первичных опытных данных и системы управления режимами работы экспериментальной крупномасштабной разделительной колонны. Изучено влияние нового метода жидкостного орошения структурированной насадки на эффективность разделительной колонны. Данные, полученные с помощью разработанного автоматизированного комплекса, позволят повысить эффективность разделения смесей на структурированных насадках на 20–30 %.

Ключевые слова: дистилляционная колонна, автоматизация эксперимента, двухфазный поток, управление тепломассообменом, графический интерфейс, эффективность разделения.

DOI: 10.15372/AUT20170103

Введение. Исследовательская ректификационная установка «Большая фреоновая колонна», созданная в Институте теплофизики СО РАН, предназначена для поиска эффективных процессов разделения жидких смесей на фракции, каждая из которых содержит вещества с близкой температурой кипения на внутренних тепло- и массообменных устройствах (насадках) [1]. В настоящее время ректификацию во всём мире применяют в самых различных областях химической технологии, где выделение компонент в чистом виде имеет важное значение (при органическом синтезе, производстве изотопов, полимеров и других веществ высокой чистоты).

Принцип действия разделительной колонны заключается в том, что исходная смесь, нагретая до температуры «питания» в жидкой фазе, поступает из распределителей жидкости на поверхность насадки в верхней части колонны. Снизу навстречу жидкости подаётся пар исходной смеси. Стекая вниз по структурированным поверхностям насадки, жидкость обогащается высококипящими компонентами, а пары чем выше поднимаются в верх колонны, тем более насыщаются легкокипящими компонентами. Таким образом, отводимый с верха колонны продукт (дистиллят) обогащён легкокипящими компонентами.

*Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 14-49-00010).

Орошение структурированных насадок в крупномасштабных промышленных дистилляционных колоннах осуществляется распределителями жидкости в стационарном режиме, имеющими фиксированные плотность точек орошения по сечению колонны и расход жидкости. При стационарном задании точек орошения в условиях плёночного течения жидкости по насадке и противоточного потока пара развиваются крупномасштабные неравномерности плотности потока по сечению и высоте насадки. Неравномерности распределения существенно снижают эффективность разделения смесей в дистилляционных колоннах большого диаметра [2–4].

Исследования взаимосвязи параметров течения двухфазного потока жидкости и пара и эффективности разделения смесей в структурированных насадках интенсивно развиваются в последнее время, поскольку контактные массообменные поверхности всё более широко используются в дистилляционных колоннах различного назначения [4, 5], и сводятся к проверке новых типов насадок, подбору оптимальных режимов орошения стационарного распределителя и расходов противоточных потоков жидкости и пара.

Цель данного исследования — создание нового метода, который позволит в реальном времени оценить формирующиеся крупномасштабные неоднородности потока жидкости в насадке и путём периодической смены орошения секторов верхнего сечения насадки разрушить эти неравномерности, тем самым повысив эффективность работы дистилляционной колонны. Приводится описание автоматизированного оборудования и программ управления в режиме реального времени функционирования нового динамического распределителя жидкости и системы регистрации его влияния на равномерность распределения жидкости по сечению и высоте насадки.

В состав этого оборудования и программ входят:

- многоканальная программируемая система управления 128 клапанами распределителя;
- система регистрации температуры для контроля равномерности распределения жидкости в 48 точках по сечению и высоте колонны;
- двухкоординатная система регистрации плотности локального струйного потока под насадкой;
- пакет прикладных программ с графическим представлением информации в режиме реального времени и оценкой эффективности дистилляции и поведения параметров противоточных потоков жидкой и паровой фаз внутри насадки в зависимости от температуры в выбранном сечении колонны.

Экспериментальная аппаратура позволила показать эффективность предложенного подхода, заключающегося в динамическом управлении распределением потока жидкости на входе насадки в целях разрушения устойчивых неоднородностей распределений жидкости и пара по сечению и высоте насадки и в конечном итоге повышения эффективности работы разделительной колонны.

Экспериментальная установка и оборудование автоматизации эксперимента. Основные элементы экспериментальной установки «Большая фреоновая колонна» показаны на рис. 1. Стенд представляет собой колонну диаметром 0,9 м и высотой 7,2 м. В верхней части находится распределитель жидкости, под ним расположены слои структурированной насадки, в нижней части колонны — устройства подачи паровой фазы и сбора жидкости высококипящей компоненты. Под насадкой размещена оригинальная секция, состоящая из двухкоординатного устройства и первичных датчиков для измерения локальных характеристик струйно-капельного потока, стекающего из насадки [4–6]. Особенностью экспериментов на стенде является их большая продолжительность (несколько часов) в автоматическом режиме. При этом эффективность исследований значительно повышается при анализе хода дистилляции в режиме реального времени, что позволяет существенно сократить затраты на поиск оптимальных режимов. Оборудование, используемое

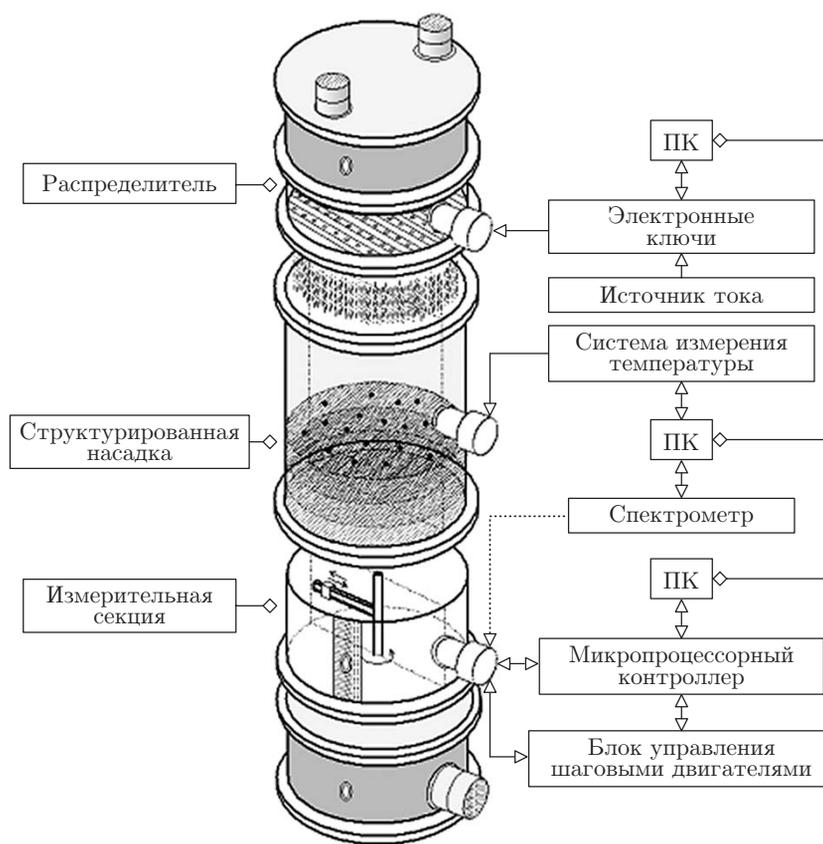


Рис. 1. Схема автоматизированной системы динамического управления орошением насадки

для проверки предложенного метода орошения, состоит из многосоплового динамического распределителя жидкости. Управление подачей жидкости осуществляется 128 электромагнитными клапанами через программируемый 16-канальный модуль вывода дискретных сигналов LTR42 с поканальной гальванической развязкой [7, 8] и силовой коммутатор. Жёсткие требования к тепловому балансу колонны определили обесточенный режим закрытого состояния клапана. Величина тока удержания задавалась для длительности открытого состояния клапана более 4 часов. Время срабатывания и отключения составляло меньше 0,2 с. Аппаратура работала под управлением специального пакета программ вычислительного комплекса.

Схема регистрации температурного поля. Равномерность распределения потока жидкости в насадке обуславливается степенью неравномерности распределения температуры в различных сечениях по высоте структурированной насадки и плотности потока жидкой фазы в нижнем сечении колонны [4–6]. Температурные данные поступают от 48 датчиков многоканальной системы измерения (три уровня по 16 датчиков). Опыт применения малогабаритных бескорпусных диодов КД512 в качестве датчиков температуры показал, что датчики имеют допустимую временную стабильность, высокую чувствительность (порядка 2 мВ/град). Термодатчиками послужили 48 диодов с минимальным обратным током ($\sim(5 \cdot 10^{-9} \text{ A})$). Для минимизации числа измерительных линий разработана схема, которая обеспечивает опрос четырёх групп по 32 датчика в каждой с помощью одного четырёхканального 24-разрядного дельта-сигма АЦП со встроенным цифровым фильтром. Структурная схема измерений показана на рис. 2. Диоды в группе включены параллельно, стабилизированный источник тока REF200 [9, 10] питает всю группу током 100 мкА со стабильностью $\pm 25 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$. В момент измерения в открытом состоянии одновременно

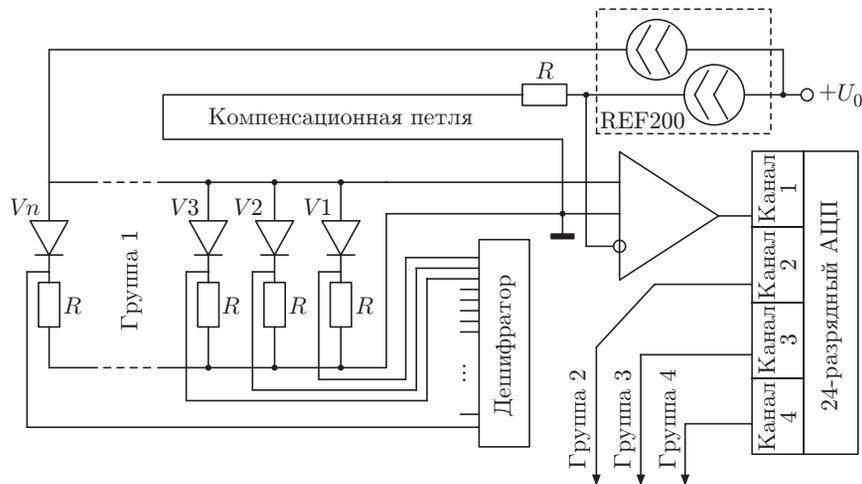


Рис. 2. Многоканальная измерительная схема

находится лишь один диод. Программа через дешифратор обеспечивает циклическое переключение диодов в группе. В процессе измерений аппаратная погрешность составляет менее $0,01\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Для калибровки термометров использовался заполненный трансформаторным маслом термостат "Thermo Naake DC-30" [11], обеспечивающий стабильность поддержания температуры $0,02\text{ }^{\circ}\text{C}$. Каждый температурный режим выдерживался в течение часа, при этом опрос всех датчиков производился каждые 3 секунды. Величина стандартного отклонения сигнала датчика составляла в режимах $0,008\text{--}0,01\text{ мВ}$, что в пересчёте на температуру соответствовало $0,004\text{--}0,005\text{ }^{\circ}\text{C}$. Калибровочные характеристики датчиков были представлены линейной зависимостью, поскольку нелинейность в рабочем диапазоне $25\text{--}45\text{ }^{\circ}\text{C}$ не превышала $0,02\text{ }^{\circ}\text{C}$ и сохраняла уровень точности поддержания температуры в термостате. Таким образом, разработанная система измерения температуры позволила регистрировать её в 48 точках с точностью порядка $0,05\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Система измерения плотности капельно-струйного потока. В автоматизированную систему входит комплекс для регистрации распределения плотности капельно-струйного потока жидкости на выходе из насадки в нижней части колонны. Комплекс включает двухкоординатное устройство, на подвижной каретке которого установлен локальный расходомер струйно-капельного потока. Полученные от двухкоординатного регистратора капельно-струйного потока данные позволяют определить эффективность орошения верхнего сечения насадки и при необходимости перевести его в другие секторы верхнего сечения насадки с помощью динамического распределителя жидкости.

Иллюстрация распределения потока в сечении колонны [4–6] приведена на рис. 3. Двухкоординатная система позиционирования состоит из флюгера — устройства, вращающегося вокруг своей оси с помощью шагового привода, и каретки, перемещающейся по направляющим флюгера с помощью второго шагового привода. Шаговый привод флюгера и каретки позволяет с заданной скоростью устанавливать приёмник потока локального расходомера в заданную координату. Перемещение приёмника потока на один шаг двигателя вдоль радиуса составляет $0,01\text{ мм}$, по азимуту — $0,02^{\circ}$.

Пакет компьютерных программ. Для управления распределителем жидкости и наблюдения за развитием крупномасштабного распределения локального расхода по сечению насадки и высоте дистилляционной колонны разработаны программы: ручного и автоматического управления клапанами распределителя жидкости; регистрации и отображения в динамике развивающихся крупномасштабных полей температуры; регистрации и отобра-

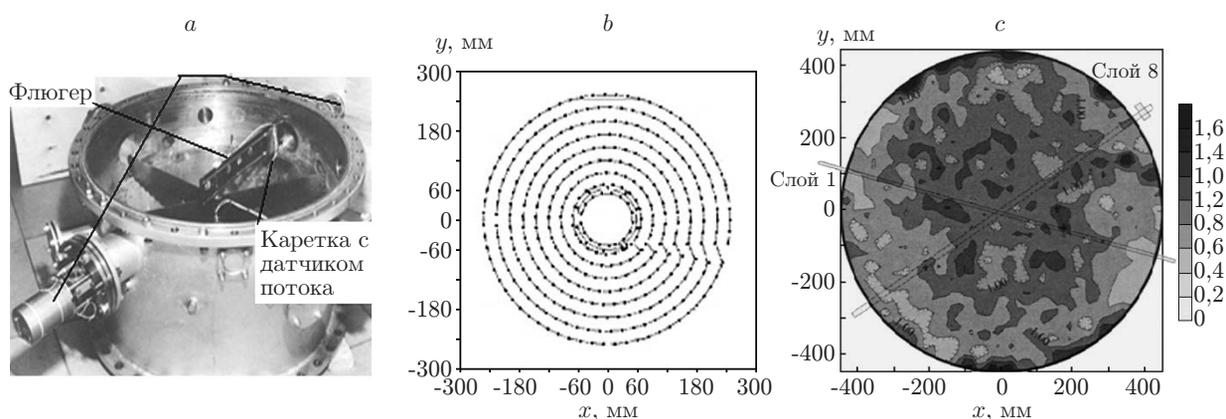


Рис. 3. Двухкоординатный регистратор плотности капельно-струйного потока: *a* — измерительная секция, *b* — траектория перемещения каретки, *c* — графическое изображение распределения потока

жения неравномерностей распределения по сечению насадки локальных параметров потока жидкой фазы.

Длительность, количество и порядок открытия клапанов меняются согласно исследовательской программе, которая на основе данных температуры по сечению и высоте колонны и распределению локального капельно-струйного потока под насадкой определяет порядок и длительность орошающих секторов распределителя. В качестве примера на рис. 4 приведён режим переключения подачи жидкой фазы в два диаметрально противоположных сектора. Программное и аппаратное обеспечение позволяет формировать потоки любой конфигурации с любой последовательностью орошения выбранной зоны насадки.

Использование датчиков локальной температуры внутри структурированной насадки даёт возможность регистрировать динамику формирования неравномерности температурного поля при противоточном течении жидкости и пара. Распределение температур в трёх сечениях колонны отображалось на мониторе в виде цветных топограмм в режиме реального времени каждые 3 секунды (рис. 5).

Изменения периода переключения, порядка клапанов распределителя и величины сектора орошения значительно влияют на разрушение крупномасштабной неравномерности структуры распределения потоков внутри насадки и соответственно на более полное смачивание её поверхности.

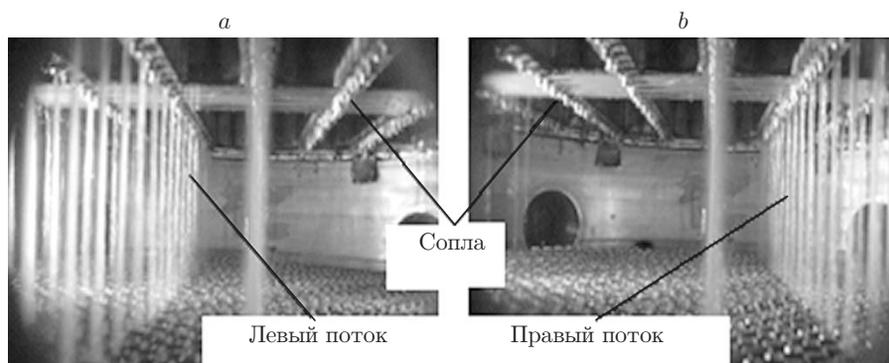


Рис. 4. Структура точек орошения при периодическом переключении клапанов в управляемом распределителе жидкости: *a* — поток в левой части сечения, *b* — в правой части

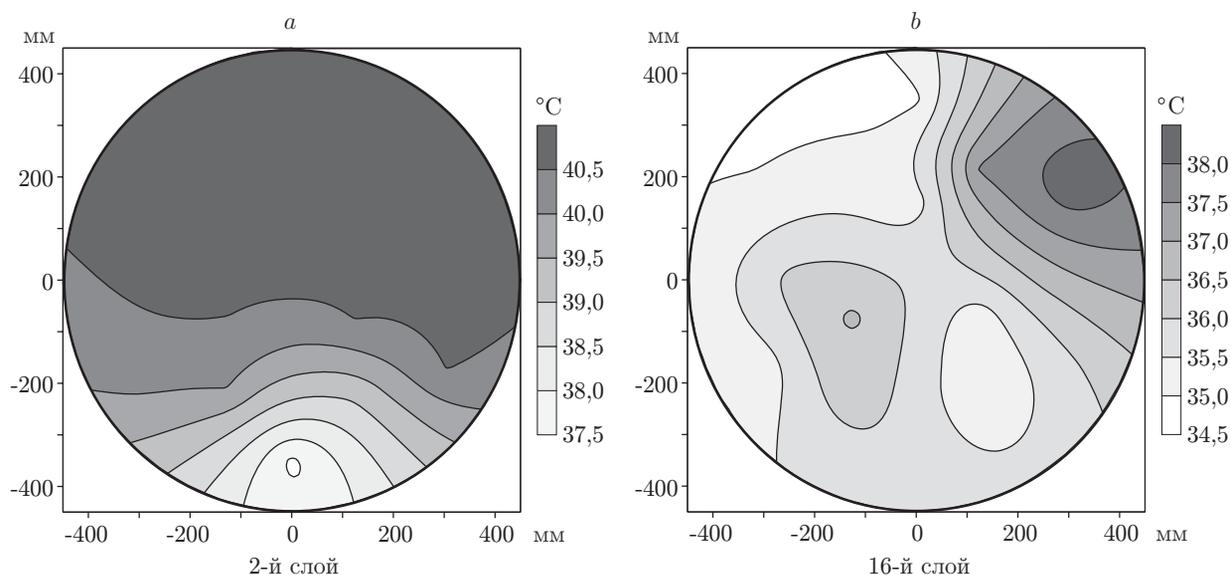


Рис. 5. Распределение температуры по сечению структурированной насадки при периодическом орошении, управляемом распределителем жидкости при скорости пара $k_v = 0,022$ м/с: в верхней (а) и нижней (б) частях колонны

Заключение. Выполненные исследования на экспериментальной установке «Большая фреоновая колонна» Института теплофизики СО РАН с применением специально разработанных автоматизированного оборудования и программ позволили обосновать эффективность нового метода динамического орошения жидкостью верхней части структурированной насадки для промышленных дистилляционных колонн.

В серии экспериментов выявлено повышение эффективности дистилляционных колонн до ~30 % за счёт заданного управления подачей жидкой фазы в структурированную насадку колонны. Применение автоматизированного динамического распределителя в производстве дистиллята значительно снижает энергозатраты и улучшает качество продукта дистилляции.

Последующая эксплуатация автоматизированной системы экспериментальной установки «Большая фреоновая колонна» позволит выполнить поиск оптимальных режимов орошения для различных конструкций структурированных насадок.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Александров И. А. Ректификационные и абсорбционные аппараты. М.: Химия, 1971. 296 с.
2. Soulaire C., Horgue P., Franc J., Quintard M. Gas-liquid flow modeling in columns equipped with structured packing // *AIChE Journ.* 2014. **60**, Is. 10. P. 3665–3674.
3. Ehlers C., Fieg G. Experimental validation of a flexible modeling approach for distillation columns with packings // *AIChE Journ.* 2014. **60**, Is. 11. P. 3833–3847.
4. Pavlenko A., Zhukov V., Pecherkin N. et al. Investigation of flow parameters and efficiency of mixture separation on a structured packing // *AIChE Journ.* 2014. **60**, Is. 2. P. 690–705.
5. Павленко А. Н., Печеркин Н. И., Чехович В. Ю. и др. Экспериментальное исследование влияния неравномерности орошения на входе структурированной насадки на эффективность разделения смеси фреонов // *Теоретические основы химической технологии.* 2009. **43**, № 1. С. 3–13.

6. **Павленко А. Н., Жуков В. Е., Печеркин Н. И. и др.** Развитие неравномерности распределения состава смеси в структурированной насадке дистилляционной колонны // Теоретические основы химической технологии. 2010. **44**, № 6. С. 651–659.
7. **Система** сбора данных LTR модуль LTR42. URL: <http://www.lcard.ru/products/ltr/ltr42> (дата обращения: 28.11.2016).
8. **Козак В. Р., Купер Э. А.** Многофункциональные устройства для систем автоматизации ускорительных установок // Автометрия. 2015. **51**, № 1. С. 12–21.
9. **Высокостабилизированный** источник тока REF200. URL: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/ref200.pdf> (дата обращения: 28.11.2016).
10. **Батраков А. М., Ильин И. В., Павленко А. В.** Прецизионные цифровые интеграторы сигналов с точной синхронизацией // Автометрия. 2015. **51**, № 1. С. 62–69.
11. **Термостат** Thermo Haake DC30. URL: <http://www.massetrecovery.com/pictures11/dc30.pdf> (дата обращения: 28.11.2016).

Поступила в редакцию 28 марта 2016 г.
