

УДК 66.01-66.04

ИННОВАЦИИ В ОБЛАСТИ РАЗРАБОТКИ ВЫСОКОИНТЕНСИВНЫХ МАССОБМЕННЫХ УСТРОЙСТВ ДЛЯ МОДЕРНИЗАЦИИ РЕКТИФИКАЦИОННЫХ КОМПЛЕКСОВ

Леонтьев В.С.

*ФГУП «Российский научный центр «Прикладная химия», Санкт-Петербург
e-mail: leontiev@telecom.spb.ru*

***Аннотация.** Рассмотрен комплекс технических решений по повышению эксплуатационных характеристик колонн с регулярными насадками (РН): предложены пакеты упругих РН, исключаящие байпасирование потоков жидкости и пара между корпусом колонны и насадкой; многоточечные капиллярные распределители жидкости с числом точек орошения 600...800 на 1 м² и перераспределители парового потока, обеспечивающие равномерность взаимодействия пара и жидкости по всей высоте слоя насадки. Приведены результаты гидродинамических и массообменных исследований модифицированных колонн.*

***Ключевые слова:** ректификация, регулярные насадки, многоточечные распределители, модернизация*

Одной из важнейших составляющих при аппаратурно-технологической оптимизации процессов ректификации является выбор типа массообменных устройств и конструкции колонных аппаратов.

Широкое использование регулярных насадок (РН) в процессах ректификации в мировой практике и значительный объем исследований в этой области [1 - 8] подтверждают, что колонны с РН являются одним из наиболее перспективных направлений развития массообменной аппаратуры. Диаметр колонн с РН в 1,4...1,8 раз, а высота в 1,5...2 раза меньше, чем у большинства тарельчатых колонн.

Анализом ряда технологий выделения химических продуктов и их аппаратурного оформления показано, что колонны с РН наиболее полно отвечают требованиям, предъявляемым к ректификационным аппаратам при ректификации термолabileльных веществ; в вакуумных процессах; при создании энергосберегающих схем; для технологий, где в зоне ректификации возможны реакции с образованием нежелательных побочных продуктов; при модернизации ректификационных комплексов в условиях ограниченных высот и площадей.

Колонны с РН требовательны к равномерности распределения жидкости и пара, трудоемки в изготовлении. Объективная оценка того или иного массообменного аппарата может быть дана при одновременном учете его гидродинамических и массообменных показателей. Интегральной характеристикой интенсивности процесса в аппарате служит съем продукта с единицы объема аппарата, который определяется по формуле:

$$I = G \cdot n = w \rho_n n = F \cdot \rho_n^{0,5} \cdot n,$$

где G – количество пара, проходящего через единицу площади сечения аппарата в единицу времени, кг/(м²·с); n – число теоретических тарелок (т.т.) на 1 м высоты насадки; w – скорость паров в свободном сечении колонны, м/с; $F = w \rho_n^{0.5}$ – нагрузочный фактор, кг^{0.5}/(с·м^{0.5}); ρ_n – плотность пара, кг/м³. Его принимают в качестве критерия сравнительной оценки массообменных аппаратов с различными контактными устройствами. Для высокоэффективных промышленных насадок фирмы SULZER, одного из мировых лидеров в области исследования и разработок РН, $I = 8 \dots 11$ кг/(м³·с).

Эффективная работа ректификационных колонн с РН обеспечивается совокупностью трех основных конструктивных элементов [6 - 8]: собственно пакетами насадки, распределителями жидкой фазы, перераспределителями парового потока.

Разработка и использование конструкций, исключающих продольное перемешивание жидкой фазы, байпасирование парового и жидкостных потоков, снижающих поперечную и продольную неравномерность потоков, существенно повышает эксплуатационные характеристики колонн.

Известные фирмы (SULZER, NORTON) используют соединение элементов насадки в пакеты за счет жесткого бандажа и сварки (см. рис. 1а), что обеспечивает механическую прочность пакетов, но для обеспечения монтажа насадки в колонну приводит к необходимости изготавливать пакеты диаметром на 3...8 мм меньше, чем диаметр корпуса колонны. При эксплуатации это приводит к байпасированию потоков жидкости и пара между корпусом колонны и пакетами насадки. Использование лепестков (см. рис. 1б) лишь частично уменьшает негативные эффекты байпасирования, т.к. основное тело пакета также выполняется диаметром меньшим диаметра корпуса колонны.

В ФГУП «РНЦ «Прикладная химия» разработаны модификации упругих РН, из специально гофрированных металлических сеток полотняного плетения и сеток типа ПФ. Насадки выполняются в виде пакетов высотой 120...150 мм. Пакет собирается в виде упругого эллипса, одна из осей которого, расположенная перпендикулярно гофрированным листам, выполняется больше, чем внутренний диаметр колонны. Конструкция обеспечивает восстанавливаемые осевые деформации пакетов при монтаже (см. рис. 1в). Диаметр пакетов насадки после их установки в корпус колонны равен диаметру колонны. Это обеспечивает плотное прилегание пакетов насадки к корпусу колонны после монтажа и исключает неконтролируемый ток жидкости в пристенном слое при эксплуатации, характерный для конструкций большинства регулярных насадок. Внешний вид пакетов упругих насадок из сетки приведен на рис. 2.

Были проведены гидродинамические и массообменные исследования РН из металлических сеток с различными распределителями жидкости и пара на лабораторных стендах и в условиях действующих производств на промышленных колоннах диаметром от 200 до 1400 мм. Изучено влияние высоты гофра насадки и

типа используемой сетки на ее удельную поверхность, эффективность и пропускную способность при формировании упругих пакетов (см. рис. 3, 4). Определена динамическая и статическая задержка жидкой фазы для данных насадок. Для насадки из сеток полотняного плетения динамическая задержка составляет 4...4,5 % от объема насадки, а для насадок из сеток типа ПФ – 5...5,5 %. Установлено, что плотное прилегание упругих пакетов к корпусу колонны обеспечивает повышение эффективности аппарата на 10...15 % по сравнению с установкой жестких пакетов с технологическим зазором 3...8 мм между корпусом колонны и насадкой. Важным фактором, влияющим на эффективность работы колонн с РН, является равномерное распределение потока жидкости. Распределительные устройства (РУ) насадочных колонн, предлагаемые различными фирмами, имеют число точек орошения от 100 до 300 на 1 м² сечения аппарата. Нашими исследованиями показано, что увеличение числа точек орошения до 600...800 на 1 м² уменьшает степень неравномерности распределения жидкости на 1 м высоты насадки с 30 до 5 %, повышает эффективность колонн с РН на 10...15 % и снижает требования к точности горизонтальной установки распределительных устройств (допускаемое отклонение от горизонтали увеличивается с 1 мм/м для типового распределителя до 5 мм/м для разработанных конструкций), что существенно облегчает монтаж колонн. На рис. 5 и 6 приведены конструкции разработанных капиллярных многоточечных распределителей жидкостного потока для колонн различного диаметра.

Для создания равномерности парового потока по высоте колонны предложены специальные устройства – структурированные перераспределители парового потока (см. рис. 7), устанавливаемые над распределителями жидкости. Они, с одной стороны, обеспечивают равномерную подачу жидкости в каналы распределителя, с другой – перемешивание парового потока и его высокую изотропность на входе в вышележащие блоки насадки, что гарантирует однородность гидродинамического взаимодействия пара и жидкости по всей высоте слоя. Предложенные распределители жидкости и перераспределители пара могут с успехом использоваться и для колонн с насыпными насадками.

Съем продукции с единицы объема в колоннах с разработанными упругими РН, многоточечными распределителями жидкостного потока и перераспределителями парового потока в 1,6...2 раза выше, чем у наиболее эффективных металлических сетчатых насадок фирмы SULZER типа ВХ, СУ и MELLAPAK 750 Y (см. табл. 1).

Относительные габариты тарельчатых колонн и колонн с упругими РН для различных производств: изопрена, этилового спирта, ПВ – приведены на рис. 8, 9.

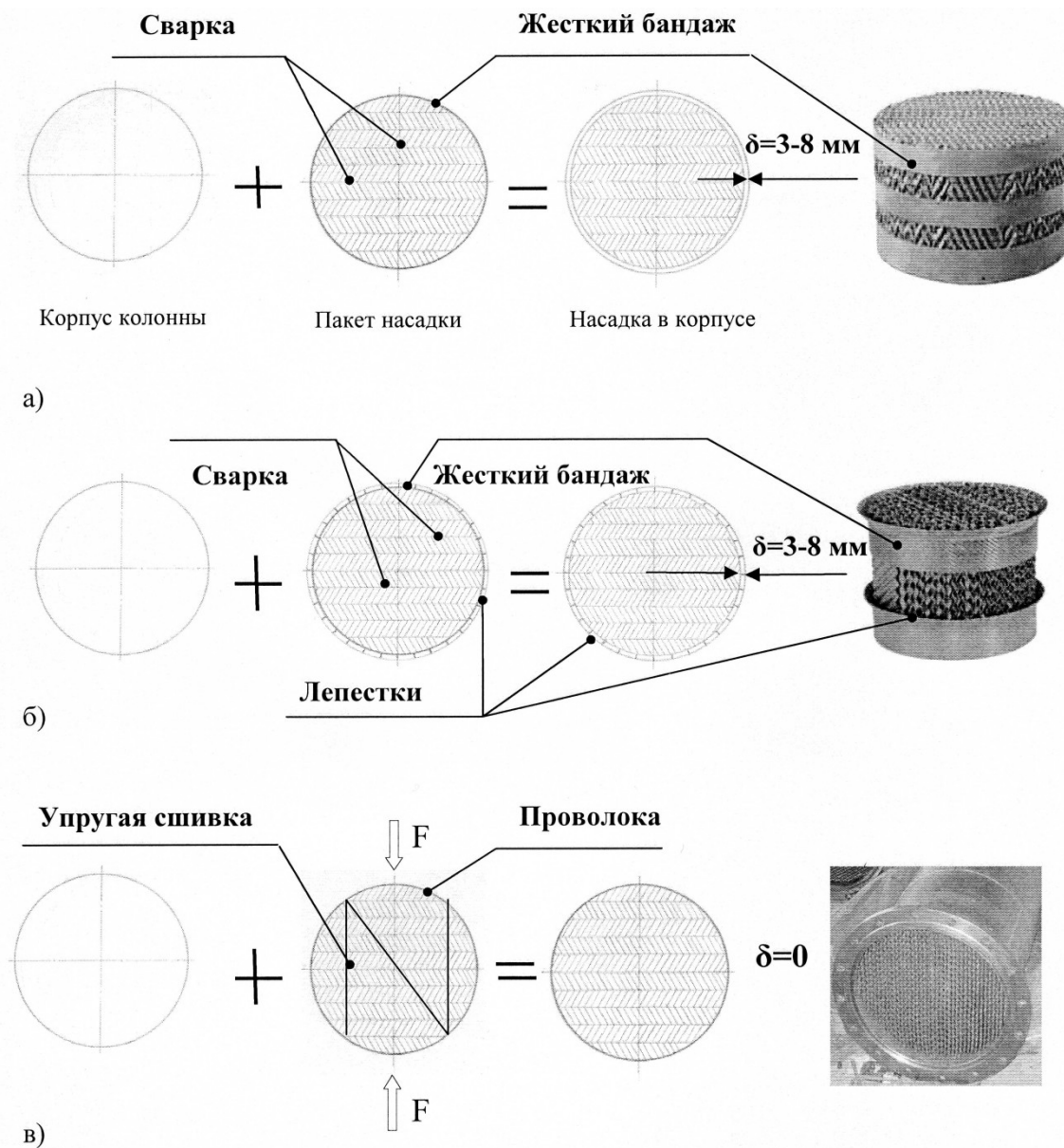


Рис. 1. Способы сборки пакетов насадки и их установки в колонну:

- а) с жестким бандажом (фирмы SULZER, NORTON);
 - б) с жестким бандажом и лепестками (фирма SULZER);
 - в) упругие пакеты – ГИПХ
- (F- усилие сжатия при установке пакета в царгу колонны)



Рис. 2. Пакеты упругой регулярной насадки из сетки ПП

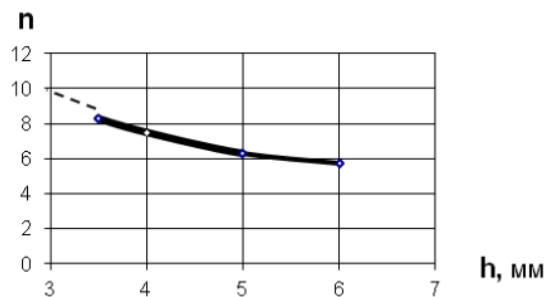


Рис. 3. Число теоретических тарелок (n) на 1 м высоты в зависимости от глубины гофра (h) для сеток полотняного плетения

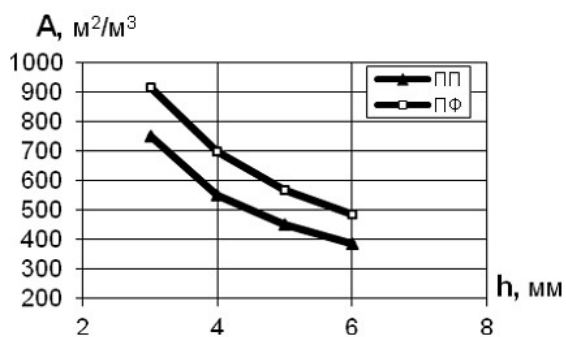


Рис. 4. Зависимость удельной поверхности (A) насадок в зависимости от глубины гофра (h). ПП – сетки полотняного плетения; ПФ – сетки типа ПФ



Рис. 5. Распределители жидкостного потока патрубкового типа для колонн диаметром до 400 мм включительно



Рис. 6. Распределители жидкостного потока желобчатого типа для колонн диаметром более 400 мм



Рис. 7. Структурированные пере-распределители парового потока

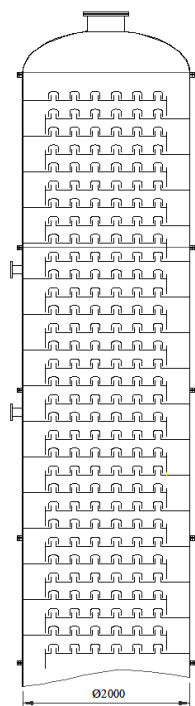
Таблица 1. Сравнительные характеристики регулярных насадок

Тип насадки	Эффективность, n т.т./м	$F = w \cdot \sqrt{\rho_n}$ кг ^{0,5} /(с*м ^{0,5})	I_s кг/м ³ *с	I_i/I_1
ГИПХ-6 (ПП*)	6	2,5	18	0,99
ГИПХ-8 (ПП)	8	1,9	18,2	1
ГИПХ-10 (ПФ**)	10	1,7	20,4	1,12
BX (SULZER)	6	1,1	7,9	0,43
CY (SULZER)	10	0,9	10,8	0,59
MELLAPAK 750.Y (SULZER)	5,8	1,6	11,1	0,61
* – пакеты насадки из сетки полотняного плетения; ** – пакеты насадки из сетки типа ПФ				

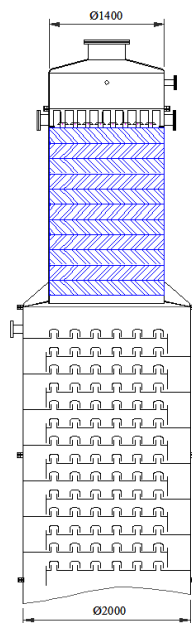
Разработанные высокоинтенсивные конструкции колонн с упругими РН и многоточечными РУ эффективно решают целый класс задач по модернизации и техническому перевооружению ректификационных комплексов: низкое гидравлическое сопротивление колонн с упругими РН (0,3...0,6 мм Hg на одну теоретическую тарелку) и малое время пребывания в них жидкой фазы делает разработанные колонны незаменимыми при ректификации термолабильных продуктов и вакуумной ректификации (получение продуктов специальной химии, гидроксилamina, перекиси водорода, абсолютированного этилового спирта, вакуумные колонны в процессах нефтепереработки и др.), расширяет область их эффективного применения на процессы ректификации, когда в колоннах возможно протекание нежелательных химических реакций (производство метилового, этилового, пропиловых спиртов, очистка глицерина и др.).

Использование упругих РН в колоннах периодического действия, используемых в малотоннажной химии обеспечивает эффективность 80...120 т.т. при высотах установок 10...15 м, существенно повышает выход и чистоту товарных продуктов.

Высокая эффективность и пропускная способность, низкая металлоемкость данных колонн решает проблему размещения и модернизации ректификационных комплексов в зданиях при ограничениях по высоте и площадям, делает экономически привлекательным использование колонн с упругими РН на морских комплексах технических средств для добычи и переработки природного газа в метанол.



а)



б)



в)



г)

Рис. 8. Вариант модернизации существующей тарельчатой колонны путем ее наращивания насадочным блоком. ОАО «Престиж» г. Владикавказ:

а) вариант с установкой двух тарельчатых царг \varnothing 2000 мм (гипотетический);

б) вариант с установкой насадочной царги \varnothing 1400 мм (реализованный)

в), г) – фотографии насадочной царги для варианта б).

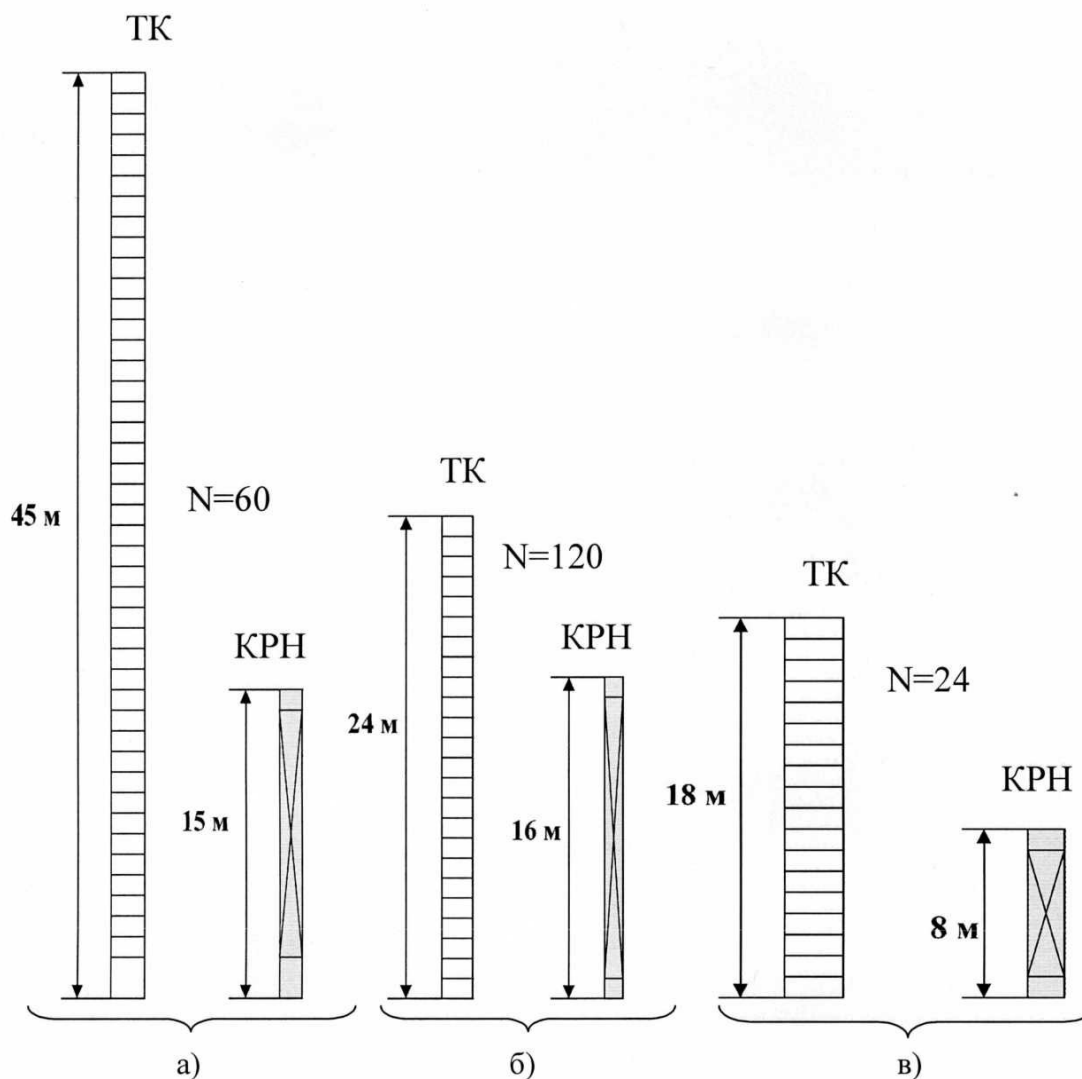


Рис. 9. Относительные габариты тарельчатых колонн и колонн с упругими РН:
 а) производство изопрена (стадия выделения триметилкарбинола);
 б) производство этилового спирта; в) производство перекиси водорода;
 ТК – тарельчатые колонны; КРН – колонны с РН

Выводы

1. Установлено, что увеличение числа точек орошения с 200...300 на 1 м^2 , применяемое для колонн с РН, до 600...800 на 1 м^2 уменьшает степень неравномерности распределения жидкости на 1 м высоты насадки с 30 до 5 % и повышает эффективность РН на 10...15 %.

2. Исключение байпасирования потоков жидкости и пара через технологические кольцевые зазоры между корпусом колонны и пакетами насадки за счет использования упругих РН повышает эффективность промышленных колонн примерно на 10 %.

3. Использование структурированных перераспределителей парового потока обеспечивает перемешивание парового потока в межблочной зоне и его высокую изотропность на входе в вышележащие блоки насадки, что гарантирует однородность гидродинамического взаимодействия пара и жидкости по всей высоте слоя.

4. Предложенный комплекс технических решений по повышению эксплуатационных характеристик колонн с регулярными насадками обеспечивает повышение съема продукции с единицы объема аппарата в 1,5...2 раза по сравнению с лучшими зарубежными аналогами.

Литература

1. J.J.Gualito, F.J. Cerino, J.C. Cardenas and J.A.Rocha. Design Method for Distillation Columns Filled with Metallic, Ceramic, or Plastic Structured Packings, *Ind. Eng. Chem. Res.*, 1997, 36 (5), pp 1747-757. DOI: 10.1021/ie960625z

2. Reinhard Billet. Packed towers in processing and environmental technology. Wiley-VCH, 1995. 382 p.

3. Fluidodynamik bei der Zweiphasenströmung durch Füllkörper- und Packungskolonnen. Ed.: G. Grabbert, R. Bonitz. Technische Universität Bergakademie Freiberg, 1998. 110 p.

4. Engel E.V. Fluidodynamik in Packungskolonnen für Gas - Flüssig-Systeme. Dissertation VDI - Fortschritt-Berichte Reihe 3, Nr. 605, 1999.

5. Сепарационные колонны для дистилляции и абсорбции. Sulzer Chemtech Ltd, 1990.

6. Леонтьев В.С., Щеголев В.В., Пимкин В.Г. и др. Энерго- и ресурсосберегающие процессы в химической технологии, нефтехимии и биотехнологии. Часть 1. Современные направления развития технологии и аппаратного оформления процессов ректификации в спиртовых производствах. Под редакцией Леонтьева В.С. С-Пб.: «Тэза», 2004, 184 с.

7. Леонтьев В.С. Сидоров С.И. Современные насадочные колонны: особенности конструктивного оформления // Химическая промышленность. 2005. № 7. С. 347-356.

8. Сидоров С.И., Леонтьев В.С. Использование регулярных насадок для модернизации колонного оборудования // Химагрегаты. Июнь 2009. С. 18-21.

INNOVATIVE DEVELOPMENT OF HIGH-INTENSITY MASS EXCHANGE UNITS TO UPGRADE RECTIFICATION COMPLEXES

V.S. Leontiev

*Russian Scientific Center "Applied Chemistry", Saint-Petersburg, Russia
e-mail: leontiev@etelecom.spb.ru*

Abstract. *A set of engineering solutions is considered to improve performance of regular packing towers. The following is proposed: batches of elastic regular packing to prevent bypassing of fluid and vapor flows between packing and tower walls, multipoint capillary fluid distributors providing 600 to 800 irrigation points per 1 m², vapor flow redistributors providing uniform vapor-fluid interaction throughout the packing depth. Results of hydrodynamic and mass-exchange studies of upgraded towers are presented.*

Keywords: *rectification, regular packing, multipoint distributors, upgrade*

References

1. J.J. Gualito, F.J. Cerino, J.C. Cardenas and J.A. Rocha. Design Method for Distillation Columns Filled with Metallic, Ceramic, or Plastic Structured Packings, *Ind. Eng. Chem. Res.*, 1997, 36 (5), pp 1747-757. DOI: 10.1021/ie960625z
2. Reinhard Billet. Packed towers in processing and environmental technology. Wiley-VCH, 1995. 382 p.
3. Fluidodynamik bei der Zweiphasenströmung durch Füllkörper- und Packungskolonnen. Ed.: G. Grabbert, R. Bonitz. Technische Universität Bergakademie Freiberg, 1998. 110 p.
4. Engel E.V. Fluidodynamik in Packungskolonnen für Gas - Flüssig-Systeme. Dissertation VDI - Fortschritt-Berichte Reihe 3, Nr. 605, 1999.
5. Separation columns for distillation and absorption. Sulzer Chemtech Ltd, 1990.
6. Leontiev V.S., Shchegolev V.V., Pimkin V.G. et al. Energo- i resursosberegayushchie protsessy v khimicheskoi tekhnologii, neftekhimii i biotekhnologii. Chast' 1. Sovremennye napravleniya razvitiya tekhnologii i apparaturnogo oformleniya protsessov rektifikatsii v spirtovykh proizvodstvakh (Energy and resource saving processes in chemical engineering, petrochemical, and biotechnology. Part 1. Modern trends in technology development and hardware design processes of rectification in alcohol production). Ed.: V.S. Leontiev. SPb., Thesa, 2004, 184 p.
7. Leontiev V.S. Sidorov S.I. Sovremennye nasadochnye kolonny: osobennosti konstruktivnogo oformleniya (Modern packed columns: features of the constructive design), *Khimicheskaya promyshlennost'*, 2005, Issue 7, pp. 347-356.
8. Sidorov S.I., Leontiev V.S. Ispol'zovanie regulyarnykh nasadok dlya modernizatsii kolonnogo oborudovaniya (Using regular packing for the modernization of column equipment), *Khimagregaty*, June 2009, pp. 18-21.