

УДК 66.011; 66.048.3.069.833

РАСЧЕТ ЗАДЕРЖКИ ЖИДКОЙ ФАЗЫ В КОЛОННАХ С УПРУГИМИ РЕГУЛЯРНЫМИ НАСАДКАМИ И МНОГОТОЧЕЧНЫМИ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЯМИ

Леонтьев В.С.

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

Романова Н.А.

Санкт-Петербургский государственный горный университет,
г. Санкт-Петербург, e-mail: Natar18@gmail.com

Аннотация. Рассмотрены основные конструктивные элементы колонн с регулярными насадками. Получены зависимости для расчета задержки жидкости в распределительных устройствах патрубкового (для колонн диаметром 200...400 мм) и желобчатого (для колонн диаметром 500...1400 мм) типов. Приведена оценка применимости известных формул расчета динамической удерживающей способности насадок применительно к упругим регулярным насадкам.

Ключевые слова: регулярные насадки, распределитель жидкости, перераспределитель пара, динамическая задержка

Колонны с регулярными насадками (РН) являются одними из наиболее эффективных типов ректификационных аппаратов и широко используемых в химических и нефтехимических технологиях.

Эффективная работа ректификационных колонн с РН обеспечивается совокупностью трех основных конструктивных элементов: собственно пакетами насадки, распределителями жидкой фазы, перераспределителями парового потока (см. рис. 1).

Известные фирмы (SULZER, NORTON) используют соединение элементов насадки в пакеты за счет жесткого бандажа и сварки, что обеспечивает механическую прочность пакетов, но для обеспечения монтажа насадки в колонну необходимо изготавливать пакеты диаметром на 3...8 мм меньше, чем диаметр корпуса колонны. При эксплуатации это приводит к байпасированию жидкости между корпусом колонны и пакетами насадки, что ухудшает массообменные характеристики колонн.

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. При монтаже пакет сжимается по большей оси эллипса и вставляется в корпус колонны. Конструкция обеспечивает восстанавливаемые радиальные деформации пакетов. 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 байпасирование жидкости в пристенном слое при эксплуатации, характерное для конструкций большинства регулярных насадок.

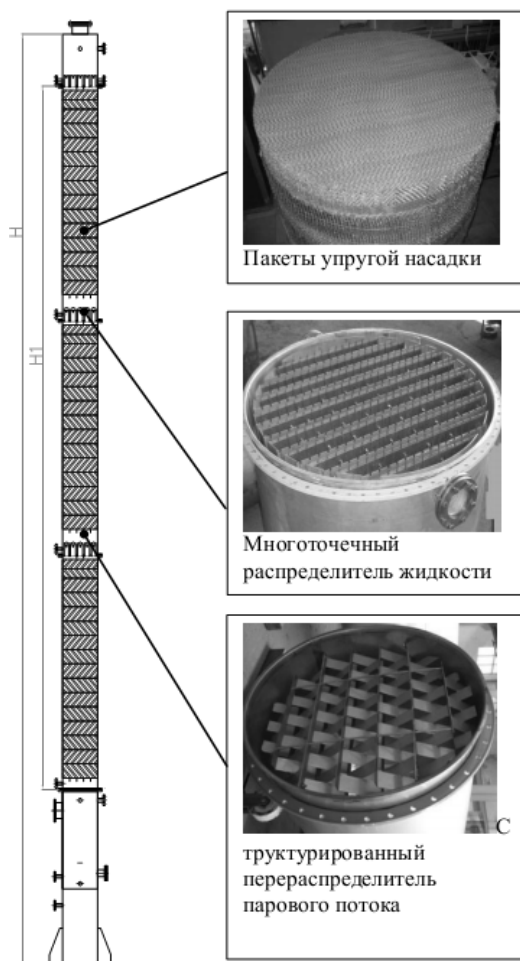


Рис. 1. Основные узлы колонны с РН

Распределительные устройства (РУ) насадочных колонн, предлагаемые различными фирмами, имеют число точек орошения от 100 до 300 на 1 м^2 сечения аппарата. Нашими исследованиями на лабораторных гидродинамических стендах диаметром 200 и 400 мм и проверкой в условиях действующих производств на промышленных колоннах диаметром от 200 до 1400 мм в диапазоне нагрузок по жидкости от $0,5 \text{ м}^3/(\text{м}^2\text{ч})$ до $20 \text{ м}^3/(\text{м}^2\text{ч})$ показано, что увеличение числа точек орошения до 600...800 на 1 м^2 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.

Разработаны типоразмеры колонн с многоточечными распределителями жидкости и упругими РН диаметрами 200, 300, 400, 500, 600, 700, 800, 900, 1100, 1200, 1400 мм. Для диаметров до 400 мм включительно разработаны патрубковые распределители, а свыше 400 мм – желобчатые.

Расстояние между распределителями жидкой фазы определяется следующими условиями:

1. необходимо обеспечить равномерность орошения на всей высоте слоя насадки от одного распределителя до другого;

2. необходимо организовать отборы или подачу продукта в определенных точках (в колоннах с регулярными насадками отбор и подача жидкой фазы осуществляется на распределительное устройство).

Рекомендуется расстояние между распределителями для колонн диаметром 200...400 мм принимать 0,5...2 м, а для колонн диаметром 500...1400 мм – 1...3 м.

Для создания равномерности парового потока по высоте колонны предложены специальные устройства – структурированные перераспределители парового потока, 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.

В колоннах с РН время задержки жидкой фазы в распределительных устройствах сопоставимо с динамической задержкой в слое насадки и должно учитываться при расчете нестационарных процессов и построении профиля концентраций по высоте колонны.

Жидкостью, находящейся на элементах структурированного перераспределителя парового потока можно пренебречь, т.к. ее количество составляет менее 3 % от объема, находящегося в распределителе жидкости.

Если для расчета удерживающей способности насадок имеются многочисленные зависимости [1 - 7], то уравнений для оценки времени пребывания продукта на распределительных устройствах практически нет.

Предлагается для многоточечных распределителей жидкости патрубкового и желобчатого типов расчет задержки в них жидкости проводить следующим образом.

Многоточечный распределитель патрубкового типа и расчетная схема для определения задержки в нем жидкости представлены на рис. 2.

Так как объемный расход жидкости через прорезь невелик и, как правило, вязкость обрабатываемых продуктов незначительна, имеет место неравенство:

$$\frac{\sigma}{\mu v} \gg 1, \quad (1)$$

где σ – поверхностное натяжение, кг/с²; μ – динамическая вязкость жидкости, кг/(м·с); v – средняя скорость жидкости в прорези, м/с.

Справедливость выражения (1) подтверждается данными, приведенными в источнике [9]. Следовательно, можно считать, что расход жидкости через прорези практически не зависит от вязкости, и вычисляется как для обычного водослива:

$$V_1 \cong 0,386 H^{3/2} b \sqrt{2g} \quad (2)$$

где V_1 – объемный расход через одну прорезь, м³/с; H – высота уровня жидкости над кромкой прорези, м; b – ширина прямоугольной прорези, м; $g = 9,81$ м/с² – ускорение свободного падения.

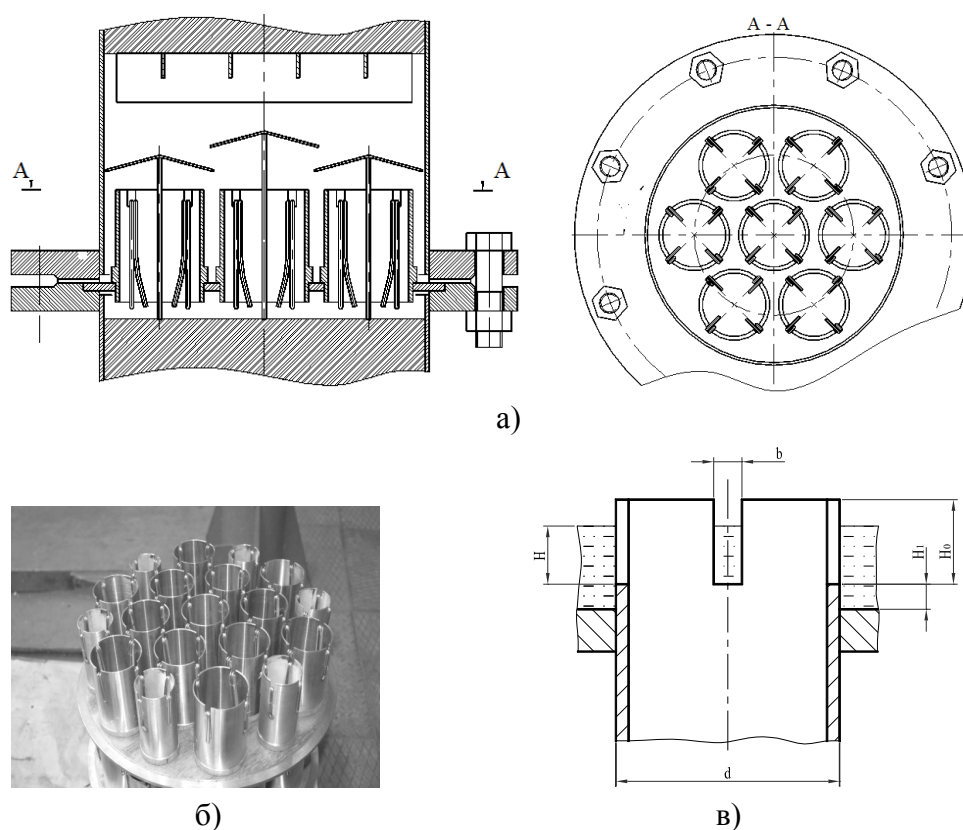


Рис. 2. Распределитель жидкостного потока патрубкового типа для колонн диаметром до 400 мм включительно:

а) – схематичное изображение, б) – фотография, в) – расчетная схема

Минимальный уровень жидкости над кромкой прорези можно оценить по следующей зависимости:

$$H_{\min} \cong \frac{4\sigma}{\rho g b}, \quad (3)$$

где ρ – плотность жидкости, кг/м³.

Конструктивно рекомендуется принимать высоту прорези $H_0 = 2,5 H_{\min}$.

Пусть N – число патрубков в распределительном узле, n_{np} – число прорезей в патрубке, V – объемный расход продукта на распределитель, м³/с. Тогда средняя высота слоя жидкости в распределителе (H_f):

$$H_f \cong H_1 + H = H_1 + \left(\frac{V}{0,386 n_{np} N b \sqrt{2g}} \right)^{2/3}, \quad (4)$$

где H_1 – расстояние от кромки прорези до трубной доски или дна желоба, м; H – высота уровня жидкости над кромкой прорези, м.

Следовательно, объем жидкости в распределительном узле (V_{py}) легко определяется по формуле:

$$V_{py} \cong \frac{\pi H_f}{4} (D^2 - Nd^2), \quad (5)$$

где D – диаметр колонны, м; d – диаметр патрубка, м.

Конструкция многоточечного желобчатого распределителя и расчетная схема для определения задержки в нем жидкости представлены на рис. 3. Прорези могут выполняться прямоугольной или треугольной формы.

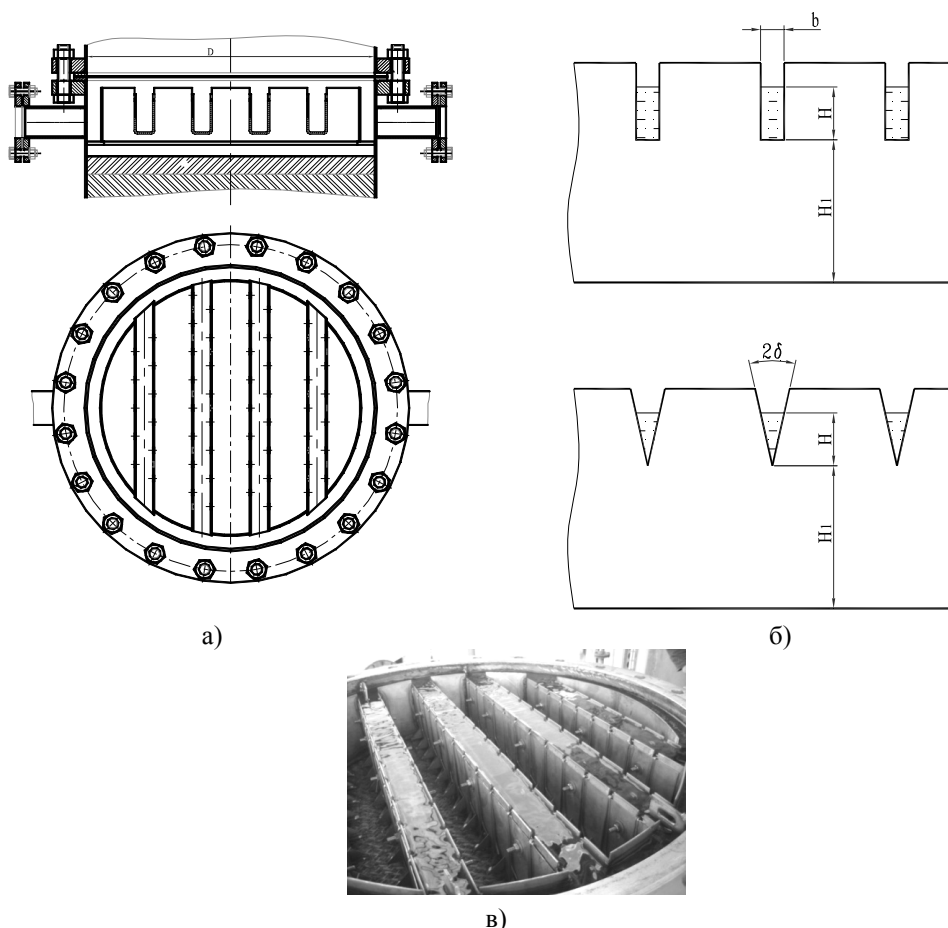


Рис. 3. Распределитель жидкостного потока желобчатого типа для колонн диаметром более 400 мм:

а – схематичное изображение; б – расчетная схема; в – фотография

Из соображений, приведенных выше, будем считать, что расход жидкости через прорези не зависит от вязкости и вычисляется по формулам для обычных водосливов [10, 11]:

– для прямоугольной прорези:

$$V_1 \cong \frac{2}{3} mb \sqrt{2gH^3}, \quad (6)$$

– для треугольной прорези:

$$V_1 \cong \frac{8}{15} m \sqrt{2gH^5 \tan \delta}, \quad (7)$$

где m – коэффициент расхода; 2δ – угол развертки треугольной прорези.

Для оценки значений коэффициента расхода « m » в результате обработки данных, приведенных в [4], были получены следующие соотношения:

– для прямоугольных прорезей:

$$m \cong \exp\left(0,2752 - \frac{2,5153}{N_z - 0,5674}\right), \quad (8)$$

$$N_z = \frac{\rho g}{\sigma} \left(\frac{bH^2}{b+2H}\right); N_z \geq 1,4, \quad (9)$$

– для треугольных прорезей:

$$m \cong \exp\left(-0,3708 - \frac{1,0683}{N_z - 1,6416}\right), \quad (10)$$

$$N_z = \frac{\rho g}{2\sigma} H^2 \sin \delta; N_z \geq 2, \quad (11)$$

где N_z – приведенное число прорезей.

Минимальный уровень жидкости над кромкой прорези прямоугольной конфигурации оценивается по формуле (3), а в случае треугольной конфигурации – определяется из следующего соотношения:

$$H_{\min} \cong \sqrt{\frac{\sigma}{\rho g \sin \delta}}. \quad (12)$$

Пусть $n_{жпр}$ – суммарное число прорезей в желобчатом распределителе; $S_{жс}$ – суммарная площадь дна всех желобов, m^2 ; V – объемный расход продукта на распределитель, m^3/c . Тогда, используя (6) и (7), получим уравнения для расчета величины H_f – средней высоты слоя жидкости в каналах распределителя, m :

– для прямоугольных прорезей:

$$H_f \cong H_1 + \left(\frac{3V}{2n_{жпр} mb \sqrt{2g}}\right)^{2/3}, \quad (13)$$

– для треугольных прорезей:

$$H_f \cong H_1 + \left(\frac{15V}{8n_{жпр} m \sqrt{2g \tan \delta}}\right)^{2/5}. \quad (14)$$

Зная значение H_f , можно легко оценить общий объем продукта в распределителе:

$$V_{py} \cong S_{ж} H_f. \quad (15)$$

Результаты расчетов по формулам (4-5) и (13-15) хорошо согласуются с экспериментальными данными. Относительная погрешность не превышает 7%.

Динамическая удерживающая способность упругих РН может быть оценена по известным зависимостям, приведенным в источниках [4-7] для расчета удерживающей способности жестких РН из сеток, и хорошо согласуется с полученными экспериментальными данными.

Например, динамическую удерживающую способность упругих регулярных насадок в рабочей области (до режима подвисяния) можно определить на основании зависимостей, приведенных в работе [7] для расчета жестких регулярных насадок:

$$V_o = \frac{\pi D}{4} h_0, \quad (16)$$

$$h_0 = 0,555 Fr_1^{1/3}, \quad (17)$$

$$Fr_1 = \frac{v_1^2 a_p}{g \varepsilon^{4,65}}, \quad (18)$$

где V_o – динамическая удерживающая способность насадки (на 1 м² сечения колонны и 1 м высоты насадки), м³/м²; h_0 – вспомогательный безразмерный комплекс; Fr_1 – критерий Фруда для жидкости; a_p – удельная поверхность насадки, м²/м³; ε – доля свободного объема насадки; v_1 – скорость движения жидкости в насадке, м/с.

Для упругой регулярной насадки относительная погрешность, рассчитанная по формулам (16-18), от экспериментальных данных не превышала 10%.

Движение жидкости в предложенных распределительных устройствах можно описать моделью идеального перемешивания, а в насадке – ячеечной моделью, где высота ячейки равна высоте эквивалентной теоретической тарелке (ВЭТТ).

Полученные зависимости необходимы для расчета переходных процессов в ректификационных колоннах с регулярной насадкой.

Выводы

1. Задержка жидкой фазы в распределительных устройствах сопоставима с динамической задержкой жидкости в регулярных насадках.

2. Полученные зависимости позволяют проводить расчеты задержки жидкой фазы в многоточечных трубчатых и желобчатых распределителях.

3. Для расчета динамической задержки жидкости в упругих регулярных насадках можно использовать известные зависимости для расчета задержки в жестких регулярных насадках.

4. Задержкой жидкости в перераспределителях парового потока можно пренебречь.

Литература

1. Кафаров В.В. Основы массопередачи. М.: Высшая школа, 1979, 439 с.
2. Коган В.Б., Харисов М.А. Оборудование для разделения смесей под вакуумом. Л.: Машиностроение, 1976. 376 с.
3. Дьяконов С.Г., Елизаров В.И., Лаптев А.Г. Теоретические основы и моделирование процессов разделения веществ. Казань: Изд-во Казанского университета, 1993. 437 с.
4. Reinhard Billet. Packed towers in processing and environmental technology. Wiley-VCH, 1995. 382 p.
5. Zogg M. Stromungs-und Stoffauschuntersuchungen an der Sulzer-Gewebe-packung, Zurich, 1972. 180 p.
6. Stoter C.F. Modelling of maldistribution in structured packings: from detail to column desing, Delft, 1993. 183 p.
7. Volker E. Fluiddynamic in Packungskolonnen für Gas-Flüssig-Systme, Düsseldorf, 1999. 104 p.
8. Леонтьев В.С., Сидоров С.И. Современные насадочные колонны: особенности конструктивного оформления // Химическая промышленность. 2005. № 7. С. 347-356.
9. Головачевский Ю.А. Оросители и форсунки скрубберов химической промышленности. М.: Машиностроение, 1967. 196 с.
10. Штеренлихт Д.В. Гидравлика. Книга 1. М.: Энергоатомиздат, 1991. 351 с.
11. Штеренлихт Д.В. Гидравлика. Книга 2. М.: Энергоатомиздат, 1991. 367 с.

**CALCULATION OF LIQUID PHASE RETENTION IN TOWERS
PACKED WITH ELASTIC REGULAR PACKING
AND MULTI-POINT DISTRIBUTORS**

V.S. Leontiev

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

N.A. Romanova

Saint-Petersburg State Mining University, Saint-Petersburg, Russia

***Abstract.** Key structural components of regular packed towers are considered. Dependencies are deduced to calculate liquid retention in nipple-type and channel-type distributing units (for tower diameters 200 to 400 mm and 500 to 1400 mm, respectively). Known equations to calculate dynamic retention capability of a packing are analyzed for applicability to elastic regular packing.*

***Keywords:** regular packing, liquid distributor, steam redistributor, dynamic retention*

References

1. Kafarov V.V. Osnovy massoperedachi (Fundamentals of mass transfer). Moscow, Vysshaya shkola, 1979. 439 c.
2. Kogan V.B., Kharisov M.A. Oborudovanie dlya razdeleniya smesei pod vakuomom ((Equipment for vacuum separation of mixtures). Leningrad, Mashinostroenie, 1976. 376 p.
3. D'yakonov S.G., Elizarov V.I., Laptev A.G. Teoreticheskie osnovy i modelirovanie protsessov razdeleniya veshchestv (The theoretical basis and simulation of separation of substances). Kazan State University Publishing House, 1993. 437 p.
4. Reinhard Billet. Packed towers in processing and environmental technology. Wiley-VCH, 1995. 382 p.
5. Zogg M. Stromungs-und Stoffauschuntersuchungen an der Sulzer-Gewebe-
packung, Zurich, 1972. 180 p.
6. Stoter C.F. Modelling of maldistribution in structured packings: from detail to column desing, Delft, 1993. 183 p.
7. Volker E. Fluiddynamic in Packungskolonnen für Gas-Flüssig-Systeme, Düsseldorf, 1999. 104 p.
8. 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.

9. Golovachevskii Yu.A. Orositeli i forsunki skrubberov khimicheskoi promyshlennosti (Sprinklers and nozzles of scrubbers in the chemical industry). Moscow, Mashinostroenie, 1967. 196 p.

10. Shterenlikht D.V. Gidravlika (Hydraulics). Book 1. Moscow, Energoatomizdat, 1991. 351 p.

11. Shterenlikht D.V. Gidravlika (Hydraulics). Book 2. Moscow, Energoatomizdat, 1991. 367 p.