

АНДРЕЙ ВОРОШИН<sup>1</sup>, JANUSZ KRAWCZYK<sup>2</sup>, ОЛЕГ ЧАГИН<sup>1</sup>,  
ВАЛЕНТИН ШАРНИН, ВАЛЕРЬЯН БЛИНИЧЕВ

## ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПАКЕТНОЙ ВИХРЕВОЙ НАСАДКИ ПО СРАВНЕНИЮ С ДРУГИМИ НАСАДКАМИ

### EFFICIENT BATCH VORTEX NOZZLES COMPARED WITH OTHER NOZZLES

#### Аннотация

В статье приводится сравнительный анализ эффективности тарельчатых и насадочных колонных аппаратов. Показано, что разработанная в ИГХТУ совместно с Краковской Политехникой пакетная вихревая насадка (ПВН) существенно отличается от лучших зарубежных насадок, значительно меньшим гидравлическим сопротивлением, высоким диапазоном плотности орошения от минимальной до  $120 \text{ м}^3/\text{м}^2\text{ч}$  и высокой эффективностью массообмена.

*Ключевые слова: массообмен, насадка, абсорбция, ректификация, плотность орошения, гидравлическое сопротивление*

#### Abstract

The article provides a comparative analysis of the effectiveness of Belleville, and packed columns machines. It is shown that developed in conjunction with ISUCT Krakow Polytechnic batch swirl nozzle (PVN) is significantly different from the best foreign attachments, significantly lower hydraulic resistance, high density range from a minimum of irrigation to  $120 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{h}$  and high efficiency of mass transfer.

*Keywords: mass transfer, attachment, absorption, distillation, density, irrigation, hydraulic resistance*

<sup>1</sup> Аспирант Андрей Валерьевич Ворошин, к.т.н., доцент Олег Вячеславович Чагин, д.х.н., профессор Валентин Аркадьевич Шарнин, д.т.н., профессор Валерьян Николаевич Блиничев, Ивановский государственный химико-технологический университет.

<sup>2</sup> Dr hab. inż. Janusz Krawczyk, prof. PK, Politechnika Krakowska.



В ряде производств химической, нефтяной, пищевой и других отраслей промышленности в результате различных технологических процессов получают смеси жидкостей, которые необходимо разделять на составные части.

Для разделения смесей жидкостей и сжиженных газовых смесей в промышленности применяют способы простой перегонки (дистилляции), перегонки под вакуумом и с водяным паром, молекулярной перегонки и ректификации. Ректификацию широко используют в промышленности для полного разделения смесей летучих жидкостей, частично или целиком растворимых одна в другой.

В настоящее время все работающие абсорбционные и ректификационные колонны можно разделить на две большие группы: тарельчатые колонны, работающие в барботажном режиме; и насадочные, и специальные пленочные, работающие, в основном, в режиме стекающей тонкой пленки разделяемой смеси и движущегося вверх пара.

Анализ эффективности работы тарельчатых колонных аппаратов с конструкциями показывает, во первых, что все тарельчатые массообменные устройства (кроме струйных) работают в барботажном режиме, а во вторых, поверхность межфазного контакта, а также интенсивность тепло- и массообмена не очень сильно зависят от конструктивного оформления тарелок.

Тарельчатые колпачковые колонны наиболее часто применяют в ректификационных установках. Основной областью массообмена и теплообмена между парами и жидкостью, является слой пены и брызг над тарелкой, создающийся в результате барботажа пара.

К недостаткам тарельчатых абсорбционных и ректификационных колонн необходимо отнести:

- высокое гидравлическое сопротивление одной тарелки ( $500 \div 1000$  Па), которое даже при минимальном числе тарелок  $25 \div 35$  шт. в промышленных установках приводит к необходимости перегрева кубовой жидкости (для создания давления пара) т.е. избыточных затрат энергии, а так же к снижению качества разделения за счет выноса паров трудно кипящей жидкости вверх колонны;
- сравнительно низкая эффективность тепло- и массопереноса на одной тарелке, приводящая к большой высоте единицы переноса и, соответственно, к большой общей высоте аппарата и высокой его стоимости;
- сравнительно низкие скорости пара по свободному сечению аппарата ( $0,3 \div 2,0$  м/с), приводящие к большим диаметрам колонн, что, в свою очередь, сказывается и на общей высоте колонн (т.к. известно, что, чем больше диаметр колонны, тем больше расстояние между тарелками);
- в колоннах с переливными устройствами (которых преимущественное большинство, т.к. колонны с ситчатыми провальными тарелками применяются крайне редко) существует перепад высот барботажного слоя от точки поступления жидкой фазы с вышестоящей тарелки к переливной перегородке или к переливным трубам, приводящей к поперечной неравномерности потока паровой фазы.



Учитывая, что тарельчатые колонны обладают целым рядом недостатков, большинство работ в России и за рубежом направлены на создание новых насадок с очень развитой поверхностью контакта фаз. Все ранее известные регулярные и нерегулярные насадки, и новые развиваемые, например, в Швейцарии фирмой Зульцер, и в Германии, работают в чисто пленочном режиме.

Насадочные колонны представляют собой цилиндрические аппараты, заполненные инертными материалами, имеющими форму, например, колец, шаров, а также листов разной конфигурации для увеличения поверхности фазового контакта и интенсификации перемешивания жидкой и паровой фаз.

По существующей классификации их можно отнести либо к регулярной (правильно уложенной), либо к нерегулярной (засыпной навалом).

По конструктивным признакам применяемые в промышленности нерегулярные насадки можно разделить на следующие основные типы: кольцевые без внутренних перегородок (типа колец Рашига); кольцевые с внутренними перегородками (типа колец Палля); седлообразные (типа седел Берля, инталокс, ИМТР), сферические, прочие.

Кольцевые насадки могут быть изготовлены как со сплошными стенками (кольца Рашига), так и с перфорированными (кольца Перфоринг).

Существуют кольцевые насадки, изготовленные из металлической сетки (кольца Диксона, Борада). Общий недостаток всех кольцевых насадок – их низкая способность к перераспределению жидкой фазы.

Седлообразные насадки также могут быть изготовлены либо со сплошными (седла Берля и седла инталокс), либо с перфорированными стенками (седла суперсетл, ИМТР).

Внутренние перегородки и перфорация стенок у кольцевых насадочных тел позволяют обеспечить дополнительную турбулизацию потоков, что повышает кратность обновления поверхности контакта фаз и, следовательно, эффективность массообмена.

Несмотря на значительный прогресс в области создания высокоэффективных аппаратов с насадочными телами, засыпанными в навал, колоннам такого типа присущи недостатки, которые существенно ограничивают области их применения:

- низкая скорость пара 0,3-1 м/с;
- относительно низкие допустимые нагрузки по плотности орошения;
- значительная материалоемкость;
- не эффективная работа с загрязненными средами, приводящая к быстрой забивке части элементов;
- сложность изготовления высокоэффективных насадочных тел.

Ряд этих недостатков устраняется при использовании регулярных насадок в виде рулонов, пакетов, блоков. Регулярные насадки, обладая упорядоченной структурой, препятствуют возникновению непредвиденных застойных зон, имеющих место в на-



сыпных насадках. Кроме того, они обладают более низким собственными сопротивлением и менее материалоемки.

Идея применения „открытых” насадок получила свое развитие в разработке регулярных (структурированных) насадок, первые промышленные образцы которых созданы швейцарской компанией Sulzer Brothers. Фирма Зульцер предлагает сегодня насадки с поверхностью контакта фаз от 250 до 750 м<sup>2</sup>/м<sup>3</sup> насадки, что требует организации тщательного распределения и перераспределения жидкой фазы по всей поверхности насадок.

Большая поверхность у организованных или регулярных насадок типа Mellapak и др. естественно приводит к уменьшению высоты насадочных колонн, однако всем этим развиваемым аппаратам с регулярными насадками присущ следующий большой недостаток – низкая плотность орошения и большая сложность равномерного распределения жидкой фазы по поверхности насадок.

Из приведенных материалов видно, что современные насадочные колонны составляют серьезную конкуренцию тарельчатым аппаратам, превосходя последние по целому ряду показателей, таких как эффективность, производительность, устойчивость работы. Относительно высокая стоимость, затрудненность работы с загрязненными средами, низкая плотность орошения и малая скорость газа или пара сдерживают широкое распространение регулярных насадок.

Для регулярных насадок преобладает пленочный режим течения жидкости. При нагрузках, близких к предельным, заметную роль начинает играть струйно-капельный режим.

Этих недостатков лишена пакетная вихревая насадка, разработанная в ИГХТУ и ОАО ВМУ.

В отличие от тарельчатых колонн, которые работают в режиме барботажа и всех известных насадочных устройств: регулярных и нерегулярных, работающих только в пленочном режиме, пакетная вихревая насадка работает в устойчивом эмульсионном режиме в широком диапазоне скоростей пара 2,5 ÷ 5,5 м/с.

Пакетная вихревая насадка (ПВН) для тепло- и массообменных аппаратов, разработанная на кафедре МАХП ИГХТУ, состоит из множества одинаковых ячеек прямоугольной формы, соединенных между собой в единый пакет, стенки каждой ячейки смещены относительно друг друга по вертикали, перекрывая фронтальную щель на входе в ячейку за счет удлиненных, загнутых внутрь окончаний, образующих завихритель. При этом, на выходе из ячейки, окончания обеих стенок также выполнены удлиненными и загнутыми внутрь, перекрывая фронтальную щель и образуя второй завихритель. Поверхность каждой ячейки полностью или частично покрыта регулярной шероховатостью или перфорацией любой формы.

Пакетная вихревая насадка может изготавливаться либо в виде отдельных тарелок, выполненных, например, из полимерных материалов, накладываемых друг на друга для создания слоя насадки необходимой высоты рисунок 1, либо в виде пакета, связанных между собой n-рядов (по высоте) слоев вихревых ячеек рисунок 2.



Пакетная вихревая насадка обладает свойством равномерного самораспределения между ячейками жидкой фазы, поступающей сверху даже в виде отдельной струи, так как вихревые выходы паровой или газовой фазы в каждой ячейке направлены в разные стороны.

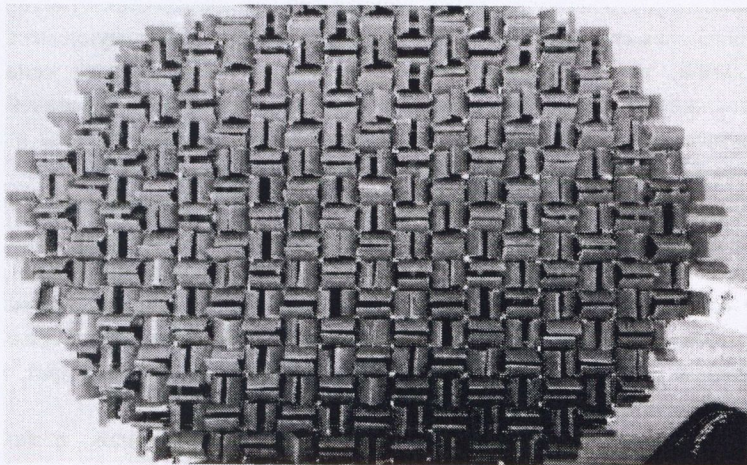


Рис. 1. Пакетная вихревая насадка

Fig. 1. Batch vortex nozzle

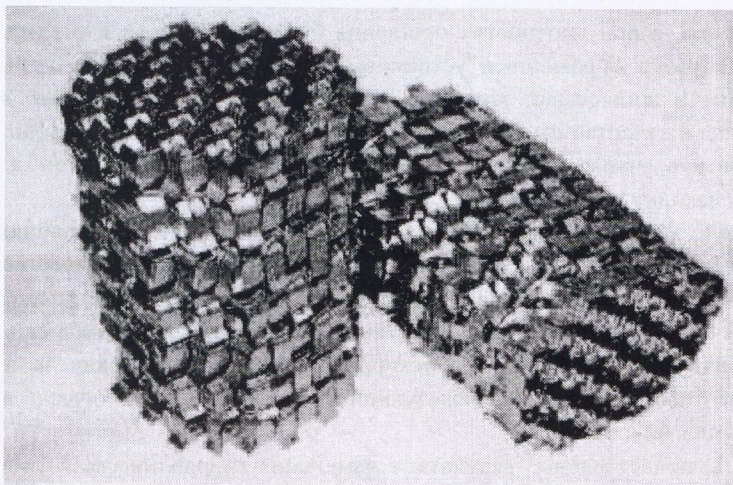


Рис. 2. Пакетная вихревая насадка в блоке

Fig. 2. Batch vortex nozzle in the block



При скоростях пара или газа более 2 или 2,5 м/с (в зависимости от вязкости жидкой фазы) в каждой ячейке насадки образуется эмульсионный режим взаимодействия между фазами (жидкой и паровой), интенсивность которого возрастает при увеличении скоростей пара или газа вплоть до 6 м/с.

В исследованной нами насадке вихревые вход и выход из ячейки повернут один относительно другого на  $90^\circ$ . Такая конструкция каждой ячейки (которую сложно показать даже схематически) заставляет вращаться газожидкостную смесь как вокруг горизонтальной, так и вертикальной осей, что резко повышает сепарационную способность капель абсорбента в данной насадке и позволяет с высокой эффективностью осуществлять процесс абсорбции при больших скоростях газа и плотностях орошения до  $120 \text{ м}^3/\text{м}^2\text{ч}$ .

При скоростях пара или газа больших  $2 \div 2,5$  м/с их кинетической энергии уже достаточно для образования большого количества капель, которые попадая в парогазовый поток также совершают сложное вращательное движение и хорошо сепарируются на стенках каждой ячейки. Количество капель возрастает и их дисперсный спектр расширяется при увеличении скорости сплошной среды (пара или газа), благодаря чему резко повышаются как поверхность контакта фаз, так и коэффициенты тепло- и массопереноса.

ПВН принципиально отличается от всех известных насадок, в том числе от насадок фирмы «Зульцер», тем, что она работает не в пленочном режиме течения жидкой фазы, а в резко выраженном вихревом режиме течения газовой и жидкой фаз при высоких скоростях газовой фазы.

Визуальное наблюдения за гидродинамикой газожидкостного потока в ячейках насадки показало, что при плотностях орошения  $20 \div 40 \text{ м}^3/\text{м}^2\text{ч}$  и значении F-фактора от 3,5 и до 6,8, а при плотностях орошения  $60 \div 100 \text{ м}^3/\text{м}^2\text{ч}$  и F-факторе от 3 до 6 наблюдается резко выраженный устойчивый эмульсионный режим взаимодействия между газом и жидкостью, который в начале 70х годов проф.Н.М Жаворонков зафиксировал в качестве открытия, наблюдаемый им в аппарате с обычной насадкой колец Рашига в узком диапазоне скоростей газа в режим, близком к зависанию орошаемой насадку жидкости.

В нашей насадке эмульсионный режим взаимодействия наблюдался при существенно большей скорости газа более 2,5 м/с и устойчиво существовал вплоть до 6 м/с, при которой жидкая фаза сверху слоя насадки начинала диспергироваться в виде мельчайших капель, уносящихся вместе с газовым потоком в сепарационной части аппарата. До скорости газа 6 м/с образование мелких капель сверху слоя насадки не наблюдалось, а образующиеся капли внутри ячеек эффективно сепарировались на их стенках.

В табл. 1. представлены результаты изменения гидравлического сопротивления в зависимости как от F-фактора, так и от различных видов насадок при плотности орошения  $20 \text{ м}^3/\text{м}^2\text{ч}$ .

**Изменение гидравлического сопротивления в зависимости от F-фактора для различных видов насадок при плотности орошения  $\Pi = 20$  м<sup>3</sup>/м<sup>2</sup>ч.**

F-фактор	Сопротивление насадок, Па/м							
	Исследуемых насадок				Из литературы			
ПВН	Кольца Рашига	ПСО Н	Mellapak 250.Y	Flexipac 2	Pyrapak G	Gempak 2A	Vakupak	
0,7	-	2448	-	-	45	50	40	-
1,5	-	3182	-	-	90	90	100	50
2	12	-	-	80	140	150	155	80
2,41	25	-	822	160	195	190	190	100
2,63	30	-	1028	250	220	225	205	115
3	60	-	1351	700	300	290	245	150
4	420	-	2437	2800	-	-	-	450
5	456	-	-	-	-	-	-	-
6	480	-	-	-	-	-	-	-

### Литература

1. Александров И. А.: *Ректификационные и абсорбционные аппараты. Методы расчета и основы конструирования*, Химия, 1978.
2. Тимонин А. С., Балдин Б. Г., Борщев В. Я.: *Машины и аппараты химических производств*, Учебное пособие для вузов, Калуга, 2008.
3. Вихман Г. Л., Круглов С. А.: *Основы конструирования аппаратов и машин нефтеперерабатывающих заводов*, Госполитехиздат, 1962.
4. Айнштейн В. Г., Захаров М. К., Носов Г. А.: *Общий курс процессов и аппаратов химической технологии*, Химия, 2000.
5. Скобло А. И., Трегубова И. А., Молоканов Ю. К.: *Процессы и аппараты нефтеперерабатывающей и нефтехимической промышленности*, Химия, 1982.
6. Кафаров В. В.: *Основы массопередачи*, Высшая школа, 1972.
7. Плановский А. Н., Николаев П. И.: *Процессы и аппараты химической и нефтехимической технологии*, Химия, 1972.
8. Блиничев В. Н., Чагин О. В., Кравчик Я., Кутепов А. М.: *Пакетная вихревая насадка для тепло- и массообменных аппаратов*, Патент РФ № 2205063, 1993.



9. Блиничев В. Н., Чагин О. В., Кутепов А. М.: *Вихревая насадка из неметаллических материалов*, Патент РФ № 200130536/20, 1993.
10. Кадыров Р. Ф., Блиничев В. Н., Чагин О. В., Кадыров Р. Р.: *Пакетная вихревая насадка для тепло- и массообменных колонных аппаратов*, Патент РФ № 2416461, 2011.
11. Кадыров Р. Ф., Блиничев В. Н., Чагин О. В., Кадыров Р. Р.: *Пакетная вихревая насадка для тепло- и массообменных колонных аппаратов*, Патент РФ № WO2011/102749 A1, 2011.