

## Методы интенсификации процесса тепло- и массообмена в колонных аппаратах с контактными устройствами

к.т.н. Пушнов А.С., к.т.н. Соколов А.С., Бутрин М.М.

МГМУ (МАМИ)

pushnovas@gmail.com

**Аннотация.** Представлена классификация методов интенсификации процессов тепло- и массообмена. Рассмотрены преимущества и недостатки насадочных и тарельчатых контактных устройств. Представлен метод анализа влияния формы и конструкции насадки на процесс тепломассообмена. Описано влияние различных параметров на выбор конструкции насадки. Рассмотрены наиболее распространенные в промышленности типы насыпных и регулярных насадок. Предлагается альтернативный способ интенсификации процессов тепло- и массообмена.

**Ключевые слова:** контактное устройство, тепломассообмен, колонные аппараты, интенсификация, число испарения.

В химической промышленности для проведения процессов тепло- и массообмена требуются колоссальные материальные и энергетические затраты. Для осуществления этих процессов в химической технологии обычно используются аппараты с контактными устройствами. Поэтому проблема интенсификации тепло- и массообмена в таких аппаратах является актуальной.

Методы интенсификации процессов тепло- и массообмена в контактных аппаратах можно классифицировать следующим образом (см. рисунок 1) [1, 2, 3].



**Рисунок 1. Методы интенсификации тепло- и массообмена**

Эффективность осуществления тепло- и массообменных процессов определяется совершенством используемого контактного устройства. В настоящее время наибольшее распространение получили аппараты с насадочными и тарельчатыми контактными устройствами. Тип контактного устройства оказывает наибольшее влияние на гидродинамику, процессы тепло- и массообмена и габариты аппарата. От конструкции контактного устройства в значительной степени зависят материальные и энергетические затраты. Насадочные колонны, по сравнению с тарельчатыми, имеют более низкое гидравлическое сопротивление в расчете на высоту единицы переноса. Это объясняется тем, что тарелки работают в затопленном режиме, и газ, проходящий через колонну, преодолевает сопротивление, равное суммарному

давлению столбов жидкости на всех тарелках. В отличие от тарельчатых колонн, насадочные могут работать при более высоких нагрузках по газу и жидкости [1, 4]. В тарельчатых колоннах скорость газа ограничена повышением межтарельчатого уноса жидкости, который при больших скоростях газового потока значительно снижает эффективность разделения. Поэтому дальнейшее развитие оптимальных конструкций контактных аппаратов насадочного типа является более перспективным и актуальным [5].

Наибольшее влияние на процессы тепло- и массообмена в насадочных колоннах оказывают структура слоя насадки, её активная поверхность и гидродинамика взаимодействующих потоков [3, 6]. В этой связи актуален анализ влияния конструктивных особенностей элементов насадки и параметров потоков на интенсивность осуществляемых в аппарате процессов.

Для оценки влияния формы и конструкции насадки на процесс тепломассообмена могут быть использованы следующие этапы анализа:

1. Оценка гидродинамической обстановки в масштабах единичного элемента насадки.

1.1. Изучение сухой насадки.

1.1.1. Визуализация аэродинамической обстановки на поверхности насадки с использованием средств компьютерного моделирования, масло-сажевой визуализация и др.

1.1.2. Оценка гидравлического сопротивления (лобового сопротивления).

1.1.3. Оценка поля скоростей и степени турбулентности газового потока в следе за элементом сухой насадки.

1.2. Изучение орошаемой насадки.

1.2.1. Оценка равномерности распределения пленки на поверхности насадки.

2. Оценка гидродинамической обстановки в масштабах слоя насадки.

2.1. Сухая насадка.

2.2. Орошаемая насадка.

3. Оценка эффективности процессов тепло- и массообмена.

При конструировании насадки следует учитывать, в какой фазе сосредоточено основное сопротивление тепло- и массопередачи. В случае если сопротивление сосредоточено в паровой (газовой) фазе, то целесообразней интенсифицировать турбулизацию со стороны паровой (газовой) фазы. Если превалирует сопротивление жидкой фазы, тогда необходимы конструктивные приемы, обеспечивающие турбулизацию течения жидкости. Например, шероховатость поверхности элементов насадки в 1,4 раза повышает охлаждающую способность градирни при осуществлении процесса испарительного охлаждения оборотной воды [4]. Наличие отверстий, выступов, открытых каналов и прочих турбулизирующих элементов на поверхности элементов насадки также приводит к интенсификации процессов тепло- и массообмена [7].

При выборе насадки необходимо учитывать, что с повышением скорости газа возрастает коэффициент массопередачи и уменьшается необходимый объём насадки. Однако повышение скорости газа приводит к росту гидравлического сопротивления и, следовательно, затрат на электроэнергию, поэтому необходимо найти такую скорость газа, при которой суммарные затраты на оборудование и электроэнергию будут минимальными. При выборе той или иной насадки они могут различаться либо одним из показателей (перепад давления и эффективность), либо обоими показателями сразу. Может получиться так, что насадка, имеющая большое сопротивление, одновременно обеспечивает настолько высокую эффективность процесса, что в конечном счете ее применение будет экономически оправдано.

Рассмотрим для примера процесс испарительного охлаждения оборотной воды в градирне. Интегральной характеристикой тепломассообмена в объеме насадки является число испарения  $K_{исп}$  [8]:

$$K_{исп} = (\beta_x \cdot H) G_{ж} , \quad (1)$$

где  $\beta_x$  – коэффициент массоотдачи,  $H$  – высота слоя насадки,  $G_{ж}$  – удельный расход жидкости.

Многочисленными испытаниями [8] установлена следующая степенная зависимость величины числа испарения  $K_{\text{исп}}$  от относительного расхода воздуха  $\lambda$ :

$$K_{\text{исп}} = A_p \cdot \lambda^m, \quad (2)$$

где  $A_p$  и  $m$  – опытные коэффициенты, определяемые по результатам испытаний соответствующей конструкции насадки. Зависимость  $A_p=f(\xi)$  имеет вид [9]:

$$A_p = B \cdot (\xi)^k, \quad (3)$$

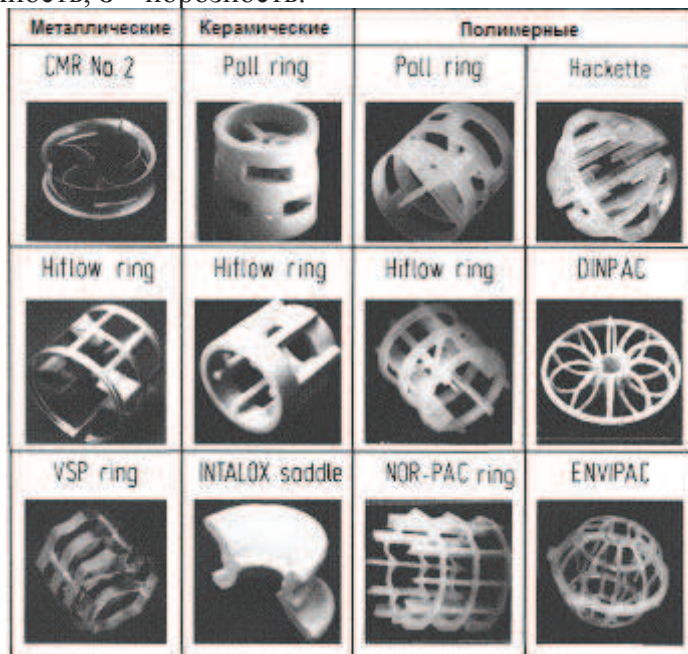
где  $B$  и  $k$  – эмпирические коэффициенты, характеризующие эффективность насадки,  $\xi$  – гидравлическое сопротивление, отнесенное к одному погонному метру. Здесь  $B=0,456$ ,  $k=0,288$ .

Уравнение (3) описывает результаты испытаний регулярных насадок плёночного, капельного и струйного типа. При увеличении  $\xi$  от 4 до 45 коэффициент  $A_p$  увеличивается от 0,5 до 1,4.

Наиболее распространенными типами насыпных насадок являются кольцевые, седлообразные и шаровые (см. рисунок 2). Основным направлением развития интенсификации тепло- и массообмена в этих насадках является конструктивное увеличение их удельной поверхности и модификация поверхности насадки различными турбулизирующими элементами. Понижение гидравлического сопротивления достигается увеличением размеров элементов насадки и соответствующим увеличением доли свободного объема (порозности) слоя насадки [10-11]. Сравнительные характеристики нерегулярных насадок содержатся в работах [2-5, 12, 13]. Геометрические характеристики показанных на рисунке 2 насадок представлены в табл.1. Величина эквивалентного диаметра  $d_e$  рассчитывалась нами по данным [14] по формуле [3]:

$$d_e = 4\varepsilon/a, \quad (4)$$

где  $a$  – удельная поверхность,  $\varepsilon$  – порозность.



**Рисунок 2. Наиболее распространенные в промышленности насыпные насадки, номинальный размер 50 мм**

Параметры насыпных насадок, изображенных на рисунке 2

Наименование насадки/ материал	Количество насадок на единицу объема (1/м <sup>3</sup> )	Удельная поверхность (м <sup>2</sup> /м <sup>3</sup> )	Порозность (м <sup>3</sup> /м <sup>3</sup> )	Эквивалентный диаметр канала (м <sup>3</sup> /м <sup>2</sup> )
CMR No2/ металл	32950	150	0,95	0,025
Hiflow ring/ металл	5000	97,3	0,973	0,04
VSP ring/ металл	7800	104	0,98	0,038
Poll ring/ керамика	6400	120	0,78	0,026
Hiflow ring/ керамика	4950	86,7	0,815	0,038
INTALOX saddle/ керамика	9300	120	0,77	0,026
Poll ring/ пластик	6700	110	0,92	0,033
Hiflow ring/ пластик	6400	112	0,93	0,033
NOR-PAC ring/ пластик	7300	90	0,952	0,042
Hackette/ пластик	12400	135	0,93	0,028
DINP AC/ пластик	29000	135	0,92	0,027
ENVIPAC / пластик	6800	98	0,961	0,039

Наиболее распространенными в промышленности насадками регулярного типа являются гофрированные листовые насадки (см. рисунок 3, таблицу 2). Конструкции насадок этого типа позволяют увеличить процессы тепло- и массоотдачи путём создания на поверхности листов различных турбулизирующих элементов. Определенное расположение соседних листовых элементов насадки друг относительно друга позволяет не только интенсифицировать процессы теплообмена, но и минимизировать гидравлические потери.

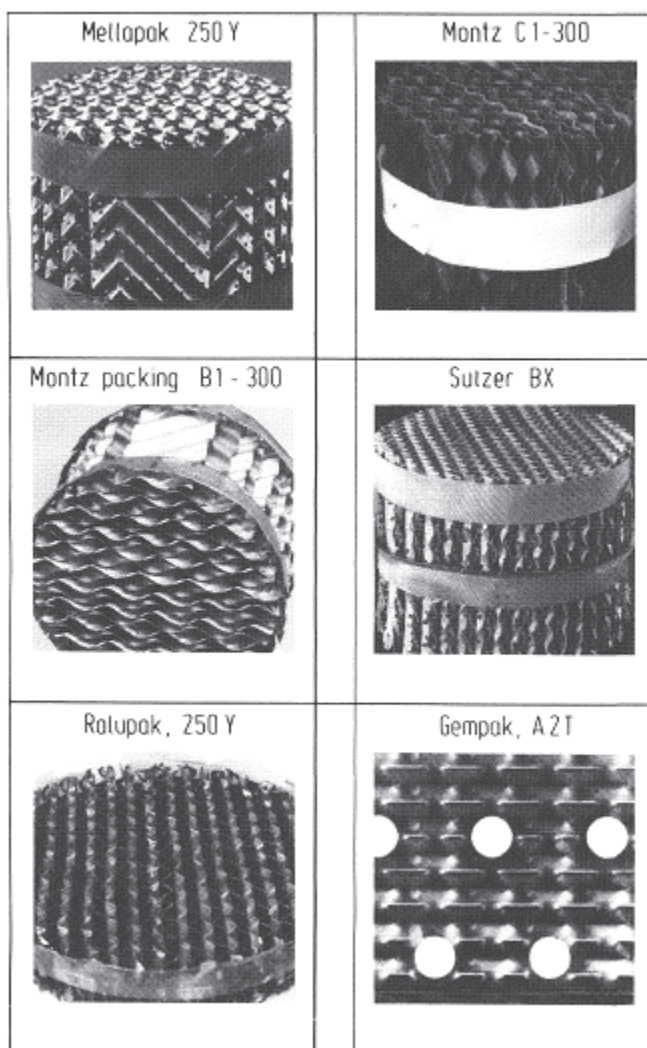


Рисунок 3. Регулярные металлические насадки

Таблица 2

Параметры регулярных насадок изображенных на рисунке 3

Наименование насадки	Удельная поверхность ( $\text{м}^2/\text{м}^3$ )	Порозность ( $\text{м}^3/\text{м}^3$ )
Mellapak 250 Y	250	0,96
Montz packing B1-300	300	0,93
Rolupak, 250 Y	250	0,963
Montz C1-300	300	0,90
Sutzer BX	500	0,90
Gempak, A 21	202	0,973

Все описанные выше конструкции насадок являются стационарными. Возможно, придание элементам насадки вращательного движения способно обеспечить высокую турбулизацию взаимодействующих фаз, разрыв пленки жидкости и тем самым дополнительно интенсифицировать тепло- и массообменные процессы в колонных аппаратах. При этом соседние элементы насадки непосредственно не соприкасаются друг с другом, в отличие от псевдооживленных насадок, в результате уменьшается износ поверхности насадки и аппарата. Разработкой данного направления интенсификации тепломассообмена занимается группа исследователей в Университете машиностроения.

### Литература

1. Рамм В.М. Абсорбция газов. Изд. 2-е, переработ. и доп. - М.: «Химия», 1976. –656с.
2. Каган А.М., Пушнов А.С. Сравнительные характеристики промышленных насадок для процессов тепло- и массообмена // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2008. № 4. – С. 5 – 7.
3. Пушнов А.С., Каган А.М. Структура и гидродинамика колонных аппаратов с насадкой. Введение в химический инжиниринг. СПб.: Изд. Политехнического университета, 2011.- 135 с.
4. Соколов А.С. Влияние типа керамической кольцевой насадки на процесс абсорбции газов. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. -М.: 2009. -119 с.
5. Вальдберг А.Ю., Полиенова Е.В., Пушнов А.С. Очистка и охлаждение газов в насадочных скрубберах. М.: МГУИЭ, 2011, -144 с.
6. Каган А.М., Юдина Л.А., Пушнов А.С. Активная поверхность элементов нерегулярных тепло-массообменных насадок // Теоретические основы химической технологии, 2012, т. 46, № 2 , с. 199-206.
7. Каган А.М., Пушнов А.С., Шилин М.М.. Влияние площади перфорации нерегулярных тепло-массообменных насадок на их массообменные и гидродинамические характеристики// Энергосбережение и водоподготовка, 2012, №2(76), с. 64-66.
8. Пономаренко В.С., Арефьев Ю.И. Градирни промышленных и энергетических предприятий: Справочное пособие/Под общ. ред. Пономаренко В.С. -М.: Энергоатомиздат, 1998, - 376 с.
9. Пушнов А.С., Лозовая Н.П. Гидравлическое сопротивление регулярных насадок и эффективность процессов испарительного охлаждения в градирнях// Энергосбережение и водоподготовка, 2011, №3 , с. 36-37.
10. Каган А.М., Пушнов А.С., Юдина Л.А. К вопросу о связи гидравлического сопротивления нерегулярных тепло-массообменных насадок с их эффективностью// Химическая промышленность, 2011, Т. 88, №2, с. 75-81.
11. Пушнов А.С., Петрашова Е.Н., Лагуткин М.Г. Влияние гидравлического сопротивления и геометрических параметров насыпных насадок на эффективность осуществления процессов тепло-массообмена// Химическая промышленность сегодня, 2012, №4, с. 29-32.
12. Сокол Б.А., Чернышев А.К., Баранов Д.А., Беренгартен М.Г., Левин Б.В. Насадки массообменных колонн. -М.: ЗАО «ИНФОРХИМ», 2009, -358 с..
13. Каган А.М., Чиж К.В., Тимонин А.С., Пушнов А.С. Сравнительные характеристики нерегулярных металлических насадок// Химическая промышленность, 2012, Т. 89, №1, с. 39-47.
14. Billet R. Packed towers: in processing and environmental technology Publisher: Wiley-VCH; 1 edition (February 22, 1995) Pages: 383.

**Применение современных технологий сбора и анализа данных для интегрированного контроля и анализа технологических и экономических параметров производства**

асп. Васильев А.А., к.т.н. Парамонов Е.А., к.т.н. доц. Зубов Д.В.  
Университет машиностроения  
zubov@msuie.ru.

*Аннотация.* В статье рассматриваются преимущества записи промышленной технологической информации напрямую в СУБД, что решает как ряд технических проблем, так и некоторые проблемы экономического анализа.