

НЕРЕГУЛЯРНЫЕ НАСАДКИ КОЛОННЫХ АППАРАТОВ: НАУЧНО-АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР

Л.М. Титова, Ю.А. Максименко, О.В. Лоцманова, Э.Р. Теличкина
ФГБОУ ВО «Астраханский государственный технический университет», г. Астрахань

Используемые в настоящее время установки химической промышленности имеют значительные резервы как в направлении повышения эффективности, производительности, так и в снижении энергопотребления. Одним из перспективных направлений развития конструирования колонных аппаратов является применение высокоэффективных контактных устройств. Для оценки возможной экономической эффективности новой конструкции насадки необходимо учитывать как изменение эффективности процесса, так и перепад давления в слое. Анализ существующих данных о работе аппаратов с насадочными телами различных конфигураций был проведен с учетом обоих показателей. Обобщены и систематизированы разработки последних лет конструкций контактных устройств нерегулярного типа. Проанализированы варианты геометрии насадок, материалов, из которых могут быть изготовлены для различных отраслей химической промышленности. Выявлены тенденции развития, обозначены проблемы, возникающие на этом пути. Показано, что развитие конструкций идет в сторону усложнения геометрии насадок с целью более равномерного распределения жидкой фазы в объеме аппарата и увеличения эффективности массопереноса за счет продолжительного контакта стекающей по поверхности насадки жидкости и газа, многократности обновления поверхности контакта в широком диапазоне нагрузок. Это направление реализуется за счет увеличения доли свободного объема контактного элемента (97 – 99%). При этом режим работы всех известных нерегулярных насадок – пленочный, что теоретически обосновано, но не должно ограничивать инженера-конструктора. Второе направление – внедрение новых конструкционных материалов, обеспечивающих повышенные адгезионные свойства поверхности насадки. В настоящее время задача поиска таких новых конструктивных решений остается актуальной, т.к. используемые термопласты имеют недостатки.

Ключевые слова: Нерегулярная насадка, гидравлическое сопротивление, эффективная площадь, эффективность разделения.

ВВЕДЕНИЕ

Химическая промышленность сегодня испытывает трудности, обусловленные конъюнктурой рынка. Это усиливающаяся конкуренция в условиях мировой глобализации, вызывающей сокращение времени конкурентноспособного существования продукции на рынке, постоянное расширение ассортимента продукции [1] и нестабильность рынков в виду напряженной политической обстановки в мире [2 – 4]. На данном этапе отрасль химического машиностроения продолжает по инерции двигаться за счет эффекта масштаба и новые перерабатывающие заводы строятся крупнотоннажными и оптимизированными [5, 6]. Хотя обозначенные проблемы заставляют задумываться инженеров - конструкторов над поиском других вариантов.

Действующие заводы химической, нефтехимической и других отраслей промышленности вынуждены искать пути снижения энергоемкости процессов. Используемые в настоящее время промышленные установки имеют значительные резервы как в направлении повышения эффективности [7], производительности, так и в снижении энергопотребления.

Одним из перспективных направлений развития конструирования аппаратов химической промышленности является применение высокоэффективных контактных устройств,

позволяющих интенсифицировать протекающие процессы, уменьшить гидравлическое сопротивление аппарата и энергозатраты на единицу выпускаемой продукции.

Для решения этих вопросов в тепломассообменных процессах достаточно давно и успешно применяются контактные устройства типа насадок. Насадочные колонны компактны, имеют большой диапазон устойчивой работы, малую задержку жидкости, просты в обслуживании, но работают эффективно только при малых скоростях пара (менее 1,5 м/с) и низких плотностях орошения (менее 10 – 15 м³/м²·ч) [8], т.е. в пленочном режиме.

В данной работе проведен критический обзор разработок и реализации различных конструкций контактных устройств насадочного типа, проведен анализ известных данных об эффективности, гидравлическом сопротивлении при внедрении в производство и их сопоставление. Работа проводилась с целью выявления дальнейших ориентиров и перспектив развития химического машиностроения в области насадочных контактных устройств колонных аппаратов тепло – и массообмена.

ОБОСНОВАНИЕ АНАЛИЗИРУЕМЫХ ДАННЫХ

Взаимодействующие фазы в массообменных аппаратах могут находиться в различных агрегатных состояниях и иметь определенный характер

движения. В химической промышленности чаще используют противоточные колонные аппараты с системой жидкость – газ (пар). Производительность такого аппарата при атмосферном давлении зависит прямо пропорционально от скорости движения газовой фазы. Увеличение скорости приводит к возрастанию площади контакта фаз, что интенсифицирует процесс и уменьшает высоту колонны (необходимый объем насадки). С другой стороны, возрастает гидравлическое сопротивление аппарата движению газовой фазы и растет расход энергии на проведение процесса. Таким образом, чтобы говорить о возможной экономической эффективности данной конструкции насадки, необходимо учитывать как изменение эффективности процесса, так и перепад давления в слое. Анализ существующих данных о работе аппаратов с насадочными телами различных конфигураций будем проводить с учетом обоих указанных показателей.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Насадочные контактные устройства конструктивно разделяют на нерегулярные – насыпные насадки (Random Packing), слой которых сформирован случайным образом и не представляет собой упорядоченной структуры, и регулярные насадки (Structured Packing). Ряд теоретических и экспериментальных исследований подтверждают, что гидродинамические и массообменные характеристики регулярных и нерегулярных насадок сильно отличаются друг от друга [9]. Нерегулярная насадка исторически рекомендуется к использованию при работе с высоким давлением, т.к. обеспечивает более низкий перепад давления при высокой эффективности [10], а также активно используется для сильнозагрязненных и коррозионно-активных сред, т.к. легко подвергается замене. Например, произвольная засыпка насадки используется для удаления углекислого газа и сероводорода из природного газа при абсорбции пенообразующими растворителями (ДЭА, МДЭА, МЭА) также по причине более низкого гидравлического сопротивления слоя, для того чтобы обеспечить снижение капитальных и эксплуатационных затрат при повышенном гидравлическом воздействии пены. Процесс дегидратации при низкотемпературной ректификации газов пиролиза – ответственный и наиболее энергоемкий из-за высокого расхода энергии на производство низкотемпературного холода и значительного давления в колонне (3 – 3,5 МПа). Низкое поверхностное натяжение жидкости и небольшое различие в плотностях фаз при таких условиях работы требует обеспечение хорошего контакта между жидкой и газовой фазой, потому здесь предпочтительней нерегулярная насадка [11]. По данным [12] в колоннах малого диаметра в связи с относительно большим количеством изгибов потока

газа перепад давления увеличивается для регулярных насадок. В соответствии с исследованиями [13] обратный эффект наблюдается при использовании нерегулярной насадки.

Большинство используемых в промышленности насадок – нерегулярные. Конфигурация и материалы, из которых они изготавливаются, претерпевают значительные изменения по мере развития технологии химического машиностроения и отраслей химико-перерабатывающей промышленности (рис. 1). Теоретическую основу этому развитию давали теория процессов теплопереноса и гидродинамика.

Известно, что нестационарный массоперенос удовлетворительно описывается моделями обновления поверхности (модель Хигби и ее развитие в моделях Данквертса и Кишиневского). Согласно им, скорость массопереноса характеризуется средним временем пребывания Θ небольших объемов жидкости на поверхности раздела фаз, которые двигаются к поверхности раздела с газовой фазой и возвращаются в жидкость за счет турбулентного движения самой жидкой фазы. При этом теоретически доказано, что скорость массопереноса обратно пропорциональна корню из значения Θ . Теоретические положения моделей обновления подтверждены в аппаратах со значительной турбулизацией потока. Для насадочных колонн за величину Θ принимают время, в течение которого жидкость проходит путь, равный размеру одного элемента насадки [14].

Таким образом, чем меньше элемент, по которому спокойно движется пленка жидкости, тем выше будет скорость массопереноса. Это теоретически обоснованное утверждение, к тому же подтвержденное рядом исследователей [15], определяет одно из направлений в развитии конструкций насадочных элементов колонн – стремление к уменьшению длины элемента, по которому стекает пленка жидкости, при сохранении эффективной площади контакта фаз (например, за счет перфораций стенок насадки, выполнения ее из пластин небольшой ширины и др.)

При этом не всегда усложнение конструкции насадки обеспечивает увеличение эффективной площади контакта фаз и в литературе присутствуют весьма противоречивые данные для разных типов насадок, что обусловлено, в первую очередь, различиями в методиках экспериментального определения этой характеристики. В [16] проведена сравнительная характеристика методов измерения эффективной площади (Ван Кревелена, Шульмана и метода Данквертса с использованием химической реакции псевдопервого порядка). Показано, что для неупорядоченных слоев элементов насадки, работающей в условиях пленочного стекания жидкости с возможным образованием крупных капель и струй, подходит метод Шульмана и Данквертса, но

последний менее трудозатратен и получаемый при этом коэффициент массообмена не зависит от гидродинамики газовой и жидкой фаз. Исследователи используют разные варианты химических реакций в методе Данквертса.

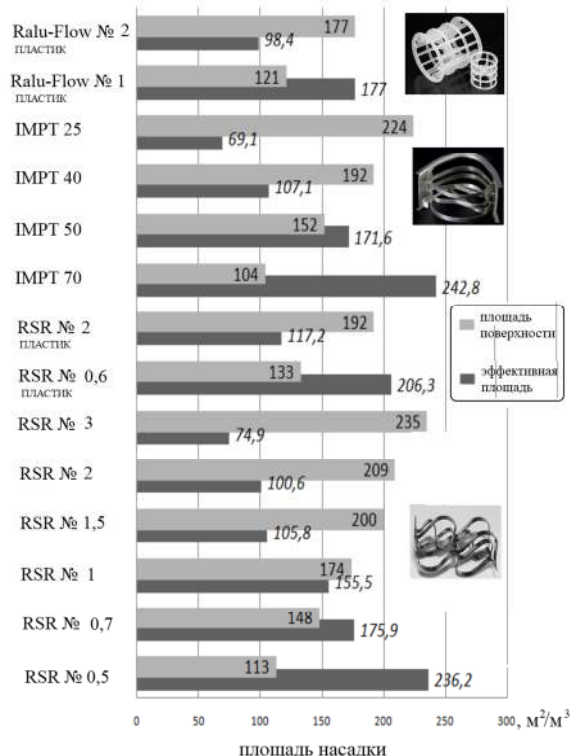


Рис. 2. Сравнение площади поверхности различных насадок и их эффективной площади (по данным [17], эффективная площадь определена в процессе абсорбции CO₂ из воздуха водным раствором NaOH при расходе жидкой фазы 80 м³/м²·ч)

В работе [17] представлены результаты исследований эффективной площади трех типов насадок при сопоставимых значениях удельной площади и скоростей фаз в колонне методом Данквертса при абсорбции CO₂ из воздуха водным раствором гидроксида натрия. Было обнаружено при этом, что насадку желательно выполнять в виде узких изогнутых полос (ламелей) без прерывания (насадка называется супер кольца Рашига Raschig Super Ring, RSR, Raschig GmbH, Germany) [18], т.к. такая форма обеспечивает хорошую смачиваемость с обеих сторон жидкостью. Наличие в конструкции насадки концевых, выступающих пластин, отогнутых перпендикулярно основной оси насадки (насадка IMPT, Raschig GmbH, Germany на рис. 2, конструкция которой аналогична I-RingTM, Sulzer Management Ltd, Швейцария на рис. 1), усложняет конструкцию, увеличивает удельную площадь и гидродинамическое сопротивление, но эффективная площадь при этом не возрастает (при одинаковой удельной поверхности эффективная площадь меньше на 15%, чем у супер колец Рашига RSR). Моделирование гидродинамических процессов в насадках при

проливе водой показало [19], что отогнутые пластины плохо смачиваются и в процессе массообмена участвуют неэффективно. Равномерное смачивание жидкостью с повторяющимися точками соединения металлических полос, изогнутых по синусоиде, способствует турбулизации пленки жидкости в зонах пересечения, и это является еще одной причиной увеличения эффективности массопереноса супер колец Рашига. Эффективность супер колец Рашига подтверждена экспериментально не только для процессов ректификации, абсорбции и десорбции [9] (рис.3), но в процессах жидкостной экстракции [20]. В качестве сравнительного исследования были использованы кольца Палля Pall-Ring и было доказано экспериментально, что супер кольца Рашига выдерживают более высокие нагрузки по сравнению с кольцами Палля (рис. 3) и, следовательно, имеют более высокую площадь поверхности массопереноса при условии одинакового размера капель. Кроме того, исследования массопередачи, проведенные с использованием тест-системы толуол / ацетон / вода, показывают, что высота единиц переноса (сокр. рус. ВЕП, англ. NTU) для супер кольца Рашига выше, чем для сопоставимого кольца Палля. Разница ВЕП для слоев с этими насадками составляет в среднем около 24 см. Косвенно и более приблизительно на основании опытных данных эффективность массопередачи можно оценить также значением ВЭТС (англ. NETP) – высотой, эквивалентной теоретической ступени. Из рис. 4 видно, что для насадки супер кольца Рашига ВЭТС уменьшается с увеличением нагрузки; однако после прохождения минимального значения эта тенденция не так ярко выражена.

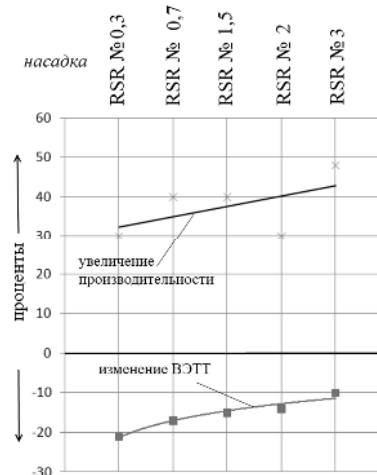


Рис. 3. Сравнение показателей работы (производительности и снижение ВЭТС, % при одинаковом давлении) металлических супер колец Рашига и колец Палля (система аммиак – воздух – вода, 1 бар) [9]

Нерегулярная насадка супер кольца Рашига применяется, начиная с 2000-х гг., и в промышленном масштабе в процессах экстракции бутадиена с

использованием растворителя N-метилпирролидона (технология BASF, разработана фирмой Lurgi Oel-Gas - Chemie), в абсорбционных колоннах Бенфилда для поглощения CO_2 в установке получения этиленоксида (EC-Dormagen, Германия), в установках абсорбции формальдегида (BASF в Людвигсхафене, Германия) [9]. Хорошие результаты показывает использование такой насадки в процессах, сопровождающихся реакциями полимеризации, вызывающими образования трудноудаляемых отложений на поверхности насадки (например, параформальдегид в технологии формальдегида, толуол-ди-изоциан). За счет образования непрерывной пленки жидкости обеспечивается непрерывная очистка поверхности насадки, а незначительная задержка жидкости по сравнению с другими геометриями нерегулярных насадок гарантирует отсутствие застойных зон жидкости. Кроме того, уменьшенное образование капель в геометрии супер кольца Рашига подавляет испарение.

Аналогичную супер кольцам Рашига конструкцию имеют нерегулярные насадки VFF – TWIN – PAK, Vereinigte Füllkörper – Fabriken, GMBH & CO, KG [21]. Их геометрия соответствует теоретическим выводам, вытекающим из моделей массопереноса обновления поверхности

Указанные положения послужили основой для разработки насадок, работающих при экстремально низких нагрузках по жидкости (например, при равновесном поглощении хорошо растворимого газа с низкой начальной концентрацией) без рециркуляции жидкого поглотителя. Препятствием для конструирования насадки из отдельных горизонтальных полос является, конечно, сложность и дороговизна. При изготовлении такой насадки для исключения указанных недостатков возможно использование технологии листовой штамповки из спеченного ПВХ [22].

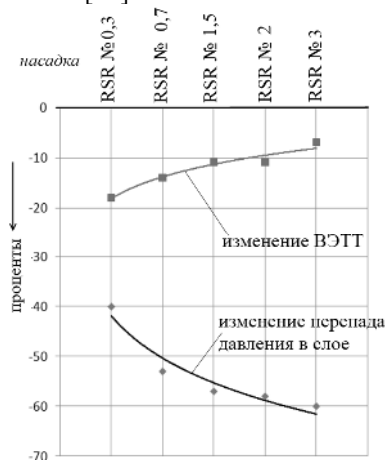


Рис. 4. Сравнение показателей работы (перепада давления и ВЭТТ, % при одинаковой производительности по жидкой фазе) металлических супер колец Рашига и колец Палля (система аммиак – воздух – вода, $80 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{час})$) [9]

Использование пластика вместо металла и керамики с точки зрения изготовления и стоимости, конечно, предпочтительней, если позволяют условия работы колонны (температурный режим и давление). Наличие многочисленных видов термопластичных материалов обеспечивает конструктору широкий спектр химических и термических свойств.

Пластиковые насадки не так громоздки, как их керамические и металлические аналоги, и, следовательно, обеспечивают большую емкость и меньший перепад давления. Свойства термопластов позволяют выполнить из них контактные устройства самых разнообразных конструкций с особым рельефом поверхности (например, игольчатая форма насадки от VFF Igel, сетчатая сферическая поверхность – VFF-Netball [22]). Но с инженерной точки зрения, пластмассы – это материалы, которые постоянно деформируются при приложении силы даже при обычных температурах. Скорость, с которой пластик будет деформироваться, зависит от величины напряжения, которую слой насадки должен нести от собственного веса и от веса жидкости, температуры и времени. Сжатие на дне насыщенного слоя уменьшает долю пустот и может привести к увеличению перепада давления и захлебыванию колонны.

Пластиковые насадки используются чаще всего в процессах абсорбции CO_2 , SO_2 , HCl и HF , Cl_2 , диоксида хлора, сероводорода и меркаптана, системах газоочистки выбросов от дыма, летучих органических веществ и для дезодорации; в водоподготовке при очистке сточных вод, подготовке питьевой воды, в технологических системах охлаждения воды.

Для возможности использования пластиковых контактных элементов в высоких колоннах кольцевые насадки выполняют высотой меньше или близкой к диаметру элемента (например, CASCADEMINI-RINGS, BETARING, Компания Koch-Glitsch [24]). В слое таких насадок, загруженных в навал, значительная часть колец лежит с почти вертикальными осями, потому смачивание жидкостью и массообмен происходит как на внутренней, так и на внешней поверхности, т.е. такая геометрия обеспечивает более эффективное использование поверхности насадки. При преимущественной ориентации цилиндрической оси в вертикальном положении самое большое отверстие находится в направлении потока газа, что приводит к более низкому перепаду давления и большей емкости, а также повышает механическую прочность насыпного слоя.

Использование пластиковых насадок предпочтительно также в системах биологической очистки сточных вод, т.к. термопластик полностью стабилизирован к ультрафиолетовому излучению и химически инертен, не токсичен для микроорганизмов и невосприимчив к грибковой или

бактериологической деградации в рабочем интервале температур 0-90 °С.

Нерегулярная пластиковая насадка ЕТАРАК, Koch-Glitsch [24] широко используется в одно - или двухступенчатых высокоскоростных фильтрах, черновых фильтров первой ступени водоочистки, где существующая установка перегружена или недостаточно эффективна, установках нитрификации коммунальных стоков и в рыбоводстве.

В работе [16] проведено исследование металлических и пластиковых насадок одинакового размера и показано, что эффективная площадь пластиковой нерегулярной насадки на 15% ниже, чем для аналогичной металлической, что незначительно. Материал оказывает влияние на смачиваемость насадки жидкостью, и эффективная площадь больше в случае больших элементов насадки, потому для более мелких элементов насадки влияние смачиваемости материала жидкостью более выражено.

С кольцевыми насадками успешно конкурируют в настоящее время седловидные насадки, имеющие изогнутую поверхность в виде тора или дуги окружности. Наиболее известные из них - седла Инталокс (INTALOX Saddle) и Берля (Berl-Saddle). Седловидная насадка Берля имеет более выгнутую форму, чем седла Инталокс, и большую площадь поверхности массообмена. Основное преимущество фасонных насадок типа седел - значительная удельная поверхность без разрывов при стекании пленки жидкости, что обеспечивает более равномерное распределение жидкости и ее удержание на поверхности насадки. Такую конструкцию возможно использовать для равномерного распределения жидкой фазы по объему колонны в комбинации с насадками кольцевого типа. Но на практике во время эксплуатации наблюдается прилегание элементов насадки друг к другу, обрастание химическими отложениями (осадками, слоем полимеризованных химических соединений), что снижает ожидаемую эффективность массопередачи и увеличивает гидравлическое сопротивление. Для исключения этих эффектов конструкция седловидных насадок претерпевала изменения. Например, седловидная насадка Super INTALOX имеет зубчатые края для обеспечения большей площади поверхности контакта и фиксации элемента насадки в слое, а также для того чтобы уменьшить оседание в процессе эксплуатации. Наличие перфорации (седла Super Saddle Ring, IMTP) облегчает движение газовой фазы по слою в объеме колонны, но повышает стоимость изготовления.

Насадки в форме сферы редко применялись до последнего времени ввиду сложности изготовления из металла и материалоемкости. Но сферическая форма насадки обеспечивает более равномерное распределение жидкости даже при низкой плотности

орошения, более высокую плотность упаковки. При засыпке в колонный аппарат слоя насадки благодаря ее шарообразной форме равномерная и упорядоченная укладка происходит самопроизвольно. Отдельные пустотелые шары обладают минимальной поверхностью соприкосновения между собой и со стенками колонного аппарата, так как контакт между шарообразными телами возможен только в точке соприкосновения. Полые сферы, выполненные из полос полимерного материала (например, нерегулярная насадка Top-Pak, FVV, Germany), обладают устойчивой восприимчивостью к загрязнениям и обеспечивают свободный слив из объема колонны при ее сильно загрязненном состоянии, что обусловлено значительной долей свободного объема такой насадки - 98%. Достоинством является и низкий перепад давления в слое насадки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный критический обзор современных конструкций нерегулярных насадок показал, что каждое новое инженерное решение дает незначительное снижение гидравлического сопротивления, данные по эффективности конструкций насадок трудно сопоставимы из-за различных методик ее определения, разрозненны и противоречивы, хотя при этом можно выделить несколько линий тренда в конструировании контактных устройств колонных аппаратов химической промышленности.

Во-первых, усложнение геометрии насадок с целью более равномерного распределения жидкой фазы в объеме аппарата и увеличения эффективности массопереноса за счет продолжительного контакта стекающей по поверхности насадки жидкости и газа, многократностью обновления поверхности контакта в широком диапазоне нагрузок. При этом сложная геометрическая конфигурация должна отвечать и технологическим требованиям, таким как, низкая материалоемкость, пониженное гидравлическое сопротивление, и эксплуатационным - простота замены и чистки, возможность работы при различных плотностях орошения (здесь трудности составляют как минимальные, так и значительные величины этого показателя), а также со средами, склонными к образованию трудноудаляемых отложений на поверхности насадки.

Большинство работ в России и за рубежом направлены на создание конструкций со значительной эффективной площадью контакта фаз в широком диапазоне нагрузок при одновременном снижении гидравлического сопротивления слоя за счет увеличения доли свободного объема контактного элемента (97 - 99%). В то же время стремление увеличить пропускную способность и улучшить омываемость всей поверхности элемента путем

увеличения доли свободного объема ведет к снижению поверхности контакта фаз. При этом режим работы всех известных нерегулярных насадок – пленочный, что теоретически обосновано, но не должно ограничивать инженера - конструктора.

Во- вторых, поиск и использование новых конструкционных материалов, обеспечивающих, с одной стороны, доступность изготовления сложных пространственных форм и, с другой, равномерность распределения жидкой фазы за счет повышенных адгезионных свойств поверхности насадки. В настоящее время задача поиска таких новых конструктивных решений остается актуальной, т.к. используемые термопласты имеют недостатки (узкий диапазон рабочих температур, низкий удельный вес, малая механическая прочность и др.).

Отдельным направлением в развитии конструкций насадочных устройств является разработка конструкций регулярных насадок [23] - создание пространственно-структурированных контактных элементов, например, из металлических сеток или лент, гофрированных или рифленых пластин с размещенными на их поверхности объемными элементами различной формы для создания завихрений газового потока внутри слоя насадки. Очевидными достоинствами таких насадок являются их эксплуатационными показатели – удобство монтажа, демонтажа и ремонта. Но эти контактные устройства имеют ряд недостатков по сравнению с нерегулярными: небольшой диапазон нагрузок по жидкости надежной работы, неприменимость в условиях работы с сильно загрязненными, высоковязкими, коррозионными, агрессивными средами, недостаточные жесткость и прочность и др. В направлении решения этих проблем специалистами предпринимаются определенные шаги, но целью данного обзора не ставился анализ конструкций регулярных насадок и эти вопросы не были освещены.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Moggridge, G.D., Cussler, E.L. An introduction to chemical product design [Текст] // Institution of Chemical Engineers Trans IChemE. – 2000. – V.78. – P.5-11.
2. Muller, S., Lier, S., Grunewald, M. Development and characterization of a modular absorption column for transformable plants [Текст] // Engineering. – 2015. – V. 99. – P. 256-264.
3. Früh, K.F., Maier, U., Schaudel, D. Handbuch der Prozessautomatisierung – Prozessleittechnik für verfahrenstechnische Anlagen [Текст]. Thomas Hrsg. – 2018. – P. 1336.
4. Buchholz, S. Future manufacturing approaches in the chemical and pharmaceutical industry [Текст] // Engineering. – 2010. – V.49. – P.993-935.
5. Kent, A. Kent and Riegel's Handbook of Industrial Chemistry and Biotechnology [Текст]. – 2007. – 1875 p.
6. Grunewald, M., Lier, S. Net Present Value Analysis of Modular Chemical Production Plants [Текст] // Engineering. – 2011. – V.34. – P.809-816.
7. Титова, Л.М., Алексанян, И.Ю., Лоцманова, О.В. Термодинамический анализ и оценка эффективности действующего

реактора синтеза аммиака – Южно-Сибирский научный вестник. – 2019. – №4 (28). – С.24-29.

8. Ворошин А.В. Разделение бикомпонентной смеси в ректификационной установке непрерывного действия с пакетной вихревой насадкой : диссертация ... кандидата технических наук : 05.17.08 / Ворошин Андрей Валерьевич; [Место защиты: Иван. гос. хим.-технол. ун-т].- Иваново, 2013. – 112 с.: ил. РГБ ОД, 61 14-5/535.

9. Schuites, M. Raschig Super-Ring. A New Fourth Generation Packing Offers New Advantages [Текст] // Chemical Engineering Research and Design. – 2003. – V.81. – P.48-57.

10. Bu, S.S., Yang, J., Zhou, M., Wang, Q.W., Li, S.Y., Cuo, Z.X. On contact point modifications for forced convective heat transfer analysis in a structured packed bed of spheres [Текст] // Nuclear Engineering and Design. – 2014. – V.270. – P.21-33.

11. Официальный сайт компании Sulzer [Электронный ресурс]. – 2020. Режим доступа: <https://www.sulzer.com/>.

12. Brunazzi, E., Paglianti, A. mechanistic pressure drop model for columns containing structured packings [Текст] // AIChE Journal. – 1997. – V.43. – P 317 – 327.

13. Olujic, Z. Effect of column diameter on pressure drop of a corrugated sheet structured packing [Текст] // CHEM ENG PROCESS. – 1999. – V. 77. – P. 505 – 510.

14. Касаткин, А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии [Текст]/ Учебник для вузов. - 10-е издание. М.: ОО ТИД Альянс, 2004. – 753 с.

15. Kolev, N., Krlev, B., Razkazova-Velkova, E. Packing with stamped horizontal lamellae operating at extremely low liquid loads II. Effective surface area [Текст] // Chemical Engineering & Technology. – 2007. – V.31. – P.103-109.

16. Kolev, N., Nakov, Sv., Ljutzkanov, L., Kolev, D. Effective area of a highly efficient random packing [Текст]/ Chemical Engineering and Processing: Process Intensification. – 2006. – V.45. – P. 429-436.

17. Nakov, Sv., Kolev, N., Ljutzkanov, L., Kolev, D. Comparison of the effective packings [Текст] // Chemical Engineering and Processing. – 2007. – V.46.– P. 1385-1390.

18. Официальный сайт компании Raschig GmbH [Электронный ресурс]. – 2020. Режим доступа: <https://www.raschig.de/>.

19. Kolev, N., Razkazova-Velkova, E. Liquid phase leakage in the free volume of columns filled with vertical-wall packing [Текст]// Comptes rendus de l'Academie Bulgare des Sciences. – 1999. – 52 (9/10). – P 55-58.

20. Hlawitschka, M. W., Schmidt, S., Bart, H.-J. Rashig Super-Ring operating characteristics in unpulsed liquid – liquid extraction columns [Текст]/ Chemical Engineering and Technology. – 2015. – V.38. – P. 446-454.

21. Официальный сайт компании Vereinigte Füllkörper-Fabriken [Электронный ресурс]. – 2020. Режим доступа: <https://famaga.kz/catalog/vff>

22. Kolev, N., Razkazova-Velkova, E. A new column packing for operation at extremely low liquid loads [Текст] // Sixth Bulgarian-Hungarian Workshop Chemical Engineering. Proceedings. – 2001. – V.40. – P. 471-476.

23. Клейко, В.В. Разработка, анализ и внедрение пространственно-структурированных регулярных контактных устройств для химической и нефтегазовой промышленности : Дис. ... канд. техн. наук : 05.17.08 : Москва, 2004. – 256 с. – РГБ ОД, 61:05-5/863.

24. Официальный сайт компании Koch-Glitsch [Электронный ресурс]. – 2020. Режим доступа: <https://koch-glitsch.com/>.

Титова Любовь Михайловна – к.т.н., доцент кафедры «Технологические машины и оборудование», ФГБОУ ВО «Астраханский государственный технический университет» тел. (8512)614469, e-mail: titovalybov@mail.ru.

Максименко Юрий Александрович – д.т.н., доц., профессор кафедры «Технологические машины и оборудование», ФГБОУ ВО «Астраханский государственный технический университет» тел. (8512)614469, e-mail: amxs1@yandex.ru.

Лоцманова Ольга Васильевна – магистрант, ФГБОУ ВО «Астраханский государственный технический университет» тел. (8512)614469, e-mail: lozmanovaolga@gmail.com..

«Астраханский государственный технический университет» тел. (8512)614469, e-mail: elkearneeva@yandex.ru.

Теличкина Эльвира Рафаэльевна – к.т.н., доцент кафедры «Технологические машины и оборудование», ФГБОУ ВО

Sulzer Management Ltd

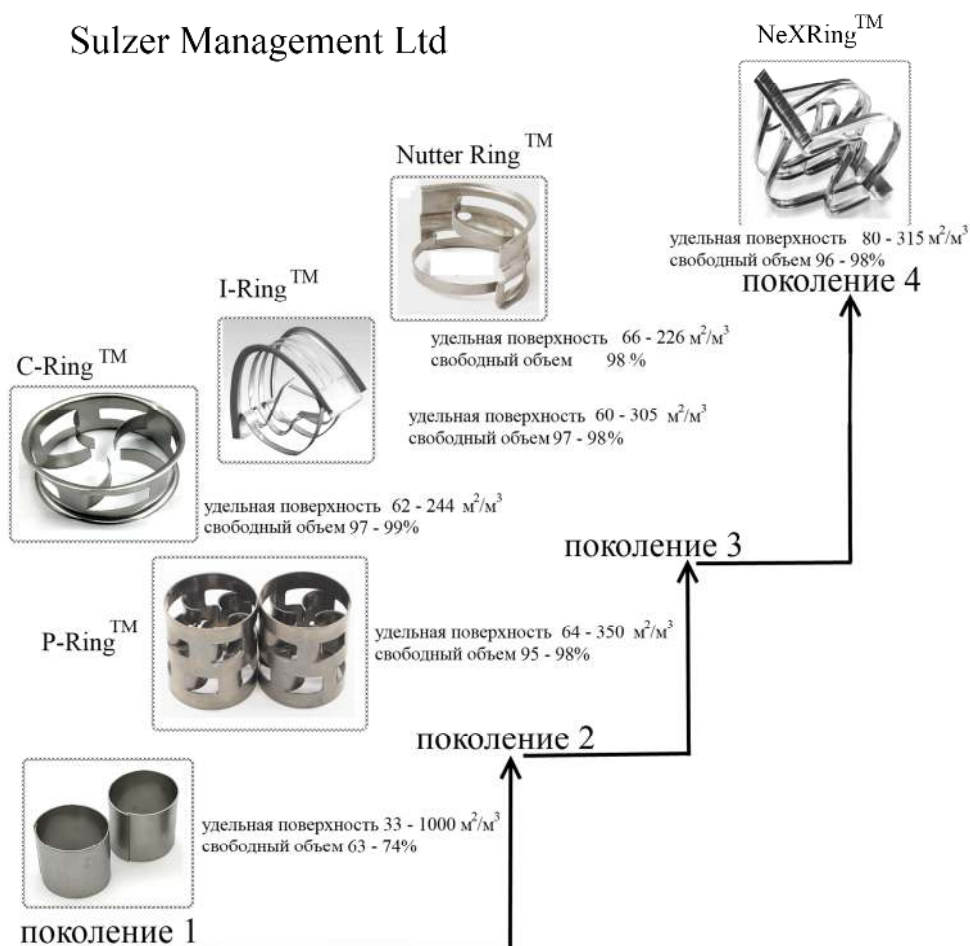


Рис. 1. Усложнение конструкции нерегулярных насыпных насадок компании Sulzer, их характеристики [11]

RANDOM PACKING OF COLUMN APPARATUS: A SCIENTIFIC AND ANALYTICAL REVIEW

L.M. Titova, Yu. A. Maksimenko, O.V. Lotsmanova, E. R. Telichkina

Federal State Educational Institution of Higher Education "Astrakhan State Technical University", Astrakhan

Abstract - Modern installations of the chemical industry have significant reserves in the direction of increasing efficiency, productivity, and reducing energy consumption. One of the promising areas of development of column apparatus design is the use of high-performance contact devices. In research to evaluate the possible cost-effectiveness of the new random packing design, it is necessary to take into account both the change in process efficiency and the pressure drop in the layer. The analysis was carried out taking into account both indicators of existing data on the operation of devices with various configurations of nozzle bodies. The developments of recent years in the design of contact devices of irregular type were generalized and systematized. Variants of the random packing geometry and materials that can be manufactured for various chemical industries are analyzed. The development trends are identified, and the problems that arise along this path are outlined. It is shown that the development of designs goes towards complicating the geometry of the nozzles in order to more evenly distribute the liquid phase in the volume of the device and increase the efficiency of mass transfer due to prolonged contact of liquid and gas flowing down the surface of the nozzle, multiple updates of the contact surface in a wide range of loads. This direction is implemented by increasing the free volume of the contact element (97 – 99%). The operating mode of all known random packing in this case is film. The second direction is the introduction of new construction materials that provide increased adhesion properties of the random packing surface. Currently, the task of finding such new design solutions remains relevant.

Index terms: random packing, pressure drop, effective surface area, separation efficiency.

REFERENCES

1. Moggridge, G.D., Cussler, E.L. «An introduction to chemical product design», *Institution of Chemical Engineers Trans IChemE*, V.78, pp. 5-11, January 2000.
2. Muller, S., Lier, S., Grunewald, M. «Development and characterization of a modular absorption column for transformable plants», *Engineering*, V. 99, pp. 256-264, July 2015.
3. Früh, K.F., Maier, U., Schaudel, D. *Handbuch der Prozessautomatisierung – Prozessleittechnik für verfahrenstechnische Anlagen*. Tauchnitz, Th., Hrsg., 6, vollständig überarbeitete und erweiterte Auflage, Deutschland: DIV, 2018.
4. Buchholz, S. «Future manufacturing approaches in the chemical and pharmaceutical industry», *Engineering*, V.49, pp. 993-935, March 2010.
5. Kent, A. *Kent and Riegel's Handbook of Industrial Chemistry and Biotechnology*, eleventh edition. NewYork, USA: Springer Science+Business Media, LLC, 2007.
6. Grunewald, M., Lier, S. «Net Present Value Analysis of Modular Chemical Production Plants», *Engineering*, V.34, P.809-816, March 2011.
7. Titova, L.M., Aleksanyan, I. Yu., Lotsmanova, O.V. «Thermodynamic analysis and evaluation of the effectiveness of an operating ammonia synthesis reactor», *South-Siberian Scientific Bulletin*, №4 (28), pp.24-29, Dec. 2019.
8. Voroshin, A.V. «Separation of a bicomponent mixture in a continuous distillation unit with a batch vortex structured packing»: Ph.d. dissertation, Ivanovo State University of Chemistry and Technology, Ivanovo, Russia, 2013.
9. Schuites, M. Raschig Super-Ring. «A New Fourth Generation Packing Offers New Advantages», *Chemical Engineering Research and Design*, V.81, pp. 48-57, January 2003.
10. Bu, S.S., Yang, J., Zhou, M., Wang, Q.W., Li, S.Y., Cuo, Z.X. «On contact point modifications for forced convective heat transfer analysis in a structured packed bed of spheres», *Nuclear Engineering and Design*, V.270, pp. 21-33, Oct. 2014.
11. *Website of Sulzer*, accessed March, 27, 2020, <https://www.sulzer.com/>.
12. Brunazzi, E., Paglianti, A. «Mechanistic pressure drop model for columns containing structured packings», *AIChE Journal*, V.43. – P 317 – 327, Feb. 1997.
13. Olujić, Z. «Effect of column diameter on pressure drop of a corrugated sheet structured packing», *CHEM ENG PROCESS*, V. 77, P. 505 – 510, Sep. 1999.
14. Kasatkin, A. G. Basic processes and devices of chemical technology, 10 edition. Moscow, Russia: Alliance, 2004.
15. Kolev, N., Kralev, B., Razkazova-Velkova, E. «Packing with stamped horizontal lamellae operating at extremely low liquid loads II. Effective surface area», *Chemical Engineering & Technology*, V.31, pp. 103-109, January 2007.
16. Kolev, N., Nakov, Sv., Ljutzkanov, L., Kolev, D. «Effective area of a highly efficient random packing», *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, V.45, pp. 429-436, June 2006.
17. Nakov, Sv., Kolev, N., Ljutzkanov, L., Kolev, D. «Comparison of the effective packings», *Chemical Engineering and Processing*, V.46, pp. 1385-1390, December 2007.
18. *Website of Raschig GmbH*, accessed March, 27, 2020, <https://www.raschig.de/>.
19. Kolev, N., Razkazova-Velkova, E. «Liquid phase leakage in the free volume of columns filled with vertical-wall packing», *Comptes rendus de l'Academie Bulgare des Sciences*, 52 (9/10), pp. 55-58, 1999.
20. Hlawitschka, M. W., Schmidt, S., Bart, H.-J. «Rashig Super-Ring operating characteristics in unpulsed liquid – liquid extraction columns», *Chemical Engineering and Technology*, V.38, pp. 446-454, 2015.
21. *Website of Vereinigte Füllkörper-Fabriken*, accessed March, 27, 2020, <https://famaga.kz/catalog/vff/>.
22. Kolev, N., Razkazova-Velkova, E., «A new column. packing for operation at extremely low liquid loads», *Chem. Eng. Process*, 40, pp. 471-476, January 2001.
23. Klyuiko, V. V. «Development, analysis and implementation of spatially structured regular contact devices for the chemical and oil and gas industry»: Ph.d. dissertation, Moscow state University of environmental engineering, Moscow, Russia, 2004.
24. *Website of Koch-Glitsch*, accessed March, 27, 2020, <https://koch-glitsch.com/>.

Titova Lyubov Mikhajlovna - Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department "Technological Machines and Equipment", FSEI of HE "Astrakhan State Technical University" tel. (8512) 614469, e-mail: titovalybov@mail.ru.

Maksimenco Yuri Alexandrovich - Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department "Technological Machines and Equipment", FSEI of HE "Astrakhan State Technical University" tel. (8512) 614469, e-mail: amxs1@yandex.ru.

Lotsmanova Olga Vasil'evna - Undergraduate student, FSEI of HE "Astrakhan State Technical University" tel. (8512) 614469, e-mail: lotsmanovaolga@gmail.com.

Telichkina Elvira Rafael'evna - Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department "Technological Machines and Equipment", FSEI of HE "Astrakhan State Technical University" tel. (8512) 614469, e-mail: titovalybov@mail.ru.