

УДК 66.021.3

DOI: 10.37816/2713-0789-2023-3-2(9)-51-67

Совершенствование насадочных контактных устройств массообменных аппаратов

М. Г. Беренгартен^{*,1}, А. С. Пушнов

** Московский политехнический университет, Москва, Россия*

Аннотация

В последние десятилетия существенно увеличилось число исследований, касающихся новых насадочных контактных устройств для массообменных и теплообменных аппаратов. Авторами проанализированы достоинства и недостатки различных нерегулярных и регулярных типов насадочных контактных устройств. Описаны основные направления исследований, позволяющие повысить энерго- и ресурсоэффективность таких процессов путем совершенствования контактных устройств технологическими и конструктивными методами. Рассмотрены регулярные геликоидно-структурные насадки с изменяемой геометрией укладки. Проанализировано влияние высоты слоя и перфорации таких насадок на гидравлическое сопротивление и массообменные характеристики. Особое внимание уделено комбинированным контактными устройствам. Изучены комбинированные контактные устройства в виде вертикально установленных блоков из гофрированных листов с проставками из горизонтально уложенных винтовых элементов. Проведено сопоставление теплообменной эффективности таких комбинированных насадок со стандартными структурированными насадками. Намечены пути совершенствования насадочных контактных устройств.

Ключевые слова

Массообмен, насадочные контактные устройства, комбинированные контактные устройства, энерго- и ресурсоэффективность.

Введение

С тех пор как в 1890 году Фридрих Рашиг предложил способ фракционной дистилляции органических веществ в колоннах, заполненных керамическими кольцами, которые с того времени и называются кольцами Рашига (были запатентованы Ф. Рашигом в 1914 году), появилось достаточно много исследований, конструктивных и технологических решений по совершенствованию насадочных контактных

устройств для проведения массообменных процессов.

В середине 60-х годов XX века в мировой практике использовалось не более 10 различных насадок правильной формы. В следующие десятилетия количество новых регулярных и нерегулярных контактных насадочных устройств существенно расширилось [1].

Перспективные контактные устройства для осуществления различных тепло- и массообменных процессов

¹ Для переписки:

Email: berengarten@mail.ru

разрабатывались и исследовались в нашей стране в отраслевых институтах (ГИАП, НИУИФ), ИВЦ «Инжехим» (Казань), Казанском национальном исследовательском технологическом университете (КНИТУ), Санкт-Петербургском государственном университете технологии и дизайна, Ивановском государственном химико-технологическом университете, Московском государственном университете инженерной экологии, вошедшем в состав Московского политехнического университета, и других университетах Российской Федерации [2-9].

Повышение энергоэффективности тепломассообменных процессов в промышленных аппаратах химической технологии, нефтегазохимического комплекса, энергетики и ряда других отраслей промышленности по-прежнему является неотложной задачей. По меньшей мере частично эта задача может быть решена за счет совершенствования существующих и создания новых контактных устройств. Например, внедрение в 1990-е годы в отечественные агрегаты азотной промышленности насадки ГИАП-НЗ, разработанной в государственном институте азотной промышленности (ГИАП), позволило успешно решить задачу импортозамещения колец Палля, в больших объемах закупавшихся по импорту, и повысить эффективность массообменных колонн.

Различные направления совершенствования тепло- и массообменных аппаратов в какой-то мере могут быть обусловлены лимитирующей стадией процесса. Например, для процессов абсорбции лимитирующей, как правило, является массотдача в жидкой фазе, для процессов испарительного охлаждения — массотдача в

газовой фазе. Не случайно рекомендуемые расходы по жидкости при осуществлении процессов абсорбции (100 и более $\text{м}^3/\text{м}^2\cdot\text{ч}$) и испарительного охлаждения ($8-10 \text{ м}^3/\text{м}^2\cdot\text{ч}$) так сильно отличаются друг от друга [3-5, 10].

Наряду с указанными особенностями, связанными с лимитирующей стадией процесса, имеется много других общих явлений, влияющих на ресурсо- и энергоэффективность. К ним можно отнести турбулизацию взаимодействующих потоков «газ-жидкость» в системе противотока, организацию входных участков контактных устройств, на которых происходит перестроение потоков газа и жидкости и гидродинамическая стабилизация потока [10-12].

Существенное влияние на процессы тепло- и массообмена оказывают разрывы сплошного слоя регулярной насадки по высоте [12, 5, 7, 10, 14, 15]. Определенная интенсификация процессов тепло- и массообмена в слое регулярной насадки может быть получена при использовании решетчатых полимерных элементов [3, 8, 15].

Существует два основных направления совершенствования контактных устройств — технологические и конструктивные. В обоих случаях речь идет о технических решениях, направленных на значительное увеличение эффективности осуществляемых процессов при одновременном снижении энергозатрат на их осуществление. Анализ результатов исследований, выполненных в последние годы, позволяет предложить следующую классификацию способов интенсификации процессов тепло- и массообмена в контактных аппаратах химической технологии и теплоэнергетики (рисунок 1).

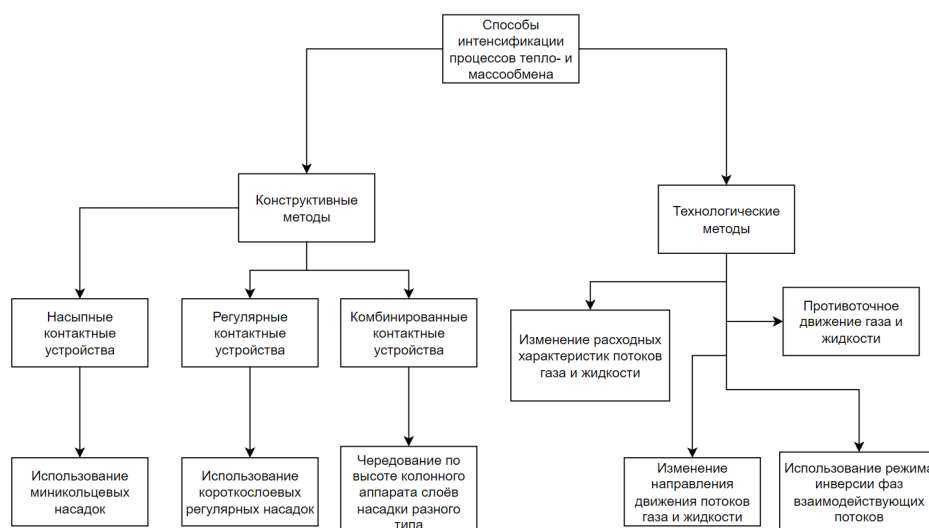


Рисунок 1 — Основные способы интенсификации процессов тепло- и массообмена

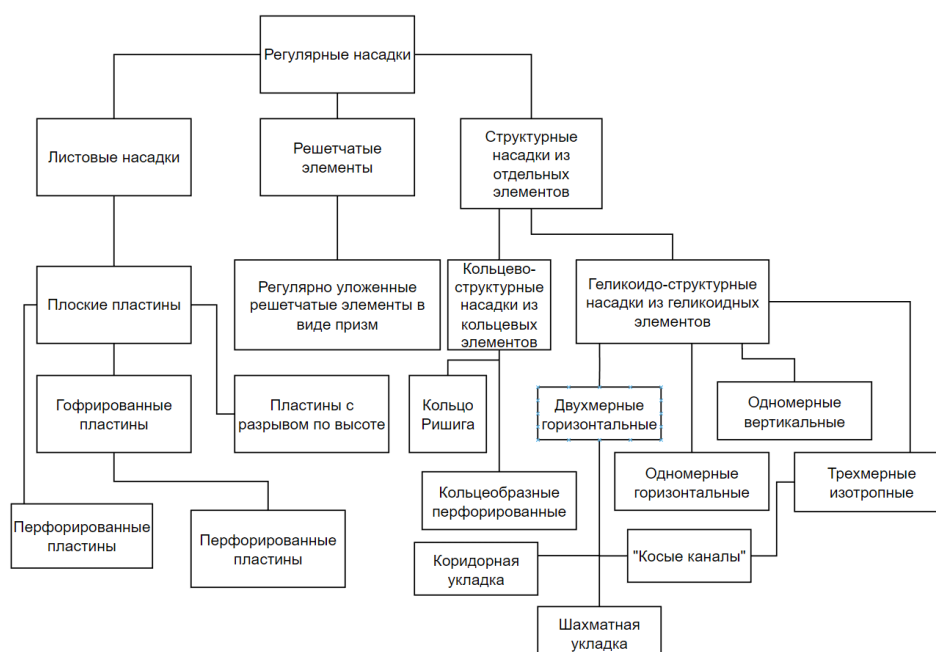


Рисунок 2 — Классификация регулярных насадок

Все эти направления совершенствования контактных устройств находят свое практическое воплощение в целом ряде работ, выполненных в разные годы в Московском институте инженерной экологии – Московском государственном университете инженерной экологии – Московском политехническом университете [4-9, 20-26 и другие].

В МГУИЭ были проведены стендовые испытания регулярных насадок различной

конструкции и комбинированных контактных устройств. Эти результаты сопоставлялись с литературными данными по наиболее распространённым насадкам. На рисунке 2 приведена классификация исследованных и наиболее распространённых регулярных насадок.

На рисунке 3 приведена схема одного из экспериментальных стендов МГУИЭ.

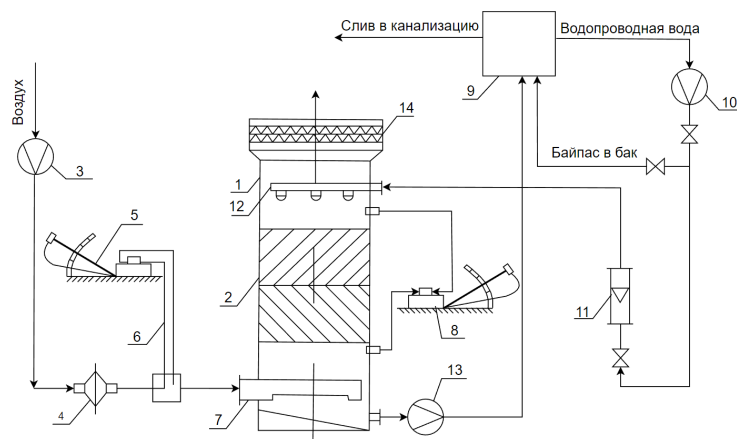


Рисунок 3 — Схема экспериментальной установки кафедры ЮНЕСКО МГУИЭ:

1 — абсорбционная колонна; 2 — насадка; 3 — газодувка; 4 — шиберная задвижка;
5, 8 — микроманометры; 6 — трубка Пито; 7 — распределитель газа; 9 — бак с водой;
10, 13 — насосы; 11 — ротаметр; 12 — ороситель; 14 — сепаратор

Часть гидродинамических испытаний проводили на стенде ВНИИГ им. Ю. Е. Веденеева [29].

Проанализируем некоторые результаты исследований насадок различного типа.

Регулярные геликоидно-структурные насадки с изменяемой геометрией укладки

Регулярные насадки различного типа — пленочные, капельные и капельно-пленочные из различных материалов — полимерных, металлических, иногда деревянных, в настоящее время эксплуатируются в больших масштабах в вентиляторных секционных и башенных градирнях систем оборотного водоснабжения.

Наряду с известными в промышленности регулярными насадками появляются новые технические решения осуществления тепломассообменных процессов при непосредственном контакте взаимодействующих потоков с использованием осесимметричных тел вращения — турбулизаторов потока, собранных в блоки различной конфигурации. Наиболее целесообразным для интенсификации процесса представляется расположение элементов с дистанцией между ними, соизмеримой с

диаметральным линейным размером указанных элементов [7].

Регулярная насадка, выполненная из четырёх лопастных винтообразных (геликоидных) горизонтальных полимерных элементов, плотно уложенных в пакет с поворотом на 90° от слоя к слою, целиком соответствует предложенному в работе [6] определению структурированных насадок. Вместе с тем, в отличие от регулярных насадок пленочного типа, например известных насадок фирмы «Зульцер», гофрированные листы которой образуют совокупность отдельных замкнутых и не сообщающихся между собой каналов, насадка из геликоидных элементов образует открытую многоканальную ячеистую структуру постоянно сообщающихся между собой по высоте каналов переменного сечения. С учетом этой особенности регулярная насадка, собранная из геликоидных элементов, может быть отнесена к новому типу так называемых «структурных» насадок [4], образуя в их ряду новый вид — геликоидно-структурных насадок.

В известной монографии В. М. Рамма [13] было получено соотношение для расчета коэффициента массоотдачи:

$$\beta = 11,6 u^{0,786} l^{-0,785}, \quad (1)$$

из которого следует, что наибольшее влияние на эффективность процесса при плотностях орошения ниже $50 \text{ м}^3/\text{м}^2\cdot\text{ч}$ оказывает длина пути пленки жидкости l . Из анализа соотношения (1) следует, что при указанных нагрузках по жидкости, характерных, в частности, для вентиляторных градилен, оптимальной высотой элемента регулярной насадки (длиной пути плёнки жидкости) будет величина $\sim 100 \text{ мм}$. Этому условию вполне отвечают геометрические размеры геликоидов в опытах, описанных в работе [7] — $\varnothing 75 \text{ мм}$. Объяснить это можно тем, что основная доля теплосъёма в регулярных структурах плёночного типа приходится именно на область входного участка гидродинамической стабилизации потока, протяжённость которого соизмерима с величиной l .

Далее приведены некоторые результаты выполненного в МГУИЭ систематического исследования влияния основных параметров (высоты слоя H , дистанции между соседними элементами в ряду t и по высоте между отдельными ярусами S , площади перфорации элементов, а также нагрузок по газу q_G и жидкости q_L) на гидравлическое сопротивление и эффективность геликоидно-структурной насадки.

На рисунке 4 показаны различные варианты укладки насадки типа геликоидно-структурной насадки типа PN-2D.

Влияние высоты насадки изучалось при значениях высоты блока H : 350 мм, 500 мм и 750 мм. При этом дистанция между соседними геликоидами выдерживалась постоянной и составляла $x_t = 2$, где $x_t = t/d$, t — шаг между центральными осями соседних геликоидов, d — наружный диаметр геликоида.

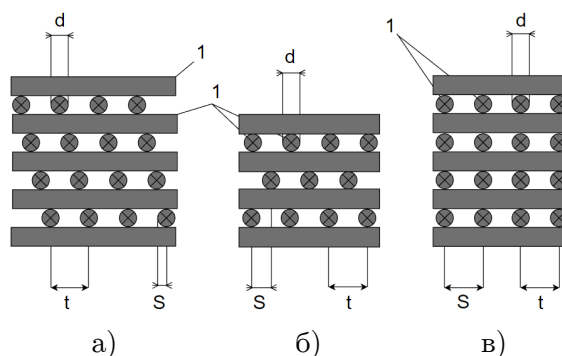


Рисунок 4 — Различные схемы укладки блоков геликоидно-структурной насадки типа PN-2D: а) — «косые каналы $S = 0.5d$ »; б) — шахматная укладка геликоидов; в) — коридорная укладка; 1 — геликоиды; d — наружный диаметр геликоида в одном ряду; t — шаг между осями симметрии геликоидов в одном ряду; S — смещение осей геликоидов в соседних рядах по высоте насадки

На рисунках 5 и 6 результаты опытов представлены в виде зависимостей для насадки PN-2D коэффициента гидравлического сопротивления ξ от высоты насадки H при фиксированном значении геометрического параметра $x_t = 2$ (рисунок 5) и величины ξ/H от значения геометрического параметра x_t (рисунок 6).

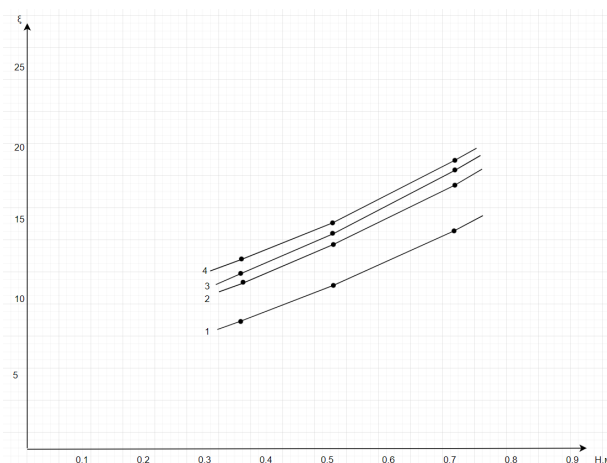


Рисунок 5 — Влияние высоты насадки типа PN-2D на величину коэффициента гидравлического сопротивления ξ в автомодельной области при $W_0 = 2.0 \text{ м/с}$ при плотностях орошения $q_L (\text{м}^3/\text{м}^2\cdot\text{ч})$: 1 — 0; 2 — 7.0; 3 — 9.0; 4 — 11.0.

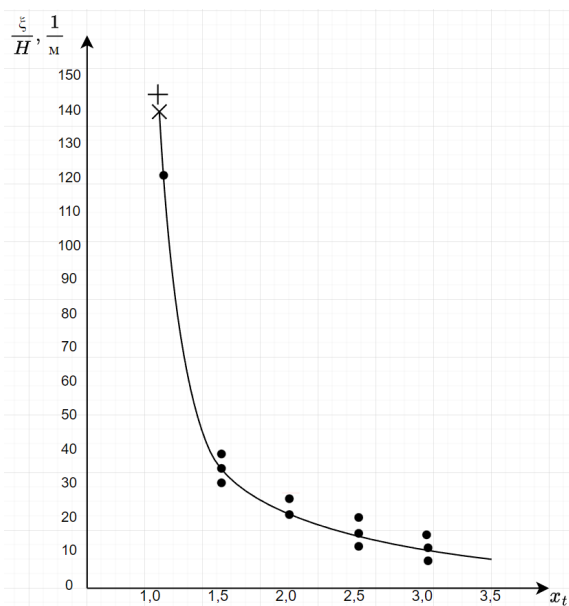


Рисунок 6 — Влияние геометрического параметра x_t на величину ξ/H для насадки типа PN-2D при $w_0 = 2.0$ м/с и различных плотностях орошения (от 7.0 до 10.0 м³/м²·ч)

Коэффициент гидравлического сопротивления ξ рассчитывали по измеренному значению потери напора в слое насадки ΔP с использованием известной формулы Дарси-Вейсбаха.

Эффективность конструкции испытуемой насадки оценивали по значению коэффициента A в уравнении для числа испарения [15, 27]

$$K_{PV} = A\lambda^m, \quad (2)$$

где $\lambda = \frac{q_G}{q_L}$; q_G — удельный расход воздуха, м³/м²·ч; q_L — удельный расход жидкости м³/м²·ч.

Область автомодельности по коэффициенту гидравлического сопротивления ξ наступала при скорости воздушного потока W_0 выше 2 м/с. Как видно из рисунка 6, в автомодельной области (при $W_0 = 2$ м/с) увеличение высоты блока насадки с 0.3 до 0.7 м (в 2.3 раза) приводит к увеличению гидравлического сопротивления ξ сухой насадки в 1.85 раза.

Влияние геометрического параметра x_t на относительную величину гидравлического сопротивления ξ/H геликоидно-

структурной насадки PN-2D (рисунок 6) в автомодельной области (при $W_0 = 2$ м/с) во всем испытанном диапазоне плотностей орошения q_L от 7 до 10 м³/м²·ч вполне удовлетворительно описывается одной кривой. При уменьшении величины x_t с 3.0 до 1.0 относительное сопротивление ξ/H в расчете на высоту слоя насадки 1 м изменяется от 10 до 140 (при $x_t = 1$, что соответствует наиболее плотной упаковке в блоке).

На рисунке 7 представлена зависимость относительной эффективности A (1/м) от величины x_t , из которой следует, что уменьшение величины x_t существенно увеличивает эффективность процесса.

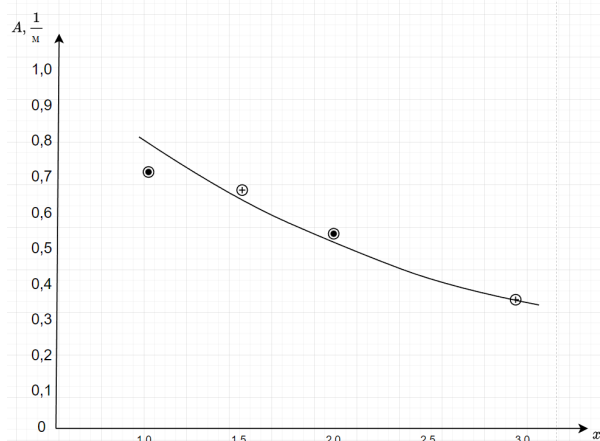


Рисунок 7 — Влияние геометрического параметра x_t насадке типа PN-2D на величину коэффициента A

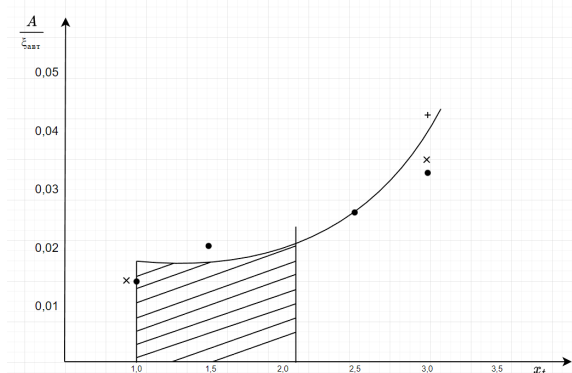


Рисунок 8 — Зависимость $A/\xi_{авт}$ от геометрического параметра x_t : заштрихованная область оптимальных значений симплекса $A/\xi_{авт}$, соответствующая диапазону x_t от 1.0 до 2.0

На рисунке 8 представлена зависимость симплекса $A/\xi_{автомод}$ от геометрического параметра x_t . Область оптимальных значений величины x_t отмечена на рисунке штриховкой.

На основании обработки результатов аэротермических испытаний блоков насадки PN-2D с различной площадью перфорации было выяснено, что перфорация геликоидных элементов в изученном диапазоне нагрузок по газу и жидкости незначительно влияет на величину коэффициента гидравлического сопротивления ξ . При увеличении площади перфорации F с 10 до 20% при нагрузках по жидкости q_L 7 и 11 м³/м²·ч (при $W_0 = 2$ м/с) коэффициент гидравлического сопротивления ξ снижается только на 8–20%. Это можно объяснить особенностями обтекания перфорационных отверстий пленкой жидкости. Как показали визуальные наблюдения, пленка обтекает стороной весь периметр отверстий перфорации, не перекрывая сколько-нибудь заметно их живое сечение.

Зависимость $\xi=f(W_0)$ для перфорированной насадки PN-2D приведена на рисунке 9. Влияние изменения площади перфорации блоков насадки высотой $H = 0.5$ м показано на рисунке 10.

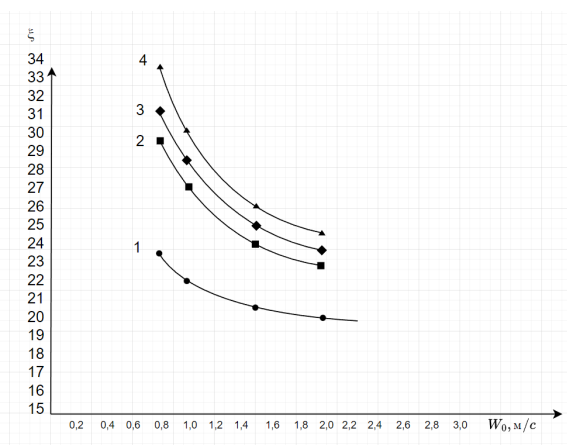


Рисунок 9 — Влияние перфорации насадки PN-2D на зависимость $\xi=f(W_0)$; $H = 1.0$ м; отверстия перфорации $\varnothing 15$ мм; шаг отверстий 50 мм при удельных расходах по жидкости q_L , (м³/м²·ч): 1 — 0; 2 — 7.0; 3 — 9.0; 4 — 11.0

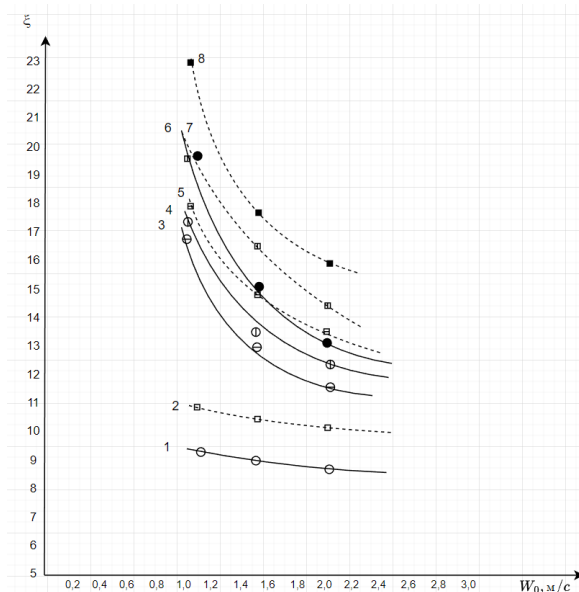


Рисунок 10. Влияние площади перфорации на гидравлическое сопротивление насадки типа PN-2D высотой $H \approx 0.5$ м, отверстия перфорации $\varnothing 15$ мм; при разном шаге отверстий и разных удельных расходах по жидкости q_L , (м³/м²·ч):

Шаг 25 мм	Шаг 50 мм
1 — $q_L = 0$	2 — $q_L = 0$
3 — $q_L = 7,0$	4 — $q_L = 7,0$
5 — $q_L = 9,0$	6 — $q_L = 9,0$
7 — $q_L = 11,0$	8 — $q_L = 11,0$

При увеличении площади перфорации с 10 до 20% (в 2 раза) коэффициент гидравлического сопротивления сухой насадки ξ в автомобильной области снижается с 10.0 до 8.7, т. е. всего на 13 %. В то же время нужно иметь в виду, что перфорация геликоидов позволяет существенно интенсифицировать процессы тепло- и массообмена.

Величина коэффициента A в эмпирической формуле (2) для числа испарения K_{PV} , характеризующая эффективность процесса испарительного охлаждения, составляет

- $A = 0.46$ при площади перфорации 10 %;
- $A = 0.48$ при площади перфорации 20 %.

В формуле (2) коэффициенты λ и m имеют следующие значения:

$$\lambda = 0.41, m = 0.6.$$

Было также изучено влияние разрыва блоков насадки по высоте. В работе [15] было показано, что значительная интенсификация охлаждающего эффекта в градириях может быть достигнута за счет разрывов сплошных листов насадки пленочного типа по высоте (т. е. разрывов между ярусами). При этом отмечалось снижение общего гидравлического сопротивления насадки и уменьшение расхода материала на ее изготовление. Вместе с тем для насадок капельного типа из решетчатых элементов такой конструктивный прием оказался малоэффективным [15].

Поскольку геликоидно-структурные насадки занимают промежуточное положение и относятся к пленочно-капельному типу, представлялось целесообразным изучить влияние разрыва между ярусами такой насадки.

Результаты сравнительных гидравлических и аэротермических испытания геликоидно-структурной насадки PN-2D с разрывом между ярусами высотой по 0.5 м каждый показали, что уменьшение величины разрыва с 1.0 до 0.5 м при том же гидравлическом сопротивлении ($\xi = 27.0$ при $q_L = 11 \text{ м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{ч}$ и $W_0 = 2.0 \text{ м/с}$) приводит к некоторому увеличению коэффициента A в выражении для числа испарения (уравнение (2) на $\sim 3\%$ (с 0.61 до 0.63)).

По сравнению со сплошным блоком насадки PN-2D высотой $H = 1.0 \text{ м}$ (без разрывов) наличие разрыва позволило увеличить коэффициент A с 0.56 до указанных выше значений 0.61 и 0.63, т. е. на 8.2% и 11.1% соответственно. При этом гидравлическое сопротивление практически сохранилось на прежнем уровне ($\xi = 26.0$).

Следовательно, в тех случаях, когда габаритные ограничения аппарата не

являются лимитирующими (что имеет место при реконструкции градириен), ярусный вариант выполнения геликоидно-структурной насадки целесообразен.

Полученные в МГУИЭ результаты показали перспективность использования геликоидно-структурной насадки типа PN-2D при реконструкции промышленных градириен после выполнения соответствующего поверочного расчета по методике, изложенной в работе [7].

Комбинированные контактные устройства

Представляется перспективным для повышения энерго- и ресурсоэффективности тепло- и массообменных процессов применение различных вариантов комбинированных контактных устройств.

Так в МГУИЭ были изучены комбинированные контактные устройства в виде вертикально установленных блоков из гофрированных листов с проставками из горизонтально уложенных винтовых элементов [28]. За счет такой конструкции обеспечивался разрыв пленки жидкости, омывающей поверхность соседних по высоте пакетов насадки. Испытания проводились на стенде ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева (рисунок 3) по испарительной методике [5, 29].

Основная идея такой комбинированной насадки состояла в следующем. Насадки, организующие капельную поверхность контакта фаз, отличаются значительно меньшей удельной поверхностью по сравнению с пленочными контактными устройствами, а следовательно, и более низкой эффективностью, хотя и обеспечивают свободное сообщение между газовой и жидкой фазами в поперечном сечении аппарата. Сочетание пленочного и капельного режима позволяет повысить эффективность насадочных контактных устройств.

Были проведены исследования тепло-массообменных и гидравлических характеристик регулярной насадки, сочетающей элементы пленочного и пленочно-капельного насадочного устройства. Комбинированная регулярная насадка состояла из пакетов структурированной насадки (СН) размером 1.0x0.5x0.5 м, разделенных по высоте проставками размерами 1.0x0.5x0.21 м в виде блоков регулярно уложенных винтовых элементов. Пакеты СН были собраны из вертикально установленных гофрированных листов из поливинилхлорида, соприкасающихся друг с другом выступающими трапециевидными гофрами, которые наклонены в соседних листах в противоположные стороны под углом 60° к горизонту. Листы были скреплены между собой наборными дистанцирующими стержнями в местах соприкосновения вершин трапециевидных гофров (высота гребня 23.5 мм, основания 51 и 4 мм, угол гофрирования 90°) и расположены с шагом 60 мм. Блоки проставки состояли из трех рядов горизонтально уложенных четырехзаходных винтовых элементов из полиэтилена высокой плотности с условным диаметром 70 мм и шагом винта 100 мм, размещенных в ряду параллельно друг другу с зазором, равным диаметру отдельного элемента, и ориентированных по высоте укладки в соседних рядах перпендикулярно относительно друг друга. Одна трехрядная проставка состояла из 20 винтовых элементов: по 8 элементов длиной 0.5 м в верхнем и нижнем рядах и 4 элемента длиной 1 м в среднем ряду.

Геометрические параметры исследуемой комбинированной насадки и ее структурных составляющих приведены в таблице 1.

Общая высота исследуемой насадки, состоящей из трех пакетов СН и двух блоков проставок, составляла 1.92 м.

Таблица 1

Параметр	Комбинированная насадка	Структурированная насадка СН	Проставка
Удельная поверхность $\text{м}^2/\text{м}^3$	116.25	136.2	45
Гидравлический диаметр сухих каналов, м	0.03	0.019	0.07

Гидродинамические испытания проводили при атмосферном давлении и различных нагрузках по газу и жидкости на системе «воздух — вода». Тепломассообменные характеристики насадки определяли методом испарительного охлаждения также на системе «воздух — вода» в условиях противотока. Тепломассообменные испытания проводили при трех режимах орошения, удельная нагрузка по жидкости составляла 5, 10 и 15 $\text{м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{ч}$ при линейной скорости воздуха в колонне от 0.5 до 2.7 м/с. Замеряли расходы воздуха и воды, температуру воды на входе и выходе из колонны, температуру воды и влажность воздуха на входе в колонну. Результаты экспериментов обрабатывали в виде зависимости числа Меркеля от относительного расхода воздуха [15]:

$$Me = \frac{\beta_{GV} h}{q_L} = \frac{\beta_{GL} F}{G_L} = A \lambda^m, \quad (3)$$

где β_{GV} — объемный коэффициент массоотдачи в газовой фазе, $\text{кг}/\text{м}^3 \cdot \text{с}$; β_{GL} — поверхностный коэффициент массоотдачи в газовой фазе, $\text{кг}/\text{м}^2 \cdot \text{с}$; h — высота насадки, м; F — площадь поверхности насадки (поверхность массообмена) $F = a_p V$, м^2 ; a_p — удельная поверхность насадки, $\text{м}^2/\text{м}^3$; V — объем насадки, м^3 ; G_L — массовый расход жидкости, $\text{кг}/\text{с}$;

λ — относительный расход воздуха;
 q_L — удельный массовый расход жидкости, кг/м²·с; A, m — коэффициент и показатель степени, экспериментально определяемые для каждого типа насадки.

Для исследуемой насадки было получено соотношение

$$Me = 2,63\lambda^{0,37}. \quad (4)$$

На рисунке 11 представлены зависимости числа Меркеля от относительного расхода воздуха для комбинированной насадки (кривая 2) и исходной структурированной насадки СН (кривая 1).

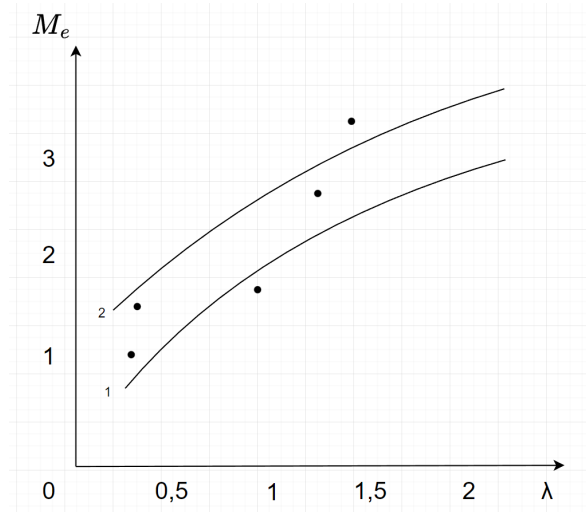


Рисунок 11 — Тепломассообменная эффективность (критерий Me) исходной структурированной насадки (1) и комбинированной насадки (2)

При проведении гидродинамических испытаний было исследовано гидравлическое сопротивление сухой и орошаемой насадок при различных удельных нагрузках по жидкости L_0 . Во время проведения экспериментов фиксировали значения расходов и коэффициента сопротивления ξ_G .

Коэффициент сопротивления насадки представляли в виде числа Эйлера, рассчитываемого как функция числа Рейнольдса для газовой фазы:

$$Eu = \frac{\Delta P_{dry}}{\rho_G w_0^2} = \frac{\xi_G}{2} \frac{h}{d_{hG,dry}} = \frac{A}{Re_G^n} \frac{h}{d_{hG,dry}}, \quad (5)$$

где ΔP_{dry} — гидравлическое сопротивление сухой насадки, Па; w_0 — фиксированная скорость газа в колонне, отнесенная к ее полному поперечному сечению, м/с; ρ_G — плотность газа, кг/м³; h — высота насадки в колонне, м; $d_{hG,dry}$ — гидравлический диаметр сухих треугольных каналов течения газа, м; A, n — коэффициент и показатель степени, определяемые для каждого типа насадки. Re_G — число Рейнольдса для газовой фазы:

$$Re_G = \frac{\rho_G w_0 d_{hG,dry}}{\mu_G}, \quad (6)$$

где μ_G — динамический коэффициент вязкости, Па·с.

Обработка опытных данных позволила получить расчетную формулу для определения числа Эйлера для сухой исследуемой насадки в диапазоне чисел Re_G от 500 до 6000

$$Eu = 0,4 Re_G^{-0,078} \frac{h}{d_{hG,dry}}. \quad (7)$$

Определив коэффициент сопротивления сухой насадки из уравнения (5), с учетом уравнения (7) рассчитывали гидравлическое сопротивление сухой насадки

$$\frac{\Delta P_{dry}}{h} = \xi_G \frac{1}{d_{hG,dry}} \frac{\rho_G w_0^2}{2}. \quad (8)$$

Для определения гидравлического сопротивления орошаемой насадки ΔP_{wet} использовали соотношение

$$\frac{\Delta P_{wet}}{\Delta P_{dry}} = 1 + A w_0^n L_0^m \quad (9)$$

Анализ полученных результатов позволил сделать вывод, что применение комбинированных насадочных устройств позволяет компенсировать недостатки отдельных пленочных и капельно-пленочных

устройств и, соответственно, повысить в целом эффективность массообменных колонных аппаратов или аппаратов испарительного охлаждения (градирен).

Как видно из данных, приведенных на рисунке 11, по тепломассообменным характеристикам комбинированная насадка превосходит традиционную структурированную насадку, из пакетов которой она частично состоит, примерно на 25% во всем диапазоне рабочих нагрузок.

Применение комбинированной насадки по сравнению с традиционными структурированными насадками СН из гофрированных листов позволяет [5]:

- повысить интенсивность процессов тепло- и массообмена за счет турбулизации газовых потоков, поступающих из закрытых каналов расположенного ниже проставки пакета из гофрированных листов за счет их дополнительной закрутки и перемешивания в блоке проставки;
- создать дополнительную пленочно-капельную зону контакта фаз, что обеспечивает повышение массообменной эффективности насадки и сокращение капитальных затрат;
- повысить интенсивность процессов тепло- и массообмена за счёт перераспределения жидкости (поступающей из закрытых каналов расположенного выше проставки пакета из гофрированных листов) путем ее дополнительного перемещения по поверхности элементов блока проставки в горизонтальном направлении, что обеспечивает перемешивание жидкости и ее равномерное распределение по поперечному сечению аппарата.

Заключение

Насадочные контактные устройства, применяемые в химической промышленности, теплоэнергетике и других отраслях промышленности, уже более 100 лет постоянно совершенствуются и за счёт новых конструктивных решений, и за счёт

применения новых материалов, и за счёт комбинирования как самих насадок, так и в сочетании с другими контактными устройствами.

Основными направлениями их совершенствования являются:

- увеличение развиваемой поверхности контакта фаз;
- упрощение и удешевление технологии массового производства;
- апробация новых дешевых и доступных полимерных, в том числе тканых, и сетчатых материалов;
- поиск аэродинамически совершенных форм элементов насадки с хорошей омываемостью контактирующими потоками всей геометрической поверхности насадки;
- стремление максимально снизить величину гидравлического сопротивления слоя насадки при одновременном увеличении развиваемой удельной поверхности;
- использование «концевых» эффектов при конструировании элементов регулярной насадки;
- создание благоприятных условий для частого обновления (разрыва) пленки жидкости;
- разработка комбинированных контактных устройств, позволяющих сочетать в объеме одного аппарата достоинства высокоразвитой удельной поверхности регулярных структурированных насадок с постоянным обновлением пленки жидкости.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1]. Сокол Б. А., Чернышев А. К., Баранов Д. А., Беренгартен М. Г., Левин Б. В. Насадки массообменных колонн / Под ред. Баранова Д. А. М.: ООО «Инфохим», 2009, 358 с.
- [2]. Лаптев А. Г., Башаров М. М. Эффективность тепломассобмена и разделения гетерогенных сред в аппаратах

нефтегазохимического комплекса. Монография, Казань: Центр инновационных технологий, 2016, 344 с.

[3]. Лаптев А. Г. Модели пограничного слоя и расчет тепломассобменных процессов. Казань: Изд. Казанского университета, 2007, 500 с.

[4]. Коморович Т., Магера Я., Баранов Д. А., Беренгартен М. Г. Высокоэффективные кольцево-структурные насадки. *Химическое и нефтегазовое машиностроение*, 2001, № 8, с. 8–19.

[5]. Дмитриева Г. Гидродинамика и массообмен в структурированных насадках из гофрированных листов. Дисс. ... канд. техн. наук, Иваново, 2007.

[6]. Дмитриева Г. Б., Беренгартен М. Г., Ключенкова М. И., Пушнов А. С. Эффективные конструкции структурированных насадок для процессов тепломассообмена. *Химическое и нефтегазовое машиностроение*, 2005, № 8, с. 28–32.

[7]. Рябушенко А.С. Гидродинамика и испарительное охлаждение в насадках для градилен. Дисс. ... канд. техн. наук, М.: МГУИЭ, 2009.

[8]. Generozov A., Berengarten M., Klushenkova M., Pushnov F. The ventilating gas cleaning system for guarantee microclimate of stockbreeding farm. *Proceeding of the International Conference. Technical and technological progress in aeroculture*. 2007, Raunas, pp. 143–146.

[9]. Пушнов А. С., Беренгартен М. Г., Лагуткин М. Г. и др. Влияние геометрии каналов регулярной керамической насадки на гидродинамику тепло- и массообменных процессов. *Химическое и нефтегазовой машиностроение*, 2008, № 6, с. 3–4.

[10]. Махнин А. А., Совершенствование процессов и аппаратов для очистки паровоздушных смесей от органических

растворителей сорбционными методами. Автореферат диссертации ... д-ра техн. наук, Ярославль, Ярославский государственный технический университет, 2010, 34 с.

[11]. Пушнов А. С., Лозовая Н. П. Входной участок гидродинамической стабилизации потока в регулярной насадке. *Химическая промышленность*, 2009, т. 86, № 5, с. 241–248.

[12]. Пушнов А. С., Лозовая Н. П., Лагуткин М. Г. Модель входного участка гидродинамической стабилизации потока в регулярной насадке. *Химическое и нефтегазовое машиностроение*, 2010, №1, с. 4–7.

[13]. Рамм В. М. Абсорбция газов, изд. 2, перераб. М.: Химия 1976, 471 с.

[14]. Лозовая Н. П., Пушнов А. С. Влияние геометрических характеристик регулярной насадки на особенности гравитационного течения пленки жидкости. *Химическая промышленность*, 2010, т. 87, № 7, с. 353–356.

[15]. Пономаренко В. С., Арефьев Ю. И. Градирни промышленных и энергетических предприятий. М.: Энергоатомиздат, 1998, 376 с.

[16]. Дмитриева Г. Б., Беренгартен М. Г., Ключенкова М. И., Пушнов А. С. Расчет гидродинамических параметров регулярных структурированных насадок. *Химическое и нефтегазовой машиностроение*, 2005, №12, с. 5–9.

[17]. Пушнов А. С., Чиж К. В. Геометрические характеристики насыпных объемных решетчатых насадок для контактных аппаратов. *Химическая промышленность*, 2014, т.91, № 3, с. 142–145.

[18]. Пушнов А. С., Витковская Р. Ф., Беренгартен М. Г. и др. Современные проблемы науки в области защиты окружающей среды. Контактные устройства для очистки газовых выбросов:

учебное пособие. Спб.: ФГБОУ ВО «СПбГУПТД», 2016, 96 с.

[19]. Беренгартен М. Г., Витковская Р. Ф., Городилов А. А., Пушнов А. С. Процессы и аппараты защиты окружающей среды. Насадочные скрубберы для контактного теплообмена: учебное пособие, Спб.: ФГБОУ ВПО «СПбГУТД», 2014, 82 с.

[20]. Витковская Р. Ф. Разработка и исследование полимерных волокнистых катализаторов и контактных элементов для ресурсосбережения и охраны окружающей среды. Дисс. ... д-р техн. наук, СпБ, СПбГУТД, 2005.

[21]. Харитонов А. А. Испарительное охлаждение в регулируемом контактном устройстве градирни. Автореферат дисс. ... канд. техн. наук. Иваново: Ивановский гос. Химико-технологический университет, 2013, 16 с.

[22]. Цурикова Н. П. Влияние высоты блока регулярной насадки на процесс испарительного охлаждения в вентиляторных градирнях. Автореферат дисс. ... канд. техн. наук, Москва: МИТХТ им. М. В. Ломоносова, 2013, 24 с.

[23]. Систер В. Г., Пушнов А. С., Пирогова О. В., Карпенко А. С. Современные методы интенсификации процессов

тепло-массообмена в контактных аппаратах с насадкой. *Химическая технология*. 2018, т. 19, № 2, с. 81–87.

[24]. Соколов А. С. Влияние типа керамической кольцевой насадки на процесс абсорбции газов. Автореферат дисс. ... к.т.н. М.: МГУИЭ, 2009, 16 с.

[25]. Пушнов А. С., Карпенко А. С. Геометрические характеристики насадок и эффективность процессов тепло- и массообмена в колонных аппаратах. *Химическая технология*, 2015, т. 16, № 9, с. 557–563.

[26]. Коган А. М., Юдина Л. А., Пушнов А. С. Гидравлическое сопротивление и удельная поверхность нерегулярных насадок. *Химическая промышленность*, 2009, т. 85, № 3, с. 147–152

[27]. Пушнов А. С., Беренгартен М. Г., Каган А. М., Рябушенко А. С. Геликоидно-структурные насадки с изменяемой геометрией укладки. *Химическая промышленность*, 2007, т. 84, № 5, с. 249–251.

[28]. Сухов Е. А., Гельфанд Р. Е. Определение коэффициентов тепло- и массотдачи оросительных устройств по опытными данным. *Известия ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева*, 1971, т. 96, с. 256–262.

Беренгартен Михаил Георгиевич — канд. хим. наук, профессор, профессор кафедры «Аппаратурное оформление и автоматизация технологических производств им. проф. М. Б. Генералова», Московский политехнический университет (Российская Федерация, 107023, Москва, ул. Большая Семёновская, д. 38)

Пушнов Александр Сергеевич — канд. техн. наук, старший научный сотрудник, Московский политехнический университет (Российская Федерация, 107023, Москва, ул. Большая Семёновская, д. 38)

Improving the nozzle contact devices of mass transfer equipment

М. Г. Беренгартен^{*,1}, А. С. Пушинов

** Moscow Polytechnic University, Moscow, Russia*

Abstract

In recent years the number of studies concerning new nozzle contact devices for mass transfer and heat and mass transfer devices has increased significantly. The authors analyzed the advantages and disadvantages of various irregular and regular types of nozzle contact devices. The main directions of research are described, which make it possible to increase the energy and resource efficiency of such processes by improving contact devices by technological and constructive methods. Regular helicoid-structural nozzles with variable laying geometry are considered. The influence of the height of the deflection and perforation of such nozzles on the hydraulic resistance and mass transfer characteristics is analyzed. Special attention is paid to combined contact devices. Combined contact devices in the form of vertically mounted blocks of corrugated sheets with spacers of horizontally stacked screw elements have been studied. A comparison of the heat and mass transfer efficiency of such combined nozzles with standard structured nozzles has been carried out. The ways of improving the attachment contact devices are outlined.

Keywords

Mass transfer, nozzle contact devices, combined contact devices, energy and resource efficiency.

REFERENCES

- [1]. Sokol B. A., Chernyshev A. K., Baranov D. A., Berengarten M. G., Levin B. V. Nasadki massoobmennykh kolonn [Packing for mass transfer columns] / Ed. by D. A. Baranov. Moscow: LLC "Infokhim" Publ., 2009, 358 p. (In Russ.)
- [2]. Laptsev A. G., Basharov M. M. Effektivnost' teplo- i massoobmena i razdeleniya geterogennykh sred v apparatakh neftegazokhimicheskogo kompleksa [Efficiency of heat and mass transfer and separation of heterogeneous media in equipment for the oil and gas chemical complex]. Monograph, Kazan: Tsentr innovatsionnykh tekhnologiy Publ., 2016, 344 p. (In Russ.)
- [3]. Laptsev A. G. Modeli pogranychnogo sloya i raschet teplo- i massoobmennykh protsessov [Boundary layer models and calculation of heat and mass transfer processes]. Kazan: Izd. Kazanskogo universiteta, 2007, 500 p. (In Russ.)

¹ Corresponding author

Email: berengarten@mail.ru

- [4]. Komorovich T., Magera Ya., Baranov D. A., Berengarten M. G. Vysokoeffektivnyye kol'tsevo-strukturnyye nasadki [Highly effective ring-structure packings]. *Khimicheskoye i neftegazovoye mashinostroyeniye* [Chemical and oil and gas engineering], 2001, no. 8, pp. 8–19. (In Russ.)
- [5]. Dmitrieva G. Gidrodinamika i massoobmen v strukturirovannykh nasadkakh iz gofirovannykh listov [Hydrodynamics and mass transfer in structured packings made of corrugated sheets]. Diss. ... Cand. of Tech. Sci., Ivanovo, 2007. (In Russ.)
- [6]. Dmitrieva G. B., Berengarten M. G., Klyushenkova M. I., Pushnov A. S. Effektivnyye konstruksii strukturirovannykh nasadok dlya protsessov teplo- i massoobmena [Effective designs of structured packings for heat and mass transfer processes]. *Khimicheskoye i neftegazovoye mashinostroyeniye* [Chemical and oil and gas engineering], 2005, no. 8, pp. 28–32. (In Russ.)
- [7]. Ryabushenko A. S. Gidrodinamika i isparennoye okhlazhdeniye v nasadkakh dlya gradiren [Hydrodynamics and evaporative cooling in packings for cooling towers]. Diss. ... Cand. of Tech. Sci., Moscow: MGUE, 2009. (In Russ.)
- [8]. Generozov A., Berengarten M., Klushenkova M., Pushnov F. The ventilating gas cleaning system for guarantee microclimate of stockbreeding farm. *Proceeding of the International Conference. Technical and technological progress in aeroculture*. 2007, Raunas, pp. 143–146.
- [9]. Pushnov A. S., Berengarten M. G., Lagutkin M. G. et al. Vliyanie geometrii kanalov regularnoy keramicheskoy nasadki na gidrodinamiku teplo-massoobmennyykh protsessov [The influence of channel geometry of a regular ceramic packing on the hydrodynamics of heat and mass transfer processes]. *Khimicheskoye i neftegazovoye mashinostroyeniye* [Chemical and oil and gas engineering], 2008, no. 6, pp. 3–4. (In Russ.)
- [10]. Makhnin A. A. Sovershenstvovanie protsessov i apparatov dlya ochistki parovozdushnykh smesey ot organicheskikh rastvoriteley sorbtionnymi metodami [Improvement of processes and equipment for cleaning air-vapor mixtures from organic solvents by sorption methods]. Doctoral dissertation abstract, Yaroslavl State Technical University, 2010, 34 p. (In Russ.)
- [11]. Pushnov A. S., Lozovaya N. P. Vkhodnoy uchastok gidrodinamicheskoy stabilizatsii potoka v regularnoy nasadke [The inlet section of hydrodynamic flow stabilization in a regular packing]. *Khimicheskaya promyshlennost'* [Chemical industry], 2009, vol. 86, no. 5, pp. 241–248. (In Russ.)
- [12]. Pushnov A. S., Lozovaya N. P., Lagutkin M. G. Model' vkhodnogo uchastka gidrodinamicheskoy stabilizatsii potoka v regularnoy nasadke [The model of the inlet section of hydrodynamic flow stabilization in a regular packing]. *Khimicheskoye i neftegazovoye mashinostroyeniye* [Chemical and oil and gas engineering], 2010, no. 1, pp. 4–7. (In Russ.)
- [13]. Ramm V. M. Absorbtsiya gazov [Gas absorption], 2nd ed., rev. Moscow: Khimiya Publ., 1976, 471 p. (In Russ.)
- [14]. Lozovaya N. P., Pushnov A. S. Vliyanie geometricheskikh kharakteristik regularnoy nasadki na osobennosti gravitatsionnogo techeniya plenki zhidkosti [The influence of the geometric characteristics of a regular packing on the features of gravitational flow of a liquid film]. *Khimicheskaya promyshlennost'* [Chemical industry], 2010, vol. 87, no. 7, pp. 353–356. (In Russ.)
- [15]. Ponomarenko V. S., Arefyev Yu. I. Gradirni promyshlennykh i energeticheskikh predpriyatiy [Cooling towers of industrial and power plants]. Moscow:

Energoatomizdat Publ., 1998, 376 p. (In Russ.)

[16]. Dmitrieva G. B., Berengarten M. G., Klyushenkova M. I., Pushnov A. S. Raschet gidrodinamicheskikh parametrov regulyarnykh strukturirovannykh nasadok [Calculation of hydrodynamic parameters of regular structured packings]. *Khimicheskoye i neftegazovoye mashinostroyeniye* [Chemical and oil and gas engineering], 2005, no. 12, pp. 5–9. (In Russ.)

[17]. Pushnov A. S., Chizh K. V. Geometricheskiye kharakteristiki nasypnykh ob'yemnykh reshetchatykh nasadok dlya kontaktnykh apparatov xGeometric characteristics of bulk lattice packings for contact devices]. *Khimicheskaya promyshlennost'* [Chemical industry], 2014, vol. 91, no. 3, pp. 142–145. (In Russ.)

[18]. Pushnov A. S., Vitkovskaya R. F., Berengarten M. G. et al. Sovremennyye problemy nauki v oblasti zashchity okruzhayushchey sredy. Kontaktnyye ustroystva dlya ochistki gazovykh vybrosov: uchebnoye posobiye [Modern problems of science in the field of environmental protection. Contact devices for gas emission cleaning: a textbook]. St. Petersburg: FGBOU VO "SPbGUPDT" Publ., 2016, 96 p. (In Russ.)

[19]. Berengarten M. G., Vitkovskaya R. F., Gorodilov A. A., Pushnov A. S. Protsessy i apparaty zashchity okruzhayushchey sredy. Nasadochnyye skrubbery dlya kontaktnogo teploobmena: uchebnoye posobiye [Processes and apparatuses for environmental protection. Nozzle scrubbers for contact heat exchange: a textbook], St. Petersburg: FGBO VPO "SPbGUTD" Publ., 2014, 82 p. (In Russ.)

[20]. Vitkovskaya R. F. Razrabotka i issledovaniye polimernykh voloknistykh katalizatorov i kontaktnykh elementov dlya resursosberezheniya i okhrany

okruzhayushchey sredy [Development and research of polymer fibrous catalysts and contact elements for resource saving and environmental protection]. Dr. Techn. Sci. Diss., SPb, SPbGUTiD, 2005. (In Russ.)

[21]. Kharitonov A. A. Isparitel'noye okhlazhdeniye v reguliruyemom kontaktnom ustroystve gradirni [Evaporative cooling in a controllable contact device of a cooling tower]. Abstract of Cand. Tech. Sci. Diss., Ivanovo: Ivanovo State Polytechnic University, 2013, 16 p. (In Russ.)

[22]. Tsurikova N. P. Vliyaniye vysoty bloka regulyarnoy nasadki na protsess isparitel'nogo okhlazhdeniya v ventilyatornykh gradirnyakh [The influence of the height of the regular packing block on the process of evaporative cooling in fan cooling towers]. Abstract of Cand. Tech. Sci. Diss., Moscow: M.V. Lomonosov Moscow State University of Fine Chemical Technology, 2013, 24 p. (In Russ.)

[23]. Sister V. G., Pushnov A. S., Pirogova O. V., Karpenko A. S. Sovremennyye metody intensifikatsii protsessov teplo-massoobmena v kontaktnykh apparatakh s nasadkoy [Modern methods of intensifying heat and mass transfer processes in contact devices with a packing]. *Khimicheskaya tekhnologiya* [Chemical technology], 2018, vol.19, no. 2, pp. 81–87. (In Russ.)

[24]. Sokolov A. S. Vliyaniye tipa keramicheskoy kol'tsevoy nasadki na protsess absorbitsii gazov [Influence of the type of ceramic ring packing on gas absorption process]. Author's abstract of dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences. Moscow: Moscow State University of Instrument Engineering and Computer Science, 2009, 16 p. (In Russ.)

[25]. Pushnov A. S., Karpenko A. S. Geometricheskiye kharakteristiki nasadok i effektivnost' protsessov teplomassoobmena v kolonnykh apparatakh [Geometric

characteristics of packings and the efficiency of heat and mass transfer processes in column apparatus]. *Khimicheskaya tekhnologiya* [Chemical technology], 2015, vol. 16, no. 9, pp. 557–563. (In Russ.)

[26]. Kogan A. M., Yudina L. A., Pushnov A. S. Gidravlicheskoje soprotivleniye i udelnaya poverkhnost' neregulyarnykh nasadok [Hydraulic resistance and specific surface of irregular packings]. *Khimicheskaya promyshlennost'* [Chemical industry], 2009, vol. 85, no. 3, pp. 147–152. (In Russ.)

[27]. Pushnov A. S., Berengarten M. G., Kagan A. M., Ryabushenko A. S. Gelikoidno-strukturnyye nasadki s izmenyaemoy geometriyey ukladki [Helicoidal-structured

packings with variable packing geometry]. *Khimicheskaya promyshlennost'* [Chemical industry], 2007, vol. 84, no. 5, pp. 249–251. (In Russ.)

[28]. Sukhov E. A., Gelfand R. E. Opredeleniye koeffitsientov tepla i massopredachi orositel'nykh ustroystv po opytным dannym [Determination of heat and mass transfer coefficients of irrigating devices based on experimental data]. *Izvestiya VNIIG im. B. Ye. Vedeneyeva* [Proceedings of the VNIIG named after B. E. Vedeneyev], 1971, vol. 96, pp. 256–262. (In Russ.)

Berengarten M. G. — Cand. Sc. (Chem.), professor, Department of Hardware design and automation of technological production named after prof. M. B. Generalov, Moscow Polytechnic University (B. Semenovskaya st., 38, Moscow, 107023, Russian Federation).

Pushnov A. S. — Cand. Sc. (Eng.), Senior Researcher, Moscow Polytechnic University (B. Semenovskaya st., 38, Moscow, 107023, Russian Federation).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Совершенствование насадочных контактных устройств массообменных аппаратов / М. Г. Беренгартен, А. С. Пушнов // Промышленные процессы и технологии. 2023. Т. 3. № 2(9). С. 51 – 67.

DOI: 10.37816/2713-0789-2023-3-2(9)-51-67

Please cite this article as:

Berengarten M. G., Pushnov A. S. Improving the nozzle contact devices of mass transfer equipment. Industrial processes and Technologies, 2023, vol. 3, no. 2(9), pp. 51 – 67.

DOI: 10.37816/2713-0789-2023-3-2(9)-51-67