

ПРОЦЕССЫ И АППАРАТЫ ХИМИЧЕСКИХ ТЕХНОЛОГИЙ / PROCESSES AND DEVICES OF CHEMICAL TECHNOLOGIES

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2024.142.115>

ХАРАКТЕРИСТИКИ НОВОЙ КОНСТРУКЦИИ РЕГУЛЯРНОЙ НАСАДКИ, ПРЕДНАЗНАЧЕННОЙ ДЛЯ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛО-МАССООБМЕНА

Научная статья

Савенко С.А.^{1,*}, Беренгартен М.Г.²

^{1,2}Московский политехнический университет, Москва, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (semensmk[at]yandex.ru)

Аннотация

В статье представлена новая конструкция регулярной насадки, предназначенная для использования колонных аппаратов химической и нефтехимической промышленности. Насадка может найти применение в широком спектре химико-технологических процессов, от очистки или разделения смесей до теплообмена. Конструкция насадки, характеризующаяся низким гидравлическим сопротивлением и повышенной устойчивостью к образованию загрязнений на поверхности, представляет собой перспективное решение для использования в «тяжелых условиях». В таких условиях, где вероятность загрязнения контактных устройств особенно высока, её особенности могут обеспечить значительные преимущества. Для оценки гидравлической характеристики новой насадки, результаты экспериментов были сопоставлены с данными, полученными для колец Рашига, испытанных в аналогичных условиях, что позволило оценить эффективность новой конструкции насадки в сравнении с традиционными решениями. Для определения тепло-массообменных характеристик была использована система «воздух-вода». Изготовление прототипа предлагаемой конструкции было выполнено с использованием отходов от производства пластинчатых теплообменников, а также с применением технологии слоевой наплавки термопластичного материала акрилонитрил-бутадиенстирола.

Ключевые слова: тепло-массообмен, регулярная насадка, система «воздух-вода», кольца Рашига.

CHARACTERISTICS OF A NEW DESIGN OF REGULAR PACKING FOR HEAT-AND-MASS TRANSFER PROCESSES

Research article

Savenko S.A.^{1,*}, Berengarten M.G.²

^{1,2}Moscow Polytechnic University, Moscow, Russian Federation

* Corresponding author (semensmk[at]yandex.ru)

Abstract

The article introduces a new design for a regular packing intended for use in column apparatuses of the chemical and petrochemical industries. The packing can be applied in a wide range of chemical and technological processes, from purification or separation of mixtures to heat transfer. The packing design, characterized by low hydraulic resistance and increased resistance to surface fouling, is a promising solution for "heavy conditions" applications. In such situations, where the likelihood of contamination of contact devices is particularly high, its features can provide significant advantages. In order to evaluate the hydraulic performance of the new packing, experimental results were compared with data obtained for Raschig rings tested under similar conditions, allowing the effectiveness of the new packing design to be evaluated in comparison with conventional solutions. An air-water system was used to determine the heat-and-mass transfer characteristics. Manufacturing of the prototype of the proposed design was performed using waste from the production of plate heat exchangers, as well as using the technology of layer cladding of thermoplastic material acrylonitrile-butadiene styrene.

Keywords: heat-and-mass transfer, regular packing, air-water system, Raschig rings.

Введение

Процессы тепло-массообмена занимают центральное место в химической технологии, обеспечивая преобразование потоков веществ и энергии для получения необходимых продуктов или условий проведения технологических процессов. Для достижения требуемой эффективности процессов, осуществляемых с использованием внутреннего объема аппаратов, требуется достаточно развитая поверхность контакта взаимодействующих потоков, для чего используют различные контактные устройства – массообменные тарелки и насадки.

С 1890 года, когда Фридрих Рашиг впервые применил керамические кольца, названные впоследствии его именем, для использования в колоннах для фракционной дистилляции органических веществ, появилось большое количество как конструктивных, так и технологических решений по использованию различных видов насадок как контактных устройств, и работы эти не менее интенсивно продолжают в настоящее время [1].

Широкое разнообразие существующих контактных устройств отражает потребность в решениях, адаптированных к конкретным условиям процесса и природе взаимодействующих веществ. Выбор подходящего типа или конструкции контактного устройства имеет решающее значение для оптимизации эффективности процесса; влияют на этот выбор как физические свойства взаимодействующих веществ и рабочие условия процесса, так и желаемый конечный результат.

Регулярные насадки имеют ряд преимуществ по сравнению с насадками, засыпаемыми в навал, и массообменными тарелками, включая меньший перепад давления, более высокую эффективность, большую пропускную способность и меньшую степень задержки жидкости в насадочном слое. Однако у регулярных насадок есть и недостатки, такие как более высокая стоимость и повышенная чувствительность к неравномерному распределению взаимодействующих потоков [2].

Например, в тяжелых условиях эксплуатации, характеризующихся высокой склонностью к коксованию поверхности контакта и засорению (уменьшению) свободного сечения аппарата, что в свою очередь может существенно затруднить осуществление процесса, ряд производителей советует использовать специальные конструкции внутренних контактных устройств, такие как PROFLUX от Koch-Glitsch и Mellagrid от Sulzer. Так, использование решётчатой насадки PROFLUX, специально предназначенной для использования в тяжёлых условиях эксплуатации, увеличило производительность на 10% при снижении гидравлического сопротивления, достигнутого благодаря использованию более подходящей процессу насадки, что напрямую ведет к уменьшению эксплуатационных расходов на транспортировку газа через слой насадки в сочетании с высокой надёжностью при использовании в условиях, подверженных образованию отложений на контактных поверхностях, что потенциально может привести к увеличению гидравлического сопротивления и закупориванию каналов движения сред (тяжёлых условиях). Конструктивные требования для тяжёлых условий эксплуатации включают в себя баланс между требованиями к эффективности при сохранении надежности и существенном увеличении выхода продукта [3].

Описание новой конструкции насадки и методики обработки экспериментальных данных

Конструкция рассматриваемого контактного устройства представляет собой многослойный блок насадки (см. рис. 1). Каждый слой выполнен в виде пакета 3, состоящего из ряда вертикальных гофрированных пластин 2, установленных параллельно друг другу с соблюдением технологического зазора между ними, посредством дистанцирующих стержней, на которых они закреплены. Малая высота пакета 3 способствует развитию поверхности плёнки стекающей жидкости за счёт увеличения числа так называемых «концевых эффектов» в сравнении с известными аналогами с тем же объёмом насадки и большей высотой пакета. Тенденция к уменьшения высоты пакетов насадки с точки зрения повышения ее эффективности наблюдается в ряде работ [4], [10], [11], [12], такая конструктивная особенность способствует повышению эффективности за счёт лучшего перемешивания, однако в проведенных ранее исследованиях [4], [12] недостаточно полно использована возможность дальнейшего снижения высот слоев для расширения диапазона их допустимых значений. Установка пакетов 3 с поворотом на 90° относительно соседних по высоте пакетов способствует развитию активной поверхности контакта взаимодействующих фаз за счёт более частого разрыва и обновления плёнки стекающей жидкости, а уменьшение высоты пакета 3 позволяет увеличить число «концевых эффектов» в сравнении с тем же объёмом насадки с большей высотой пакета, т.е. участков локальной турбулизации (волнообразования) плёнки жидкости при её перетекании между соседними слоями (пакетами), характеризующихся интенсивным перестроением профиля скорости потока. Гофрированные пластины могут быть изготовлены из металла, пластика или керамики, допускающих использование насадки при работе в жестких эксплуатационных условиях. Опробовано изготовление пакетов из деловых отходов промышленного производства пластинчатых теплообменных аппаратов, материалом которых является AISI 316L, а также методом послойного наплавления акрилонитрил-бутадиенстирола.

Гофрированные пластины 2 в каждом пакете 3 не соприкасаются друг с другом по всей длине, как у многих аналогов, а размещены с соблюдением зазора между ними, оптимизированного для обеспечения беспрепятственного течения взаимодействующих фаз. Такая конструкция существенно уменьшает области низкого потока, снижая вероятность накопления твердых частиц и последующего образования нагара или коксования [5].

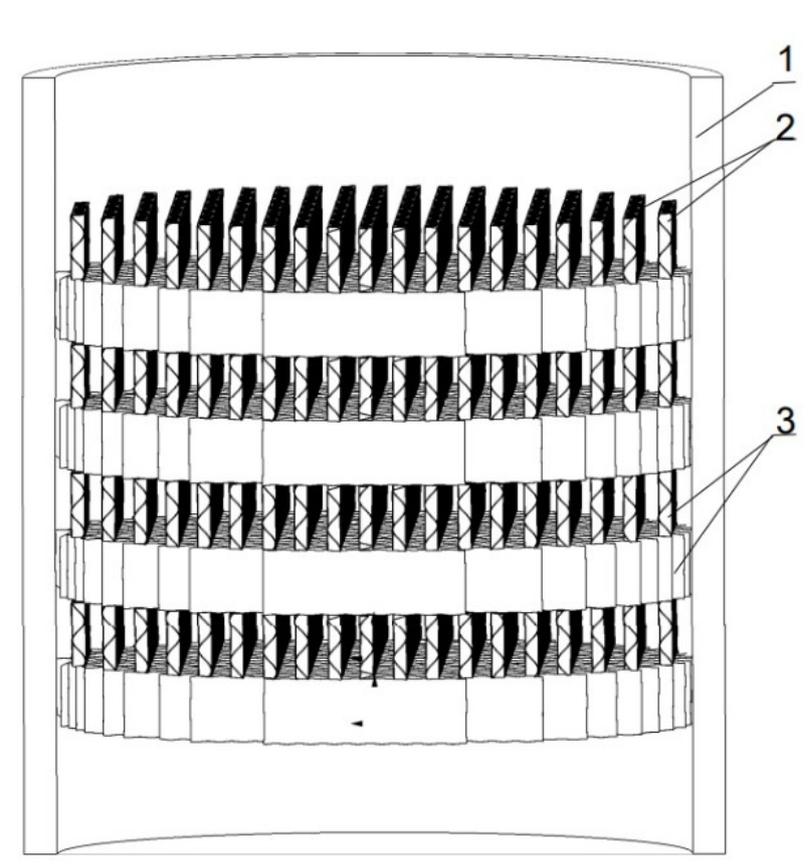


Рисунок 1 - Конструкция регулярной насадки:
1 - колонна; 2 - гофрированные пластины; 3 - пакеты
DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2024.142.115.1>

Изготовление прототипа предлагаемой конструкции было выполнено с использованием отходов от производства пластинчатых теплообменников, а также с применением технологии слоевой наплавки термопластичного материала акрилонитрил-бутадиенстирола. Основные геометрические характеристики рассматриваемой насадки представлены в таблице 1.

Таблица 1 - Основные геометрические характеристики рассматриваемых насадок

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2024.142.115.2>

Тип насадки	Удельная поверхность, м ² /м ³	Свободный объём, м ³ /м ³	Эквивалентный диаметр канала, м
Исследуемая насадка 20x10	270	0,077	0,0011
Кольца Рашига 25x25x3	204	0,7	0,0137

Для определения характеристик контактного устройства, в лабораторных условиях использовались неядовитые и негорючие газы и жидкости (система «воздух-вода»). Исследуемая насадка загружалась в колонну диаметром 0,2 м состоящую из стеклянных царг (см. рис. 2). В процессе экспериментов измерялись необходимые для расчета параметры: расход воды на входе в колонну, расход воздуха на входе в колонну, температура воды на входе и выходе из колонны, температура воздуха на входе и выходе из колонны, относительная влажность воздуха на входе в колонну. Подробное описание экспериментальной установки приводится в [6]. Линейная скорость воздуха, нагнетаемого снизу колонны, ограничена характеристиками используемого воздухоподъемного агрегата и составляет 1,2 м/с. Вода, подаваемая на орошение колонны, подогревалась до 45 °С. Расход воды подаваемой на орошение сверху колонны, варьировался в диапазоне от 0,127 до 0,6 м³/ч.

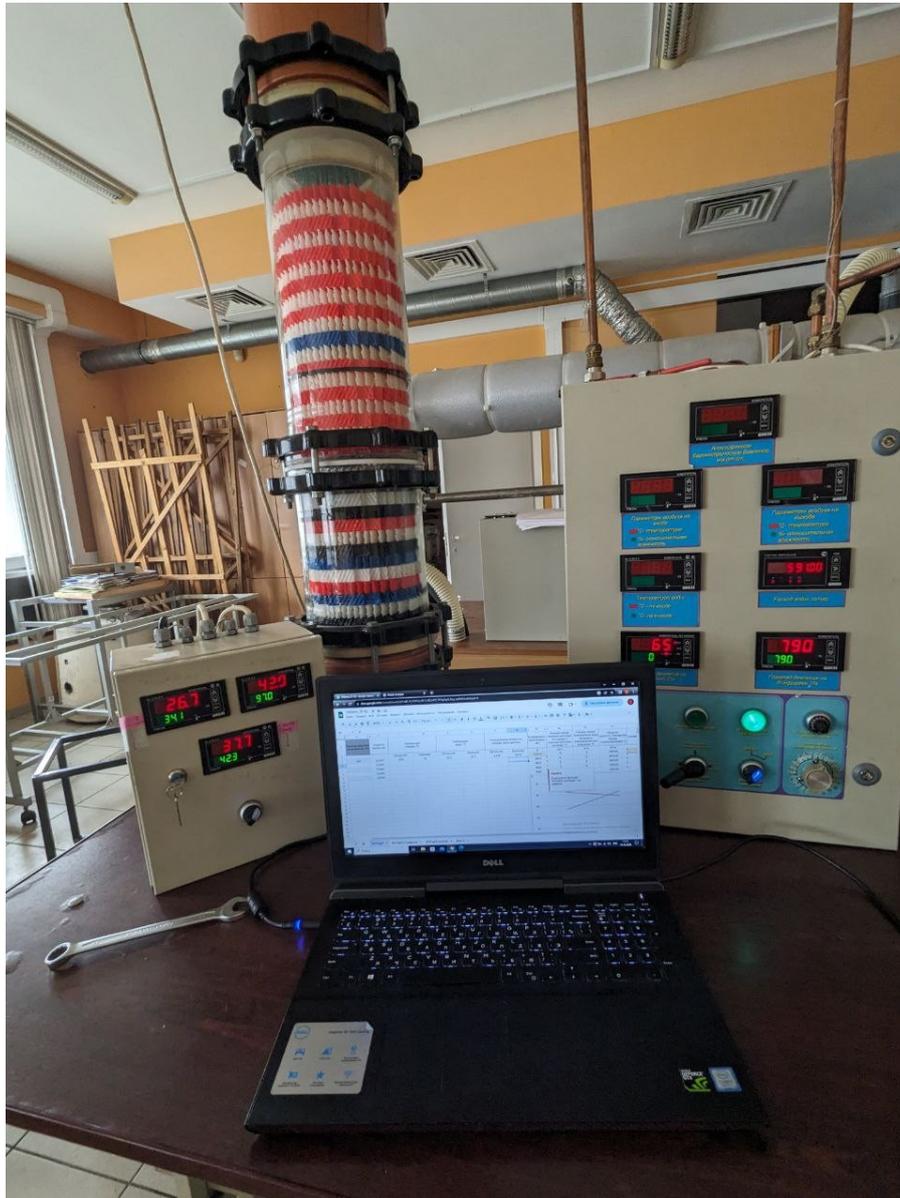


Рисунок 2 - Общий вид экспериментальной установки
DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2024.142.115.3>

Для оценки эффективности структурированной насадки применительно к процессу испарительного охлаждения воды, используя полученные в ходе эксперимента параметры системы «воздух-вода» и существующие методики расчёта [6], [7], [8], получены гидравлические и тепломассообменные характеристики рассматриваемого контактного устройства.

Испарительное охлаждение жидкости происходит вследствие тепломассообменных процессов, происходящих при контакте жидкости и газа. Этот процесс в основном обусловлен испарением жидкости с ее поверхности и теплопередачей при контакте теплоносителей. «Движущей силой» процесса испарения является разность парциальных давлений пара у поверхности воды и в ядре воздушного потока. При теплоотдаче движущей силой является разность температур воды и воздуха. Испарение жидкости приводит к уменьшению ее объема и температуры.

В описании тепломассообменных аппаратов поток жидкой фазы принято указывать в виде плотности орошения. Это мера, которая отражает объем жидкости, проходящей через единицу площади за единицу времени. Плотность орошения важна для оценки эффективности процесса тепло- и массообмена, поскольку она влияет на распределение жидкости в насадке и, соответственно, на эффективность контакта между фазами. Поток газа принято описывать через F-фактор, который представляет собой соотношение между скоростью газа и его плотностью. Этот показатель используется для оценки режимов работы аппарата и влияния газового потока на процессы массо- и теплообмена. F-фактор является ключевым параметром в оценке работы насадочных колонн, характеризующим соотношение между скоростью газового потока и его плотностью. Он выражается через скорость газа, деленную на квадратный корень из его плотности, и играет важную роль в анализе гидравлических условий внутри колонны, включая перепады давления и риск затопления. В контексте нашего исследования, где мы вводим новую конструкцию регулярной насадки, F-фактор помогает оценить её способность обеспечивать эффективный массообмен при минимальных потерях давления и максимальном сохранении производительности системы, даже в условиях повышенного газового потока.

Математически F-фактор выражается как скорость газа (м/с), деленная на квадратный корень из плотности газа (кг/м³) [9, С. 10].

Перепад давления насадочной колонны отражает гидравлическое сопротивление, преодолеваемое взаимодействующими потоками. Использование внутренних устройств, создающих низкое сопротивление позволяет снизить гидравлические потери на аппарате, а следовательно нагрузку на компрессор.

В процессе определения гидравлических характеристик регулярной насадки был учтен вклад самой экспериментальной колонны. Сначала был определен перепад давления на пустой колонне, что позволило оценить сопротивление опорного устройства, поддерживающего насадочный слой в колонне. Следующим этапом стало определение перепада давления в колонне, заполненной структурированной насадкой. Результаты этих испытаний (см. рис. 3) позволяют оценить влияние конкретного вида насадки на гидравлическое сопротивление в колонне.

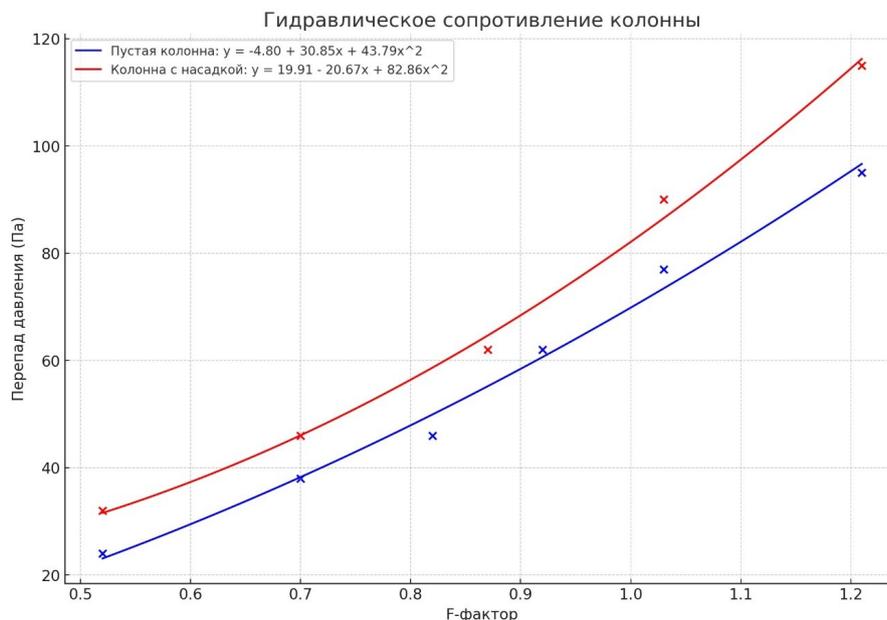


Рисунок 3 - Гидравлическое сопротивление колонны
DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2024.142.115.4>

Как видно, с увеличением скорости воздуха перепад давления также увеличивается. При скоростях воздуха ниже 0,7 м/с эти зависимости почти линейные, но при более высоких скоростях воздуха кривая сильнее отклоняется вверх, указывая на нелинейное увеличение перепада давления что особенно заметно при скоростях, приближающихся к отметке в 1,2 м/с.

Эти данные будут использоваться в дальнейшем для верификации результатов, полученных с помощью программ вычислительной гидродинамики (CFD). Использование методов вычислительной гидродинамики позволяет проводить численные эксперименты, моделирующие поведение жидкостей в различных условиях, включая сложные гидравлические системы, такие как колонны с насадкой. Сравнение данных из реальных испытаний с результатами, полученными при помощи CFD-пакетов, обеспечит дополнительную проверку и понимание эффективности насадки, а также поможет в дальнейшем улучшении рассматриваемой конструкции насадочных устройств.

В целях первоначального анализа, результаты испытаний новой конструкции сопоставлялись с данными, полученными на той же колонне для хорошо изученной насадки типа колец Рашига. Плотность орошения в обоих случаях составляла 17м³/м²·час. Это позволяет наглядно сравнить характеристики рассматриваемых насадок в идентичных условиях.

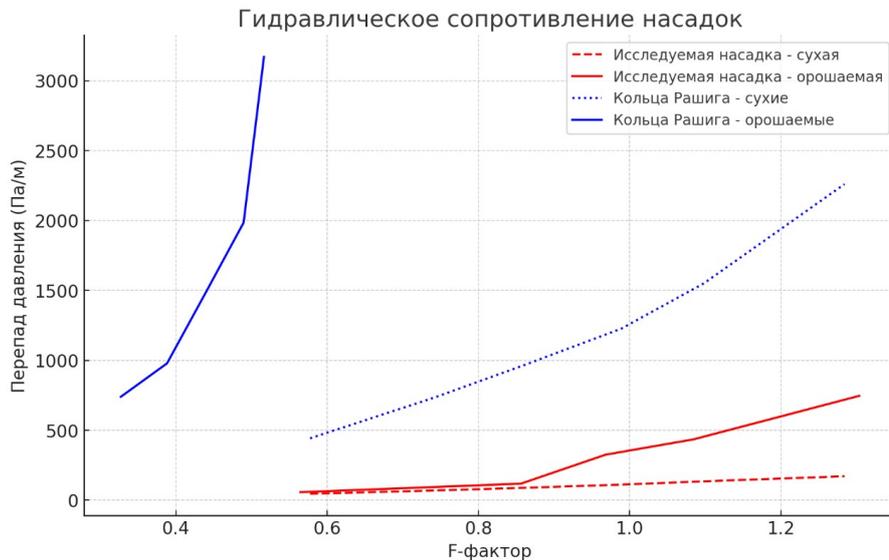


Рисунок 4 - Гидравлическое сопротивление насадок
DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2024.142.115.5>

Анализ полученных данных показывает значительные преимущества новой конструкции насадки по сравнению с кольцами Рашига (см. рис. 4). При сравнении перепада давления между новой конструкцией насадки и кольцами Рашига, было обнаружено, что в колонне, заполненной кольцами Рашига, происходило затопление при значении F-фактора 0,5. В то же время, колонна с новой насадкой показала гораздо лучшие результаты, не достигая предела производительности по газу и жидкости даже при высоких нагрузках, что подчеркивает возможность её более эффективной работы и устойчивость к высоким нагрузкам.

Передача энергии в рассматриваемой системе «воздух-вода» происходит помимо механизма теплоотдачи ещё и за счёт испарения воды с её поверхности. Основное сопротивление процессу теплообмена сосредоточено в газовой фазе, так как коэффициент теплоотдачи в жидкой фазе примерно в 15 раз больше, чем коэффициент теплоотдачи в газовой фазе, следовательно, можно считать, что коэффициент теплопередачи приблизительно равен коэффициенту теплоотдачи в газовой фазе.

Для определения коэффициента теплопередачи было рассчитано общее количество теплоты, затраченной на испарение воды, с использованием изменения температуры воды на входе и выходе из колонны, которое сравнивали с изменением температуры воздуха, чтобы оценить эффективность теплообмена.

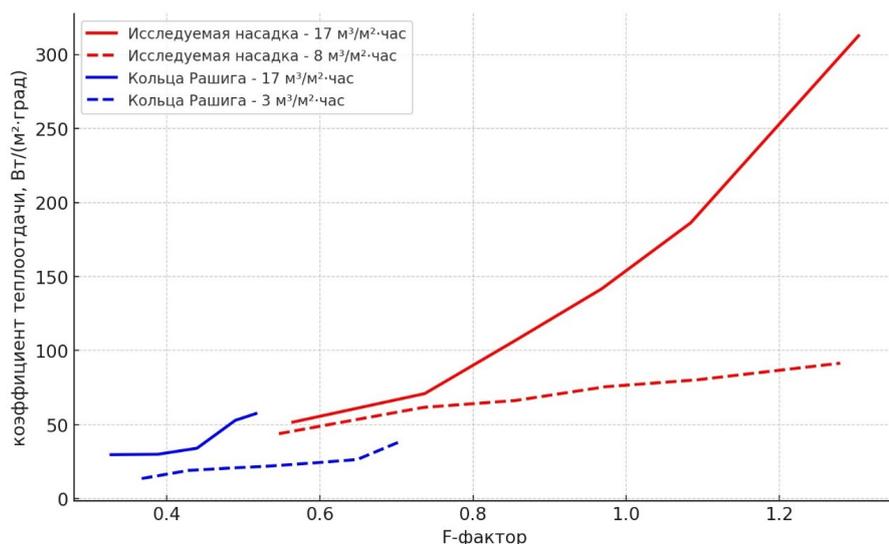


Рисунок 5 - Теплообменная характеристика насадки
DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2024.142.115.6>

Исследуемая насадка в рассматриваемых условиях оказалась более эффективна в передаче теплоты по сравнению с кольцами Рашига и способна работать при более высоких значениях нагрузки по жидкости и газу, в то время как колонна, загруженная насадкой типа колец Рашига, достигла своего гидравлического предела (см. рис. 5).

Для определения коэффициента массопередачи рассчитывали количество испаренной воды, используя разницу влагосодержания воздуха на входе и выходе из колонны при рассматриваемых условиях. При рассмотрении системы «воздух-вода», коэффициент массопередачи при испарении воды в воздух можно считать равным коэффициенту массоотдачи газовой фазы, учитывая, что процесс испарения происходит с поверхности воды и сопротивление жидкой фазы теплопереносу минимально. Это предполагает, что основным ограничением эффективности теплопереноса является сопротивление в газовой фазе.

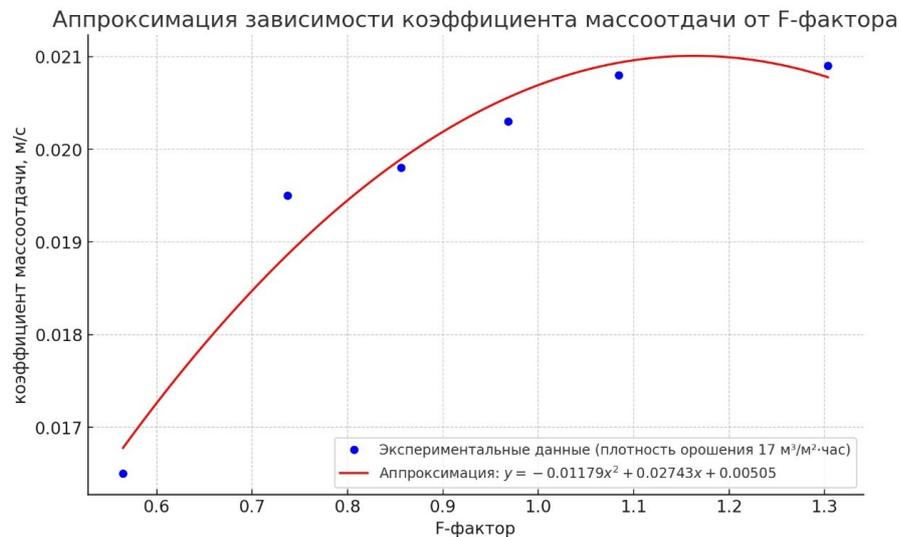


Рисунок 6 - Массообменная характеристика насадки
 DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2024.142.115.7>

Зависимость коэффициента массоотдачи от F-фактора не является линейной. Это указывает на более сложную связь между этими двумя переменными. Полином второго порядка, использованный для аппроксимации экспериментальных данных, позволяет достоверно определять коэффициент массоотдачи для рассматриваемой системы при различных значениях F-фактора в пределах исследуемого диапазона, что полезно в инженерных и научных расчетах. Следует учитывать, что достоверность аппроксимированной зависимости ограничивается диапазоном рассмотренных нагрузок по газу и жидкости, а прогнозы за пределами этого диапазона могут быть неточными. Для создания более точной математической модели потребуются провести дополнительные измерения для расширения диапазона данных при больших нагрузках по жидкости и газу.

Заключение

Проведённые испытания продемонстрировали преимущества рассматриваемой конструкции. Новая насадка отличается низким гидравлическим сопротивлением при развитии достаточной поверхности контакта, что при сохранении эффективности осуществляемого процесса позволит снизить энергопотребление для его проведения.

Рассмотренная конструкция демонстрирует потенциал для различных применений в химической технологии, особенно в «тяжёлых условиях» эксплуатации и в вакуумных колоннах, где низкое гидравлическое сопротивление имеет решающее значение. Потенциал к снижению образования загрязнений на поверхности приводит к снижению потребности в обслуживании и увеличению срока службы, что делает ее ценным активом в «тяжелых» условиях процессов химической технологии.

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Вайнштейн Д.Л., НТВП "Поверхность", Москва, Российская Федерация
 DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2024.142.115.8>

Conflict of Interest

None declared.

Review

Wainstein D.L., Surface Phenomena Researches Group, Moscow, Russian Federation
 DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2024.142.115.8>

Список литературы / References

- Сокол Б.А. Насадки массообменных колонн / Б.А. Сокол, А.К. Чернышев, Д.А. Баранов [и др.] — М.: Инфохим, 2009. — 358 с.
- Зиберт Г.К. Объемные насадки / Г.К. Зиберт, Т.М. Феоктистова. — М.: Газпром, 2002. — С. 52.
- Krela M. High Performance Internals in Severe Service / M. Krela, M. Shah, P. Weiss // DigitalRefining. — 2020. — P. 141-147.
- Лагуткин М.Г. Оптимизация конструкции короткослойной насадки градилен / М.Г. Лагуткин, Н.П. Цурикова, А.С. Пушнов // Энергосбережение и водоподготовка. — 2017. — №. 1. — С. 23-26.

5. Пат. 214657 U1 Российская Федерация, F28F 25/00. Регулярная насадка для процессов теплообмена / Савенко С.А. — № 2022108783; заявл. 01.04.22; опубл. 09.11.22.
6. Кутепов А.М. Практикум по процессам и аппаратам химической технологии / А.М. Кутепов, Д.А. Баранов, В.В. Бутков [и др.] — М.: Академия, 2005. — Т. 328.
7. Берман Л.Д. Испарительное охлаждение циркуляционной воды / Л.Д. Берман. — Госэнергоиздат, 1957.
8. Липин А.А. Исследование процесса испарительного охлаждения / А.А. Липин, А.Г. Липин, В.О. Небукин. — Иваново: ИГХТУ, 2018. — 28 с.
9. Алиев Э.К. Сравнительные тепло-и массообменные испытания пакетных насадок с пленочным и капельным течением жидкости / Э.К. Алиев, В.В. Володин, В.В. Голуб // Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Серия «Естественные науки». — 2019. — №. 4 (85). — С. 4-21.
10. Беренгартен М. Совершенствование насадочных контактных устройств массообменных аппаратов / М. Беренгартен, А. Пушнов // Industrial Processes and Technologies. — 2023. — Т. 3. — №. 2 (9). — С. 51-67.
11. Аксельрод Ю.В. Газожидкостные хемосорбционные процессы. Кинетика и моделирование / Ю.В. Аксельрод. — Москва: Химия, 1989. — 239 с.
12. Пушнов А.С. Совершенствование конструкций контактных устройств для градирен / А.С. Пушнов, А. Сакалаускас. — Санкт-Петербург: Политех-Пресс, 2020. — 380 с.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Sokol B.A. Nasadki massoobmennykh kolonn [Mass Transfer Column Nozzles] / B.A. Sokol, A.K. Chernyshev, D.A. Baranov [et al.] — М.: Infohim, 2009. — 358 p. [in Russian]
2. Zibert G.K. Ob'emnye nasadki [Volumetric Nozzles] / G.K. Zibert, T.M. Feoktistova. — М.: Gazprom, 2002. — P. 52. [in Russian]
3. Krela M. High Performance Internals in Severe Service / M. Krela, M. Shah, P. Weiss // DigitalRefining. — 2020. — P. 141-147.
4. Lagutkin M.G. Optimizacija konstrukcii korotkosloevoy nasadki gradiren [Optimization of Short Layer Cooling Tower Nozzle Design] / M.G. Lagutkin, N.P. Curikova, A.S. Pushnov // Jenergosberezhenie i vodopodgotovka [Energy Saving and Water Treatment]. — 2017. — №. 1. — P. 23-26. [in Russian]
5. Pat. 214657 U1 Rossijskaja Federacija, F28F 25/00. Reguljarnaja nasadka dlja processov teplomassoobmena [Pat. 214657 U1 Russian Federation, F28F 25/00. Regular nozzle for heat-and-mass transfer processes] / Savenko S.A. — № 2022108783; appl. 01.04.22; publ. 09.11.22. [in Russian]
6. Kutevov A.M. Praktikum po processam i apparatam himicheskoj tehnologii [Workshop on Processes and Apparatuses of Chemical Technology] / A.M. Kutevov, D.A. Baranov, V.V. Butkov [et al.] — М.: Academia, 2005. — Vol. 328. [in Russian]
7. Berman L.D. Isparitel'noe ohlazhdenie cirkuljacionnoj vody [Evaporative Cooling of Circulation Water] / L.D. Berman. — Gosjenergoizdat, 1957. [in Russian]
8. Lipin A.A. Issledovanie processa isparitel'nogo ohlazhdenija [A Study of Evaporative Cooling] / A.A. Lipin, A.G. Lipin, V.O. Nebukin. — Ivanovo: IGHTU, 2018. — 28 p. [in Russian]
9. Aliev Je.K. Sravnitel'nye teplo-i massoobmennye ispytaniya paketnykh nasadok s plenochnym i kapel'nym techeniem zhidkosti [Comparative Heat-and-Mass Exchange Tests of Packet Nozzles with Film and Droplet Liquid Flow] / Je.K. Aliev, V.V. Volodin, V.V. Golub // Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta im. NJe Baumana. Serija «Estestvennye nauki» [Bulletin of the Moscow State Technical University named after N.E. Bauman. Series "Natural Sciences"]. — 2019. — №. 4 (85). — P. 4-21. [in Russian]
10. Berengarten M. Sovershenstvovanie nasadochnykh kontaktnykh ustrojstv massoobmennykh apparatov [Improvement of Nozzle Contact Devices for Mass Transfer Devices] / M. Berengarten, A. Pushnov // Industrial Processes and Technologies. — 2023. — Vol. 3. — №. 2 (9). — P. 51-67. [in Russian]
11. Aksel'rod Ju.V. Gazozhidkostnye hemosorbcionnye processy. Kinetika i modelirovanie [Gas-liquid Chemisorption Processes. Kinetics and Modelling] / Ju.V. Aksel'rod. — Moscow: Himija, 1989. — 239 p. [in Russian]
12. Pushnov A.S. Sovershenstvovanie konstrukcij kontaktnykh ustrojstv dlja gradiren [Improvement of Contact Device Designs for Cooling Towers] / A.S. Pushnov, A. Sakalauskas. — St. Petersburg: Politech-Press, 2020. — 380 p. [in Russian]