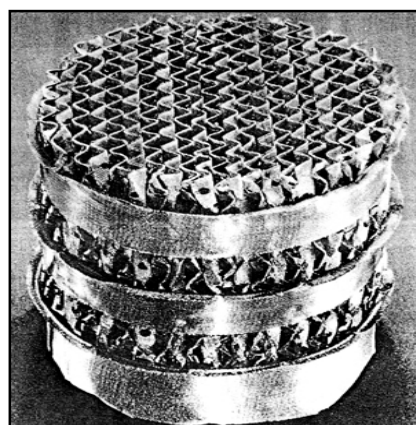


А.М. КАГАН, А.Г. ЛАПТЕВ, А.С. ПУШНОВ, М.И. ФАРАХОВ

КОНТАКТНЫЕ НАСАДКИ ПРОМЫШЛЕННЫХ ТЕПЛОМАССОБМЕННЫХ АППАРАТОВ



МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего
профессионального образования
КАЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ
ИНЖЕНЕРНО-ВНЕДРЕНЧЕСКИЙ ЦЕНТР «ИНЖЕХИМ»
(ИНЖЕНЕРНАЯ ХИМИЯ)

А.М. КАГАН, А.Г. ЛАПТЕВ, А.С. ПУШНОВ, М.И. ФАРАХОВ

**КОНТАКТНЫЕ НАСАДКИ ПРОМЫШЛЕННЫХ
ТЕПЛОМАССОБМЕННЫХ АППАРАТОВ**

Под редакцией А.Г. Лаптева

Монография

Казань

2013

УДК 66.048.37+66.015.23

ББК 35.113

Рецензенты: **Комиссаров Ю.А.** доктор техн. наук, профессор (РХТУ им. Д.И. Менделеева), **Витковская Р.Ф.** доктор техн. наук, профессор (Санкт-Петербургский ГУТД), **Николаев А.Н.** доктор техн. наук, профессор (КНИТУ (КХТИ))

А.М. Каган, А.Г. Лаптев, А.С. Пушнов, М.И. Фарахов

Контактные насадки промышленных тепломассообменных аппаратов. Монография. Под ред. Лаптева А.Г. – Казань: Отечество, 2013, - 454 с.

В книге рассмотрены конструкции, области применения и методы расчета насадочных контактных устройств промышленных колонных аппаратов. Даны гидравлические и тепломассообменные характеристики различных насадок. Представлено обобщение экспериментальных данных различных исследователей по ряду важных параметров насадочного слоя. Приведены математические модели для расчета насадочных колонн. Рассмотрены методы интенсификации процессов и совершенствования конструкций насадочных элементов.

Монография предназначена для научных и инженерно-технических работников, проектировщиков аппаратов для нефтехимии и энергетики. Может быть полезной для преподавателей, аспирантов и студентов старших курсов технических вузов.

ISBN 978-5-9222-0664-8

© Каган А.М., Лаптев А.Г., Пушнов А.С., Фарахов М.И.

THE MINISTRY OF EDUCATION AND SCIENCE OF THE RUSSIAN FEDERATION
Federal state-financed educational institution of higher professional education

KAZAN STATE POWER ENGINEERING UNIVERSITY

MOSCOW STATE UNIVERSITY OF MECHANICAL ENGINEERING

ENGINEERING-PROMOTIONAL CENTER "INZHEKHIM"
(ENGINEERING CHEMISTRY)

A.M. KAGAN, A.G. LAPTEV, A.S. PUSHNOV, M.I. FARAKHOV

**CONTACT PACKINGS OF INDUSTRIAL HEAT AND MASS TRANSFER
APPARATUSES**

Under the editorship of A.G. Laptev

Monograph

Kazan

2013

UDC 66.048.37+66.015.23

LBC 35.113

Reviewers: **Komissarov Yu.A.** Doctor of Technical Sciences, Professor (D. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia), **Vitkovskaya R.F.** Doctor of Technical Sciences, Professor (Saint-Petersburg State University of Technology and Design), **Nikolaev A.N.** Doctor of Technical Sciences, Professor (Kazan National Research Technological University)

A.M. Kagan, A.G. Laptev, A.S. Pushnov, M.I. Farakhov

Contact packings of industrial heat and mass transfer apparatuses. Monograph. Edited by Laptev A.G. – Kazan: Otechestvo, 2013, - 454 p.

The book is concerned with designs, applications and calculation techniques for packed-type contact devices of industrial columns. Hydraulic and heat and mass transfer characteristics for various packings are detailed. Given also are compiled experimental data for a number of essential parameters of the packed layer obtained by various researchers. Mathematical models capable of being used for calculations of packed columns are presented. Methods of process intensifications and improvements of designs of packing elements are described.

The monograph is to be used by scientists, chemical engineers, design engineers involved in developing designs of apparatuses used in petrochemistry and power engineering. The monograph could be also useful for college professors, graduate students and undergraduate senior students of engineering schools.

ISBN 978-5-9222-0664-8

© Kagan A.M., Laptev A.G., Pushnov A.S., Farakhov M.I.

ВВЕДЕНИЕ

Такие простейшие приемы, как развитие поверхности контакта жидкости и газа, увеличение скорости движения одной фазы относительно другой, легли в основу организации всех современных промышленных массо-теплообменных процессов, таких, как абсорбция и ректификация, а также охлаждения сред при непосредственном контакте фаз, в том числе испарительного охлаждения воды в градирнях и др. Однако потребовались столетия, усилия и опыт многих поколений, чтобы используя упомянутые очевидные нам сегодня приемы, подойти к современным конструкциям промышленных аппаратов, в которых перенос тепла и массы организован с позиций сегодняшнего дня технически наиболее совершенно.

Первыми массообменными аппаратами были простейшие устройства, лишенные внутренних конструктивных элементов, в которых был организован противоток фаз. Далее перешли к загрузке в аппараты тел неправильной формы (насадок), при смачивании которых развивалась поверхность контакта взаимодействующих потоков, увеличивалась их турбулизация. Уже в начале XIX века в качестве насадки применялись деревянная щепка, гравий, куски гранита, кокса и др. Первая насадка правильной формы – стеклянные бусы, чуть позже фарфоровые шарики.

Лишь в 1914 году была изобретена ныне всемирно известная насадка, имеющая форму кольца, диаметр которого равен высоте – кольца Рашига [342]. Вскоре была установлена важная закономерность: коэффициент полезного действия фракционирующей колонны с кольцами изменяется обратно пропорционально диаметру колец, так что если диаметр кольца увеличивается вдвое, то и высота слоя насадки в колонне должна быть удвоена.

Приблизительно в то же время началось использование первой регулярной насадки из древесины, представляющей собой доски или планки, уложенные перпендикулярно основным направлениям потоков. Постепенно создавались и другие новые насадки, загружаемые в аппараты хаотически, или имеющие организованную структуру. Росли линейные скорости газа, расходы жидкости в расчете на единицу поперечного сечения аппарата, т.е. росла пропускная способность, повышалась эффективность процесса, что в совокупности вело к сокращению габаритов и снижению материалоемкости аппаратов.

Однако темпы разработки и внедрения новых типов насадок были не слишком велики. Так в середине XX века в мировой промышленной практике использовалось чуть более 10 различных насадок правильной формы. Среди них длительное время лидирующее положение занимала высокоэффективная насадка – кольца Палля [392]. В СССР использовались по-прежнему в основном керамические кольца Рашига.

Лишь в последние десятилетия прошлого века появилось много новых конструкций нерегулярных и регулярных насадок. Среди них различные модификации колец Палля и седловидных насадок, миникольцевые насадки и др.

Сегодня массообменные колонные аппараты с использованием насадочных контактных устройств находят весьма широкое применение в химической, нефтехимической, медицинской, пищевой и других отраслях промышленности. Удельный вес этого оборудования приближается к 30% по

отношению ко всему оборудованию химических производств, т.е. фактически занимает первое место по своим масштабам и материалоемкости. Практически не существует ни одного крупнотоннажного производства, как органических, так и неорганических продуктов, где на той или иной стадии технологического процесса не использовались бы массообменные насадочные аппараты для осуществления процессов абсорбции или ректификации, теплообмена при непосредственном контакте фаз. Весьма велик объем использования различных насадок в испарительных градирнях.

Известные виды контактных устройств можно разделить на две основные группы: насадочные, а также тарельчатые. Каждая из них имеет свои достоинства и недостатки.

Насадочные контактные устройства обладают более низким гидравлическим сопротивлением и большей пропускной способностью.

В тарельчатых аппаратах движение потоков более организовано и путем совершенствования конструкции тарелок можно достигнуть их достаточно высокой эффективности.

Высокая эффективность может быть достигнута и в насадочных аппаратах путем уменьшения размера насадки. Однако при этом в равной степени снижается пропускная способность, и увеличивается гидравлическое сопротивление.

Стремление к созданию аппаратов большой единичной мощности с повышенными нагрузками по газу и жидкости, обусловило в последние годы тенденцию к возрастанию использования насадочных контактных устройств. Причем даже в тех отраслях, где ранее традиционно преобладали тарельчатые контактные устройства, таких, например, как нефтехимия. Насадочные колонны с высокоэффективной и сравнительно недорогой насыпной насадкой при правильной организации в них гидродинамического режима во многих случаях могут оказаться значительно более экономичными, чем тарельчатые колонны. Более того, если производится переработка высокоагрессивных продуктов, или требующих малого времени

пребывания жидкости в колонне, то в этих случаях применение насадочных колонн является единственно возможным. В конечном счете, все же вопрос о выборе конструкции контактного устройства может быть решен только после тщательного и всестороннего анализа конкретных условий процесса, т.е. в результате технико-экономического расчета.

Насадочные контактные устройства в настоящее время изготавливаются в основном из металла, полимерных материалов и керамики. При этом керамические насадки, которые исторически начали использоваться ранее других, имеют значительно меньшую стоимость. Естественен вопрос о выборе материала насадок для условий различных температур и коррозионных сред. В значительном числе процессов по условиям термической и коррозионной стойкости использование насадок из полимеров исключается, а из обычной керамики ограничено. Нельзя не отметить значительного разрушения керамических насадок при их загрузке в колонные аппараты, а также при гидроударах и в результате эрозии, что на практике вызывает необходимость частых замен насадки. Кроме того, насадки из керамики обладают худшими гидродинамическими показателями, чем насадки идентичной формы из других материалов. Из сказанного следует, что, несмотря на более высокую стоимость, для значительного числа процессов предпочтительными являются металлические насадки, причем во многих случаях – насадки из нержавеющей стали.

К насадочным контактным устройствам предъявляются следующие (определенные) технологические требования [178, 288,392, 412]:

- высокая эффективность;
- низкое гидравлическое сопротивление;
- высокая пропускная способность;
- малая удерживающая способность.

Для выполнения этих требований насадка должна иметь, в первую очередь, по возможности высокую долю свободного объема и развитую геометрическую поверхность. Одновременно конструкция насадки должна

обеспечивать наиболее полное омывание всей поверхности контактирующими потоками.

Важнейшими требованиями к насадке являются также простота технологии изготовления, низкая материалоемкость (этим определяется ее стоимость), а также коррозионная стойкость, прочность. Часто трудности изготовления сводят на нет все положительные качества насадки новой конструкции и вынуждают отказаться от нее. Насадка, обладающая достаточно хорошими технологическими характеристиками, может быть рекомендована для широкого использования, если разработана (и в достаточной степени простая) технология ее массового производства. Только в этом случае можно утверждать, что создана промышленная насадка.

Говоря о противоточном движении газа и жидкости в насадочных контактных устройствах, в ходе которого извлекается компонент из жидкой фазы и переходит в газовую (или наоборот), прежде всего необходимо правильно оценивать, создающуюся в насадочном слое гидродинамическую обстановку. Это важно, поскольку последняя, во-первых, напрямую связана со скоростью движения потоков, т. е. диаметром аппарата и, во-вторых, имеет самое непосредственное воздействие на эффективность массопереноса.

Поэтому в книге акцентируется внимание на влияние на интенсивность процессов тепломассопереноса в первую очередь гидродинамических факторов, складывающейся гидродинамической обстановки.

Рассматривается также влияние на упомянутые выше процессы конструктивных элементов насадки, в том числе одного из важнейших – перфорации, ее площади и размеров. Также рассматривается влияние геометрических характеристик насадки и, в первую очередь, размера насадочных элементов и их удельной поверхности.

Дается всесторонний анализ роли активной поверхности, как определяющего фактора в процессах массопереноса в насадочном слое. Рассматривается влияние различных факторов, в том числе гидродинамических, а также формы и геометрических характеристик насадки

на формирование активной поверхности и ее масштаб. Рассматривается взаимоотношение активной и удельной поверхности, влияние на это соотношение различных факторов. Вводится понятие о коэффициенте полезного использования поверхности насадки. Рассматривается влияние на него различных факторов, в том числе размера элементов.

Рассматривается взаимосвязь массообменных и гидродинамических характеристик насадки, их взаимное влияние. Обсуждается возможность оценки эффективности насадки по результатам ее гидродинамических испытаний.

При перенесении результатов исследований гидродинамических и массообменных характеристик насадок, полученных на опытных установках относительно небольшого масштаба, на промышленные аппараты, особенно большого диаметра, справедливо вызывает опасение, подтвержденное опытом эксплуатации, что установленная в ходе исследований эффективность не может быть сохранена. Это связано, в первую очередь, с неизбежным изменением характера движения и распределения потоков в поперечном сечении аппаратов. Таким образом, вопрос о моделируемости тепло-массообменных процессов в присутствии насадочных контактных устройств становится одним из важнейших для практики.

Насадочные контактные устройства можно разделить на две основные группы: нерегулярные насадки (загружаемые в аппарат хаотически, внавал) и регулярные (имеющие в аппарате упорядоченную структуру, которая полностью воспроизводится во всех сечениях аппарата по высоте насадочного слоя). Регулярные насадки по сравнению с нерегулярными имеют определенные преимущества: более организованный контакт фаз, более низкое гидравлическое сопротивление, большая пропускная способность при равной удельной поверхности. Однако у них есть существенный недостаток: для эффективности их работы предъявляются повышенные требования к равномерности начального распределения жидкости и газа (равными порциями в каждый канал).

Обеспечить это тем труднее, чем больше диаметр аппарата и меньше размер насадки. И хотя объем использования регулярных насадок растет (особенно в процессах вакуумной и низкотемпературной ректификации), все же в промышленности пока еще в значительно большей степени используются, имеющие более низкую стоимость нерегулярные насадки, особенно в крупнотоннажных агрегатах с массообменными аппаратами большого диаметра для осуществления процессов абсорбции-десорбции.

Тенденция к созданию агрегатов большой единичной мощности обусловила появление в последние десятилетия многих новых конструкций, как нерегулярных, так и регулярных насадок, обладающих более высокой пропускной способностью и несколько большей эффективностью. В настоящее время большое внимание продолжает уделяться совершенствованию контактных насадочных элементов. Это связано, помимо требования значительного увеличения жидкостных и газовых нагрузок в массообменных аппаратах, с развитием вакуумной ректификации высококипящих продуктов, когда применение тарельчатых контактных устройств нерационально, поскольку не обеспечивает требуемого качества разделения.

Обилие известных типов насадок, различия в характере их укладки и широкий диапазон материалов, из которых они изготавливаются, вызывают необходимость постоянного изучения накопленного мирового опыта в данном вопросе. В этой связи можно упомянуть ряд обзоров [75,126,129,131,142,178,182,189,203,233,255,301] и справочных изданий [260,277,293] по рассматриваемой тематике, а также ряд монографий [288,299,328,392,412,416,421], в которых с разной степенью подробностей представлены различные типы насадочных элементов и некоторые их характеристики.

Данная книга не предполагает ознакомления с существующими многочисленными конструкциями насадок. Будут упомянуты лишь те, которые нашли себе наиболее широкое промышленное использование.

Важным этапом при разработке проекта насадочного аппарата является расчет его основных габаритных размеров и технологических узлов. Главными искомыми в этих расчетах являются два основных размера: диаметр аппарата, который оценивается на основании гидродинамического расчета, и высота слоя насадки. Последняя определяется на основе массообменного расчета.

Наряду с изложением основных положений расчета насадочных аппаратов рассматриваются техно-экономические показатели работы насадочных аппаратов, на основе расчета которых может быть сделан выбор оптимальной конструкции насадки и ее размера [255,291,295,296].

Обсуждаются перспективы интенсификации работы насадочных аппаратов, в том числе связанные с разработкой новых и совершенствованием существующих конструкций насадок.

Оценивая поступательное движение в создании новых конструкций насадочных элементов в последние десятилетия, как мы уже говорили, приходится констатировать замедление прироста показателей, как гидродинамических, так и массообменных. С большим трудом и, видимо, это закономерно, дается прирост каждого процента эффективности и пропускной способности насадок без увеличения, например, гидравлического сопротивления, тем более - одновременное улучшение всех этих трех показателей.

Разработать сегодня новую конструкцию насадки, претендующую стать новой промышленной насадкой, совсем непросто. Для этого нужно сочетание знаний в области аэро- и гидродинамики, тепло- и массообмена, сопромата, экономики. Нужна, наконец, инженерная интуиция, базирующаяся на большом опыте и многих знаниях. Несмотря на указанные выше трудности, или вопреки им, нет сомнения, что поступательное движение в этой области техники будет продолжаться.

Данная работа является коллективной монографией, написанной авторами, имеющими большой опыт в разработке, исследовании и внедрении насадочных контактных устройств в промышленности.

Авторы выражают рецензентам большую благодарность за сделанные ценные замечания и пожелания, а также сотрудникам Инженерно – внедренческого центра «Инжехим» и Казанского государственного энергетического университета принимавшим участие в экспериментальном исследовании насадок и оформлении некоторых разделов данной монографии.

ГЛАВА 1

ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕПЛО-МАССООБМЕННЫХ НАСАДОЧНЫХ УСТРОЙСТВ

1.1. Процессы с использованием насадочных устройств

Насадочные контактные устройства в качестве инструмента интенсификации процессов переноса тепла и массы на границе раздела фаз и вблизи нее путем развития поверхности контакта и улучшения перемешивания потоков используются в тепло-массообменных процессах, нашедших себе широкое применение в промышленности.

К числу процессов, используемых в наибольших масштабах, относятся абсорбция, ректификация и испарительное охлаждение воды.

Абсорбция [392,436] – избирательное поглощение газов или паров жидким поглотителем (абсорбентом). Этот процесс, в котором участвуют газовая и жидкая фазы, представляет собой переход вещества из газовой или паровой фазы в жидкую. Обратный процесс – выделение поглощенного газа или пара из поглотителя – десорбция.

Различают физическую абсорбцию и хемосорбцию. При физической абсорбции растворение газа не сопровождается химической реакцией. При

химической абсорбции абсорбируемый компонент вступает в химическую реакцию в жидкой фазе [127,167,392]. В отличие от ректификации процесс абсорбции происходит в основном однонаправленно, т.е. из газа извлекаются соответствующие компоненты, а из абсорбента в газовую фазу они практически не переходят. Аналогичная ситуация наблюдается при десорбции.

В промышленности прямой процесс (абсорбция) и обратный процесс (десорбция) чаще всего используются в сочетании: абсорбция с последующей десорбцией. Такое сочетание позволяет многократно использовать абсорбент и выделять абсорбированный компонент в чистом виде. Для этого раствор после абсорбера направляют на десорбцию, где в результате сброса давления или нагревания происходит выделение поглощенного компонента, а регенерированный абсорбент возвращают на абсорбцию. При таком круговом процессе растворитель не расходуется, а все время циркулирует через систему абсорбер-десорбер-абсорбер. При хемосорбции поглотитель регенерируют нагреванием или химическими методами.

В химической технологии сочетание абсорбции с десорбцией чаще всего используется для:

- выделения исходных компонентов, поступающих затем на синтез, из газовых смесей различного происхождения;
- на стадии подготовки для синтеза исходного газа или газовых смесей (осушка, удаление вредных примесей);
- выделения ценных компонентов из газовой смеси, полученных в результате проведения реакции или термического разложения;
- удаления вредных примесей из выбросных газов (санитарная очистка) с последующим использованием извлеченных веществ;
- улавливания ценных веществ из выбросных газов для предотвращения их потерь, а также из экологических соображений.

Из сказанного видно, что сочетание абсорбции с десорбцией, как технологическая операция, широко используется на разных стадиях производственных процессов.

В некоторых случаях используется только абсорбция (без последующей десорбции):

- для получения целевого продукта, путем поглощения газа жидкостью;
- для целей очистки газа от нежелательных примесей, если абсорбент и извлекаемый продукт являются либо отбросными продуктами или столь дешевыми, что регенерация абсорбента является экономически нецелесообразной.

Для абсорбционных процессов, призванных обеспечить выполнение вышеуказанных технологических задач, преимущественно используются насадочные контактные устройства.

Ректификация используется не менее широко, чем абсорбция. Ректификация [7] – разделение жидкой смеси на компоненты путем противоточного взаимодействия потоков пара, образующегося при испарении, и жидкости, получающейся при конденсации паров. Этот процесс включает многократно повторяющиеся переходы вещества из жидкой фазы в паровую и обратно. Однократный акт испарения, при котором в пары переходит, а затем конденсируется преимущественно легколетучий компонент – перегонка, был известен еще в древности. Он получил значительное развитие, когда из продуктов брожения крахмала и сахаросодержащих материалов научились извлекать спирт.

В отличие от абсорбции, при ректификации при каждом однократном акте процесс не происходит однонаправленно. При испарении вместе с легколетучим компонентом испаряется некоторое количество труднолетучего компонента. Поэтому при однократном акте не может получаться чистый легколетучий продукт. Нужно многократное повторение единичного акта. По этой причине для осуществления ректификации

необходимы большие затраты энергии значительно более высокие, чем при абсорбционном разделении. Но в силу того, что подобрав необходимое число следующих друг за другом единичных актов, можно выделить из смеси продукт достаточно высокой чистоты, ректификация все же нашла большое распространение.

Процесс ректификации может быть организован периодическим или непрерывным. При осуществлении непрерывной ректификации бинарных смесей – это может быть смесь компонентов с неограниченной взаимной растворимостью, смесь близкокипящих компонентов или азеотропная смесь. Для разделения смесей близкокипящих компонентов часто используется экстрактивная ректификация, при которой к бинарной смеси добавляют третий – разделяющий агент, способный резко повысить относительную летучесть основных компонентов. Азеотропные смеси разделяют путем азеотропной ректификации. Наиболее сложной является ректификация многокомпонентных смесей. Имеются различные схемы ее осуществления [141,167,129,178]. Для разделения термолабильных смесей используется вакуумная ректификация. Ректификация имеет особенно большое значение в тех производствах, где необходимо полное разделение жидких смесей на чистые компоненты или их группы.

Для осуществления процессов ректификации используются главным образом тарельчатые контактные устройства. Широкому использованию насадок для процессов ректификации, несмотря на простоту устройства и относительно низкую стоимость, препятствует их меньшая эффективность, обусловленная неравномерным распределением потоков пара и жидкости по сечению слоя насадки. Поэтому насадочные ректификационные колонны диаметром более 2-3 м на химических предприятиях встречаются редко. Однако для ректификации термолабильных веществ насадки являются незаменимыми, поскольку только сетчатые насадки в состоянии обеспечить весьма низкое гидравлическое сопротивление массообменного устройства, необходимое для осуществления процесса ректификации под вакуумом.

Насадочные контактные устройства широко используются также для охлаждения газов водой и жидкостей (преимущественно воды) воздухом или газами (если допускается их насыщение парами охлаждающей жидкости) при непосредственном контакте фаз [201,183,289].

Если осушка газов, связанная с переносом воды из газовой в жидкую фазу, по своему технологическому назначению целиком относится к массообменным процессам, то охлаждение воды воздухом, также сопровождающееся переносом воды, правда, из жидкой фазы в газовую, по технологическому назначению относится к теплообменным процессам.

Теплообмен при непосредственном контакте протекает гораздо эффективнее, чем в случае использования теплообменной аппаратуры, где противоточно движущиеся потоки разделены теплообменной поверхностью (стенкой). Термическое сопротивление этой стенки, а также загрязнений, неминуемо накапливающихся на обеих ее сторонах, снижают эффективность переноса тепла.

Весьма существенно, что при непосредственном контакте фаз значительное количество тепла отбирается за счет испарения части жидкости в газовую фазу. Все это в совокупности обеспечивает высокую эффективность охлаждения. Однако повторяем, это допустимо лишь в том случае, если технология позволяет насыщать газ парами жидкости. Такое насыщение вполне допустимо в случае испарительного охлаждения водооборотной воды в градирнях, где используются регулярные насадки. Конечно, желательно, чтобы испарение было минимальным по двум причинам. Во-первых, из-за потерь водооборотной воды, часто предварительно химически обработанной для снижения содержания солей жидкости. Во-вторых, из-за неизбежного увлажнения и загрязнения воздушного бассейна в районе градирен. С этой целью градирни оборудуются специальными устройствами, сводящими к минимуму капельный унос воды из градирен.

1.2. Области и масштабы использования

Химические предприятия можно узнать издалека по характерным колоннам. Их высота порой достигает 100 м, диаметр несколько метров. Именно в них происходят массообменные процессы – абсорбция и ректификация. В общем объеме технологического оборудования химических заводов расход металла на такое оборудование в ряде случаев достигает 60%. Значительная часть указанного оборудования приходится на насадочные аппараты.

Колонны, заполненные насадкой, широко используются во многих основных химических производствах неорганических и органических продуктов.

Насадочные контактные устройства, как нерегулярные, так и регулярные в настоящее время производятся в большом масштабе с различными фирмами. Лидирующими фирмами в Европе являются: Рашиг, Зульцер, Нуттер, Бальке-Дюрр, Хамон и др.; в США: Нортон, Кох, Масстрансфер, Глитч и др. В этих фирмах не только налажено промышленное производство насадок, но и ведутся и исследовательские работы по совершенствованию известных конструкций насадок, разработке новых конструкций, привлечению новых более современных материалов для их изготовления и др. В настоящее время изготовление насадок осуществляется также в Китае.

В Союзе в наиболее широком масштабе разработка новых конструкций массообменных насадок осуществлялось в 70÷90-е годы прошлого века. Такие работы велись в ГИПХе, ГИАПе, в Харьковском политехническом институте, в ЭМАЛЬХИММАШе и др.

Наиболее широкомасштабным из отечественных разработок было внедрение в агрегатах большой единичной мощности нерегулярной насадки ГИАП-НЗ, конкурентно способной по сравнению с лучшей промышленной насадкой того времени – кольцами Палля.

В настоящее время в России наиболее успешной, как в плане разработки новых конструкций насадок, так и их внедрении является фирма «Инжехим» (Казань).

Разработки новых конструкций насадок для испарительного охлаждения воды в градирнях велись в Союзе ВНИИВОДГЕО, ГИАПе, ГИПРОКАУЧУКе.

Как абсорбция, так и ректификация, как уже говорилось, используются на разных стадиях производственного процесса, начиная с очистки и разделения исходных смесей, заканчивая получением целевых продуктов и очисткой отбросных газов. Ниже в табл. 1.1 приведены примеры использования насадочных контактных устройств в некоторых основных производствах химических продуктов.

Таблица 1.1

Примеры использования насадок в химических производствах

[164,415,408,450,432]

Наименование стадий производственного процесса	Наименование производства
Удаление серосодержащих соединений из азото-водородной смеси Удаление CO ₂ из азото-водородной смеси	Производство аммиака
Абсорбция аммиака водой	Получение аммиачной воды
Абсорбция окислов азота водой	Получение азотной кислоты
Осушка сернистого газа Абсорбция SO ₃ водой Очистка отходящего газа от сернистого ангидрида	Производство серной кислоты
Абсорбция Cl ₂ водой	Производство соляной кислоты
Очистка от Cl ₂ отходящих газов	Производство хлора
Удаление CO ₂ из воздуха Удаление H ₂ O из воздуха	Производство кислорода
Охлаждение коксового газа водой Удаление CO ₂ из коксового газа Выделение NH ₃ , CH ₄ , бензола из	Разделение коксового газа

коксового газа	
Очистка от H ₂ S и CO ₂ пирогаза Выделение из пирогаза метаново-водородной фракции Выделение ацетилена из пирогаза	Производство олефинов
Улавливание фенола	Производство синтетических волокон
Извлечение CO ₂ из дымовых газов	Получение сухого льда
Удаление серосодержащих соединений из азото-водородной смеси	Производство метанола
Разделение продуктов вакуумной дистилляции	Производство ароматических масел
	Производство эфирных масел
	Производство жирных кислот
	Производство спиртов
Абсорбция бутадиена	Производство синтетического каучука
Рекуперация летучих растворителей (спиртов, кетонов, эфиров)	Производство органических продуктов
Охлаждение водой генераторного газа в скрубберах	Газификация твердых топлив
Испарительное охлаждение оборотной воды в градирнях	Охлаждение оборотной водой тепловыделяющего оборудования: компрессоров, теплообменников, реакторов и др.

Однако спектр использования насадочных контактных устройств весьма широк. Это не только химическая и смежные с ней отрасли промышленности, такие как нефтехимия и газопереработка, но также и пищевая, фармацевтическая, производство душистых веществ и многие другие. Приблизительно с середины XX века насадки начали находить себе широкое применение в холодильной и криогенной технике, атомной энергетике.

Во многих отраслях используются насадки той же конструкции и из тех же материалов, что и насадки, применяемые в химической индустрии.

Однако в ряде отраслей есть своя специфика. Так, например, там, где изготавливают продукты питания, лекарства, особо чистые вещества, используются насадки, изготовленные из нержавеющей стали. В криогенной технике все оборудование изготавливают из высоколегированных сталей, что необходимо по условиям их прочности при низких температурах. В атомной энергетике, где необходимо разделять вещества с близкими физико-химическими свойствами, используются весьма мелкие насадки специальной конструкции.

В таблице 1.2 приводятся сведения об использовании насадок в ряде отраслей промышленности, где они применяются наиболее широко.

Таблица 1.2

Использование насадочных аппаратов в промышленности

Наименование отрасли техники	Цель использования насадок при осуществлении процессов абсорбции, ректификации, экстракции, осушки, охлаждения при непосредственном контакте фаз
Химическая промышленность	Производство большинства химических продуктов (неорганических и органических)
Нефтехимия	Получение органических продуктов и топлив на основании нефтяного сырья
Газопереработка	Очистка и разделение газовых смесей, получение газов
Фармацевтическая промышленность	Получение лекарств
Парфюмерная промышленность	Получение душистых веществ
Пищевая промышленность	Производство пищевого спирта, уксуса, жиров и др.
Металлургия	Охлаждение доменного газа водой в скрубберах, охлаждение слитков, проката
Криогенная техника	Разделение газовых смесей, получение сжиженных газов
Атомная промышленность	Производство тяжелой воды, разделение изотопов, охлаждение водооборотной воды в градирнях на атомных электростанциях
Теплоэнергетика	Охлаждение в градирнях водооборотной воды на

	ТЭЦ. Извлечение SO ₂ из отбросных газов ТЭЦ, работающих на угле.
Перечисленные выше и другие отрасли промышленности (машиностроение, лесопереработка и др.)	Охлаждение в градирнях водооборотной воды, поступающей на охлаждение оборудования
Все отрасли промышленности и гражданские объекты	Охлаждение в градирнях водооборотной воды систем кондиционирования воздуха

Наконец, об использовании насадок для охлаждения воды при ее непосредственном контакте с воздухом. Аппараты для осуществления такого рода теплообмена – испарительные градирни, оснащенные регулярной насадкой, в настоящее время широко используются во всех отраслях промышленности, где есть потребность в охлаждении оборотной воды. Лишь в очень небольшой доле промышленных градирен охлаждение воды осуществляется через стенку, разделяющую потоки. Такие «сухие» градирни используются преимущественно в южных регионах и в зоне пустынь, где вода в большом дефиците. В них же вода не теряется при испарении, но и по той же причине эффективность их существенно ниже, а капитальные затраты на изготовление значительно выше, т.к. на порядок выше их металлоемкость.

Некоторая небольшая доля градирен, где осуществляется непосредственный контакт фаз, работает без насадки. Не имея устройств для развития поверхности контакта фаз в виде пленки жидкости, такие градирни допускают лишь незначительное охлаждение воды на 3÷5°С. Поэтому большинство градирен, где требуется охладить воду на 7, 10 и более градусов, оснащены оросительными устройствами, являющимися регулярной насадкой [201,183,289].

Масштабы использования градирен поистине колоссальны. Они используются:

- в энергетике (градирни тепловых и атомных электростанций с площадью поперечного сечения-орошения до 9400 кв. м);

- в металлургии (охлаждение слитков проката);
- в машиностроении, химической, пищевой и других отраслях промышленности (охлаждение оборудования оборотной водой);
- в пищевой промышленности (для конденсации хладагентов в холодильных установках);
- в градирнях небольшого масштаба (для систем кондиционирования воздуха промышленных и торговых предприятий, общественных заведений, крупных зданий, учреждений и т. д.). Объем такого рода использования градирен, особенно в странах с достаточно жарким климатом, огромен.

Сегодня трудно назвать отрасли промышленности и страны, где бы градирни не использовались. В качестве примера объема использования градирен можно назвать: в азотной промышленности СССР в 1990 г. функционировало около 1200 градирен с площадью орошения от 16 до 400 кв. м. Их суммарная площадь орошения составляла ~300000 кв. м, что эквивалентно одной градирне диаметром около 650 м.

Из всего сказанного выше следует, что потребность современной промышленности в насадках, как регулярных, так и нерегулярных, весьма велика. Большой масштаб использования и большой круг вопросов, связанных с разработкой новых конструкций насадок, их испытаниями, изготовлением, разработкой конструкций насадочных аппаратов и т. д., требует соответствующего внимания и усилий исследователей и фирм, занимающихся разработкой и изготовлением оборудования химических и других производств [288,294,309].

ГЛАВА 2

ХАРАКТЕРИСТИКИ НАСАДОЧНЫХ КОНТАКТНЫХ УСТРОЙСТВ

2.1. Геометрические характеристики

Важнейшими геометрическими характеристиками насадочных контактных устройств являются: определяющий линейный размер, зависящий от формы насадки, доля свободного объема и удельная поверхность. Две последние определяют величину еще одного важного показателя – эквивалентного диаметра.

Для насадок различной формы размер определяется различными показателями.

Для нерегулярных насадок неправильной (кусовой) формы размер устанавливается с помощью ситового анализа. Для смеси кусковых тел узкого состава определяющий размер насадки d , равный размеру узкой фракции d_i , может быть вычислен, как средний геометрический из размеров ячеек смежных сит d_{CI} и d_{CII} :

$$d = d_i = \sqrt{d_{CI} \cdot d_{CII}} \approx (d_{CI} + d_{CII}) \cdot 0,5. \quad (2.1)$$

Значения d , вычисленные, как средние геометрические и средние арифметические, в этом случае весьма близки.

Для кусковых тел, сильно различающегося размера, гранулометрический состав (массовая доля фракции в смеси) определяется тем же ситовым методом. Далее значение d следует вычислять по формуле для среднегармонической величины [5]:

$$d_H = \frac{1}{\sum \frac{\Delta i}{d_i}}, \quad (2.2)$$

где Δi – весовая доля в смеси частиц размера d_i , вычисленного по формуле (2.1).

Проще обстоит дело с определяющим размером для насадок правильной формы. Для насадок шаровой формы таковым является диаметр. Для насадок кольцевой формы, у которых наружный диаметр равен высоте, определяющим размером является диаметр кольца. Он же является определяющим размером для мини колец и насадок полукольцевой формы.

Для седловидных насадок размер элементов берется по совокупности нескольких измерений: номинальный размер определяется, как треть суммы длины, высоты и ширины элемента (рис. 2.1).

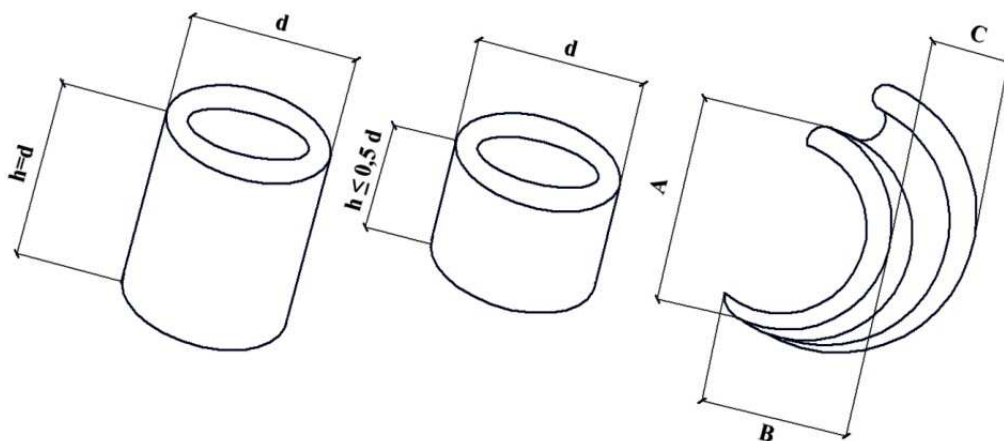


Рис. 2.1 Определяющий размер нерегулярных насадок
а– кольца; б – мини кольца; в – седла.

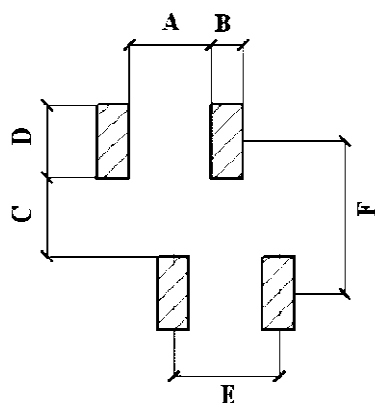


Рис. 2.2 Определяющие размеры регулярной насадки из древесины.

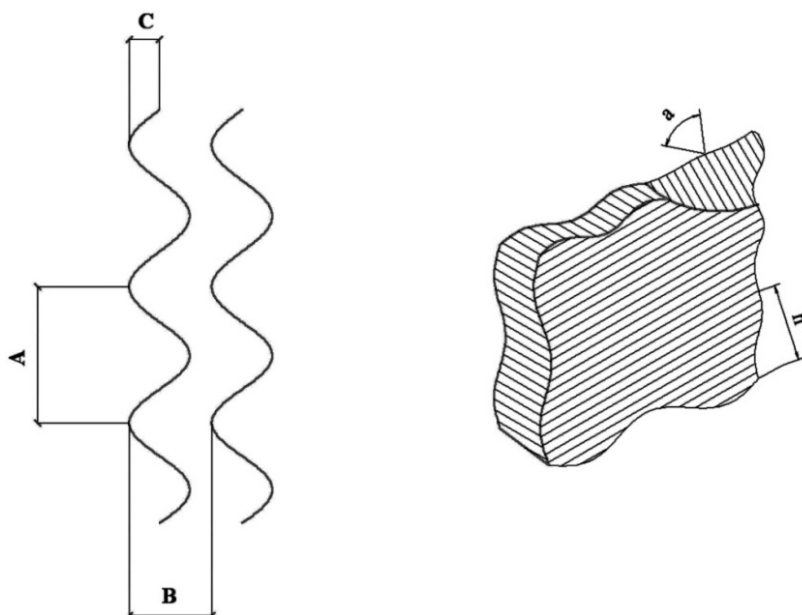


Рис. 2.3 Определяющие размеры регулярной листовой насадки.

Для регулярных насадок их размер определяется несколькими одновременно или не одновременно изменяющимися размерами. Так насадки из древесины (хордовая насадка) отличаются: шириной планок, расстоянием между ними в поперечном сечении аппарата и по его высоте (рис. 2.2).

Насадки из полимерных материалов, представляющие собой вертикально установленные листы, отличаются шагом между листами, расстоянием между гофрами, высотой гофр, их профилем и углом наклона (рис. 2.3).

Сетчатые насадки, помимо указанных выше отличий, могут различаться размером плетения сеток, диаметром нитей и т. д.

Следует сказать несколько слов о шероховатости поверхности насадочных элементов. Шероховатость влияет на ряд характеристик насадок: большая шероховатость несколько увеличивает свободный объем между зернами, а также гидравлическое сопротивление, снижает насыпной вес насадки, увеличивает эффективность. Что касается самой величины шероховатости, то она может быть оценена теми же критериями, что и шероховатость поверхности труб [15,16].

Доля свободного объема – ε есть отношение свободного объема слоя (объема незанятого насадочными элементами) – V_{CB} ко всему объему слоя $V_{СЛ}$ или объем пустот между насадочными элементами в 1 м³ слоя и соответственно выражается в м³/м³.

Величина доли свободного объема или средняя порозность слоя насадки (внутренние поры при этом не принимаются во внимание) является его важной статистической характеристикой, необходимой для проведения тепловых и гидродинамических расчетов насадочных аппаратов.

Численно доля свободного объема насадки совпадает с долей свободного сечения насадки. Поскольку свободный объем слоя равен объему слоя за вычетом объема, занятого насадкой - $V_{НАС}$:

$$V_{CB} = V_{СЛ} - V_{НАС}, \text{ а } \frac{M_{СЛ}}{V_{СЛ}} = \gamma_{НАС} \text{ и } \frac{M_{СЛ}}{V_{НАС}} = \gamma_M, \text{ то можно записать:}$$

$$\varepsilon = \frac{V_{CB}}{V_{СЛ}} = \frac{S_{CB}}{S} = \frac{V_{СЛ} - V_{НАС}}{V_{СЛ}} = \frac{V_{СЛ} - V_{ЭЛ} \cdot N_{ЭЛ}}{V_{СЛ}} = 1 - \frac{\gamma_{НАС}}{\gamma_M}, \quad (2.3),$$

где $V_{ЭЛ}$ – объем одного насадочного элемента, м³; $N_{ЭЛ}$ – число насадочных элементов в объеме слоя, шт; $M_{СЛ}$ – вес слоя, кг; $\gamma_{нас}$ – насыпной вес насадки, кг/м³; γ_M – удельный вес материала насадки, кг/м³; S_{CB} – живое сечение слоя насадки, м²; S – площадь поперечного сечения слоя насадки, м², $\gamma_{НАС}$ определяется взвешиванием единицы объема слоя. $N_{ЭЛ}$ – делением веса 1 м³ насадки на вес одного элемента.

ε можно определить заполнением данного слоя насадки водой. Как это видно из уравнения (2.3), отношение объема воды к объему слоя и есть доля

свободного объема. Однако следует иметь ввиду, что величина ε , определенная экспериментально в сосуде значительно меньшего диаметра, чем промышленный аппарат, может отличаться от истинной величины ε . Это может произойти по нескольким причинам. Во-первых, из-за различия в способе загрузки, вследствие чего в промышленном аппарате насадка может иметь более рыхлую или более плотную упаковку. Во-вторых, при достаточно большей высоте насадочного слоя в промышленном аппарате в нижней части слоя, как правило, наблюдается более плотная упаковка под действием веса столба насадки. В-третьих, ε зависит от числа элементов насадки, которые укладываются по диаметру аппарата – D . Зависимость $\varepsilon=f(D/d)$: для кусков неправильной формы и шаров [15], а также для колец Рашига [17], представлена на рис. 2.4, кроме того, для насадок различной формы на рис. 2.5.

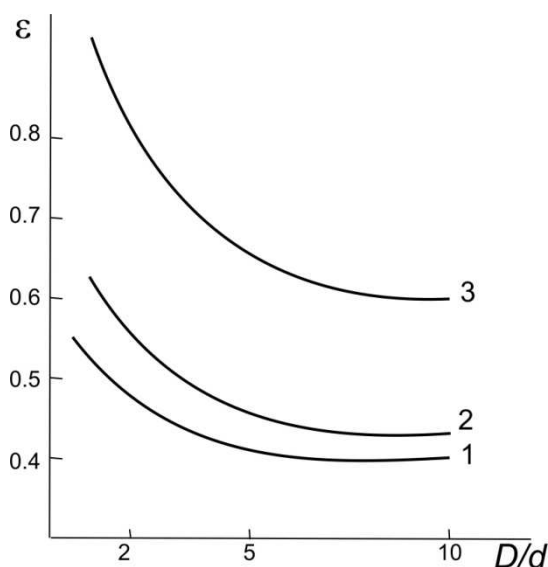


Рис. 2.4 Зависимость $\varepsilon=f(D/d)$:
1 – шары; 2 – куски; [3]; 3 – кольца [4].

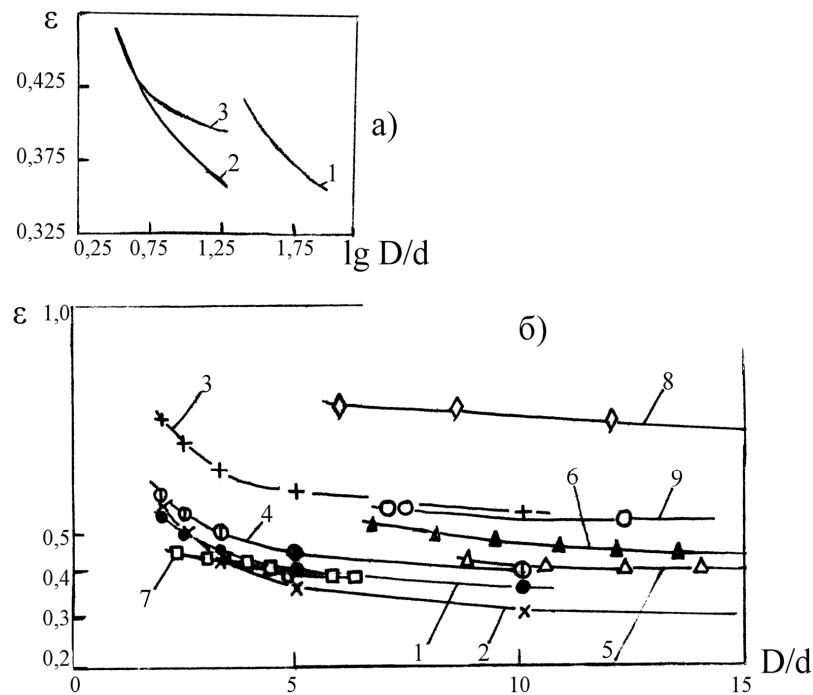


Рис. 2.5 Зависимость $\varepsilon = f(D/d)$ по данным разных авторов:
 а – шары: 1 – [61]; 2 – [36,45]; 3 – [35]; б – насадки различной формы:
 1 – шары [33]; 2 – цилиндрики [33]; 3 – кольца Рашига [33]; 4 – зерна
 неправильной формы [33]; 5 – цилиндрики $d_{cp} = 11,4$ мм [38]; 6 – цилиндрики
 $d_{cp} = 14,85$ мм [38]; 7 – шары $d = 12; 17, 25$ мм [171]; 8 – кольца Рашига
 $50 \times 50; 35 \times 35; 25 \times 25; 15 \times 15$ мм [171]; 9 – куски $d_{cp} = 7,12$ мм [134].

Предложенные в литературе [33,38,171,134,61,35] формулы для расчета величины доли свободного объема в аппаратах небольшого диаметра - $D < 25d$ в зависимости от геометрического параметра D/d дают существенные различия даже для насадок одной формы. Эти расхождения достигают 50%. Это хорошо видно из графических зависимостей $\varepsilon = f(D/d)$, представленных на рис. 2-5. В [135] для отношения $D/d > 2,4$ было получено эмпирическое выражение:

$$\varepsilon = A(D/d)^m e^{n(D/d)}, \quad (2.4)$$

где $A = 12,6$; $m = 6,1$; $n = -3,6$; e – основание натурального логарифма, которое с достаточной точностью позволяет рассчитывать долю свободного объема слоя насадки шаровой формы.

Обобщение результатов собственных опытов [135] и данных работ [33,35,38,61,134,171] по средней порозности насадок различной формы показало, что все они для цилиндрических аппаратов при $D/d > 2$ и высоте слоя насадки $H > 2d$ могут быть аппроксимированы выражением:

$$\varepsilon = \frac{A}{(D/d)^n} + B, \quad (2.5)$$

где А, В и n – константы, зависящие от формы зоны (см. табл. 1).

Таблица 1

Значения коэффициентов в формуле (2.5)

№	Форма насадки	А	В	n
1	Шары	1.0	0.375	2
2	Цилиндрики	0.92	0.341	2
3	Куски неправильной формы	0.5	0.350	1
4	Кольца Рашига	0.35	0.529	1

Графические зависимости доли свободного объема в слоях насадки различной формы при значениях $D/d > 2$, полученные по формуле (2.5), приведены на рис. 2.6. Среднее отклонение опытных значений ε от расчетных по формуле (2.5) составляют: для насадок шаровой формы $\pm 12.9\%$, для кусков $\pm 10.47\%$, для колец Рашига $\pm 14.23\%$.

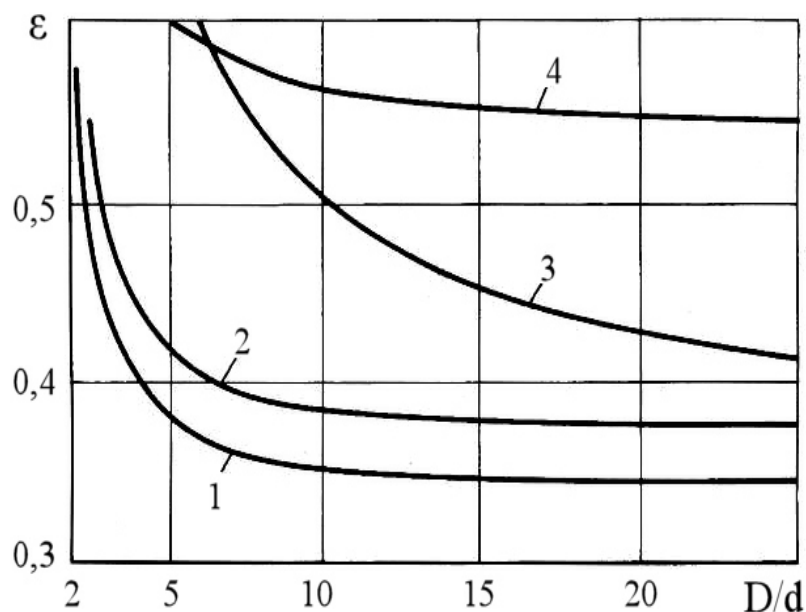


Рис. 2.6 Зависимость доли свободного объема от величины отношения D/d на ок разной формы:
 1 – шары; 2 – цилиндрики; 3 – куски; 4 – кольца Рашига.

На рис. 2.7, 2.8, 2.9 и 2.10 штриховкой показан разброс значений доли свободного объема по опытным данным, приведенным в [33,35,38,61,134,171].

Поскольку в диапазоне $D/d > 10$ ε изменяется незначительно, этим фактором в тех промышленных аппаратах, где $D/d \gg 10$, можно пренебречь.

Что касается метода заполнения водой, то он сам по себе способен вносить определенные погрешности в оценке ε , занижающие значения последней. Это связано с тем, что при заполнении водой в межнасадочном пространстве могут оставаться заметные объемы, занятые невытесненным воздухом. При прочих равных условиях размеры этих объемов зависят от формы и размера насадочных элементов.

В силу сказанного самым надежным методом оценки ε следует признать взвешивание насадки, загруженной в промышленный аппарат известного объема. Для расчетов с некоторым приближением можно использовать значения ε , полученные путем взвешивания при загрузке в опытный аппарат, где $D/d > 10$. Тогда, зная вес одного элемента насадки $M_{эл}$ и его объем при

известном объеме аппарата и весе загруженной насадки: $N_{ЭЛ} = M_{СЛ} / M_{ЭЛ}$ далее по уравнению (2.3) можно рассчитать значение ε . Таким методом можно определять ε для насадочных элементов, как неправильной, так и правильной формы, если форма последних достаточно сложна и они трудно поддаются обмеру. $V_{ЭЛ}$ для насадок неправильной формы может быть определен поочередным погружением отдельных элементов насадки в мерный сосуд с водой и фиксированием объема вытесненной воды с последующим усреднением. Другой путь - взвешивание фиксированного количества насадочных элементов при известном удельном весе материала.

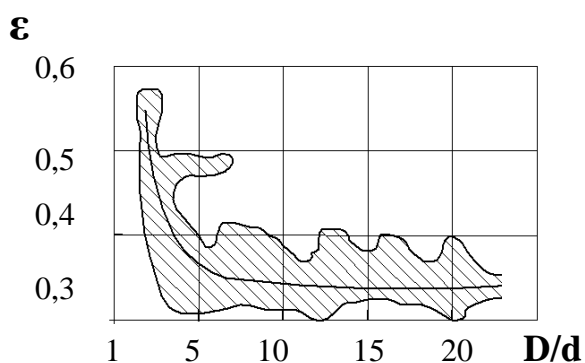


Рис. 2.7. Разброс значений порозности по опытным данным различных авторов для цилиндриков.

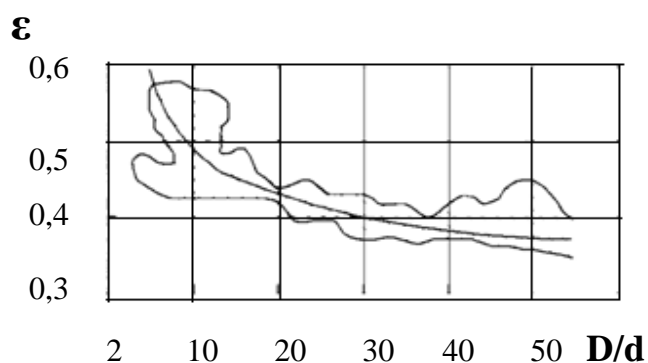


Рис. 2.8. Разброс значений порозности по опытным данным различных авторов для кусковой насадки.

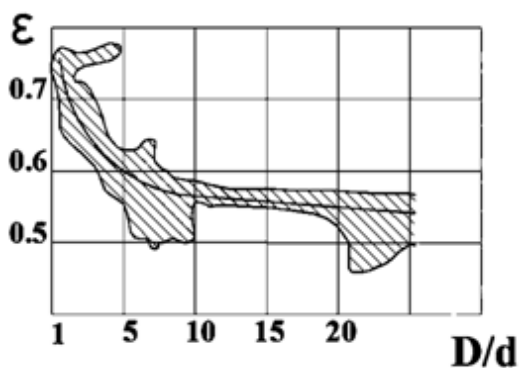


Рис. 2.9. Разброс значений порозности по опытным данным различных авторов для насадок кольцевой формы.

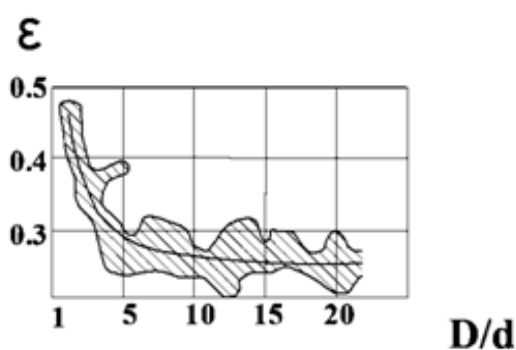


Рис. 2.10. Разброс значений порозности по опытным данным различных авторов для насадок.

Свободный объем насадки зависит не только от формы и размера элементов насадки, но и от толщины их стенки. Для тонкостенных металлических насадок, толщины стенок которых мало отличаются, влияние формы и размера на ε невелико, и последние колеблются в пределах 0.90-0.96. Это следует из кривых 2, 3 и 4 рис. 2.12, построенных по данным, полученным в [137,153,165,170,174,179].

Для керамических насадок, имеющих бóльшую толщину стенки, ε изменяется в более широких пределах $\sim 0.7-0.8$ (кривая 1 рис. 2-12). Одновременно для керамических насадок ε на $\sim 20\%$ ниже, чем для металлических.

Удельная поверхность насадки – a представляет геометрическую поверхность насадочных тел в 1 м^3 и выражается в $\text{м}^2/\text{м}^3$. Значения a можно легко подсчитать для насадок правильной формы:

$$a = a_{\text{ЭЛ}} N_{\text{ЭЛ}}, \quad (2.6)$$

где $a_{\text{ЭЛ}}$ – поверхность одного элемента насадки, м^2 .

$a_{\text{ЭЛ}}$ для насадок правильной формы подсчитывается по соответствующим геометрическим формулам после измерения всех размеров насадки. Эти измерения также дают возможность рассчитать $V_{\text{ЭЛ}}$. Так, например, для колец Рашига:

$$a_{\text{ЭЛ}} = h\pi(d_{\text{Н}} + d_{\text{ВН}}) + \frac{\pi}{4}(d_{\text{Н}}^2 - d_{\text{ВН}}^2) 2 = \pi[h(d_{\text{Н}} + d_{\text{ВН}}) + 0,5(d_{\text{Н}}^2 - d_{\text{ВН}}^2)], \quad (2.7)$$

где $d_{\text{Н}}$ и $d_{\text{ВН}}$ – соответственно наружный и внутренний диаметр кольца, h – его высота.

Для колец Палля:

$$a_{\text{ЭЛ}} = \pi[h(d_{\text{Н}} + d_{\text{ВН}}) + 0,5(d_{\text{Н}}^2 - d_{\text{ВН}}^2) + l_{\text{Л}}(d_{\text{Н}} - d_{\text{ВН}})2], \quad (2.8)$$

где $l_{\text{Л}}$ – суммарный периметр всех лепестков.

Объем одного элемента для колец Рашига и Палля:

$$V_{\text{ЭЛ}} = 0,785\pi h(d_{\text{Н}}^2 - d_{\text{ВН}}^2). \quad (2.9)$$

Сложнее обстоит дело с определением поверхности насадки для частиц неправильной формы. В [33] рассматривался способ оценки a , связанный с

измерением поверхности. Несколько кусков неправильной формы смачиваются краской и оборачиваются бумагой. Площадь полученных отпечатков затем суммируется. Чем больше по количеству партия, отобранная для измерений, тем представительней результат. Эта процедура в достаточной степени трудоемкая, а результаты не очень точны.

В тоже время значения a тел неправильной формы можно рассчитать с помощью фактора формы φ_Φ , показывающего во сколько раз поверхность данного зерна больше поверхности шара, равновеликого ему по объему:

$$a = a_{ш} \varphi_\Phi, \quad (2.10)$$

здесь $a_{ш}$ – удельная поверхность шаров, равновеликих по объему, $\text{м}^2/\text{м}^3$:

$$a_{ш} = a_{1ш} N_{эл} = \pi d_{ш}^2 \frac{1-\varepsilon}{\pi \frac{d_{ш}^3}{6}} = \frac{6(1-\varepsilon)}{d_{ш}}, \quad (2.11)$$

где $a_{1ш}$ – поверхность одного шара, равновеликого по объему, а $d_{ш}$ – диаметр этого шара.

Подставив выражение (2.11) в (2.10), получим:

$$a = \frac{6(1-\varepsilon)}{d_{ш}} \varphi_\Phi. \quad (2.12)$$

Значения φ_Φ , установленные по величине потери напора в результате продувки слоев кускового материала и гладких шаров [4], представлены ниже:

	φ_Φ
Активированный уголь, кокс	2.22
Щебень, гравий	1.49
Галька	1.33

Данный способ оценки величины a справедлив лишь для исследованных тел неправильной формы. Для тел иной формы и шероховатости погрешность может быть достаточно большой.

Удельная поверхность насадочного слоя без учета неомываемой ее части в местах контакта элементов друг с другом может быть определена по

зависимости (2.11). Если известно гидравлическое сопротивление неорошаемого насадочного слоя $-\Delta P_C$, кг/м² [186]:

$$a = \left(324 \cdot 10^{-6} \frac{w_0^2}{\nu_T^2} + \frac{0,04 \varepsilon^2 \Delta P_C}{\nu_T H \rho_T w_0} \right)^{0,5} - 18 \cdot 10^{-3} \frac{w_0}{\nu_T}, \quad (2.13)$$

где w_0 – скорость газа в расчете на полное сечение насадочного слоя, м/с; ν_T – коэффициент кинематической вязкости, м²/с; $\rho_T = \gamma_T/g$ – плотность газа, кг/м³; γ_T – удельный вес газа, кг/(м²с²); $g=9,81$ – ускорение силы тяжести, м/с²; H – высота насадочного слоя, м.

Определение ΔP_C для указанной выше цели следует производить при продувке слоя насадки со скоростью воздуха, соответствующей режиму течения с преобладанием вязкостных сил, т. е. при ламинарном режиме течения, поскольку измеряемое сопротивление должно быть обусловлено только трением о поверхность насадки. Такому режиму соответствует значение $Re_T = \frac{w_0 d_{\text{э}}}{\nu_T \varepsilon} \leq 40$ [188,392].

Удельная поверхность так же, как и ε зависит от формы, размера (растет с его уменьшением) и толщины стенки элементов насадки.

Результаты проведенного нами обобщения данных по удельной поверхности для регулярных и нерегулярных насадок [203] представлены на рис. 2.11. Полученная зависимость $d_{\text{э}} = f(a)$ оказалась универсальной, как для металлических, так и керамических нерегулярных насадок, а также и регулярных насадок и описывается уравнением:

$$d_{\text{э}} = A(a)^n, \quad (2.14)$$

где $A = 5.73 \cdot 10^9$; $n = -1.398$.

Полученное в результате обобщения литературных данных [15,153,165,299,366,376,377,381] уравнение (2.14) может быть использовано для осуществления технологических расчетов насадочных колонных аппаратов.

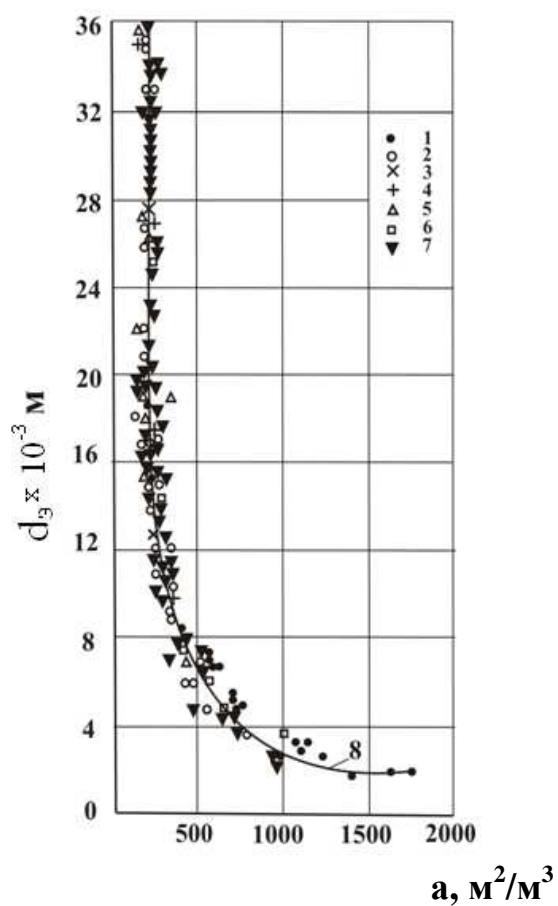


Рис. 2.11 Зависимость величины эквивалентного диаметра - d_e от удельной поверхности насыпных и регулярных насадок - a :

- 1 – различные насыпные насадки по данным Полевого [15];
- 2 – насыпные насадки по данным Ведерниковой и др. [153];
- 3 - насыпные насадки по данным Колева и др. [165];
- 4 - насыпная насадка «Инжехим – 2000» по данным [299];
- 5 – регулярные насадки по данным [366,376];
- 6 - насыпная насадка по данным [377];
- 7 - насыпная насадка по данным [381];
- 8 – расчет по уравнению (2.14).

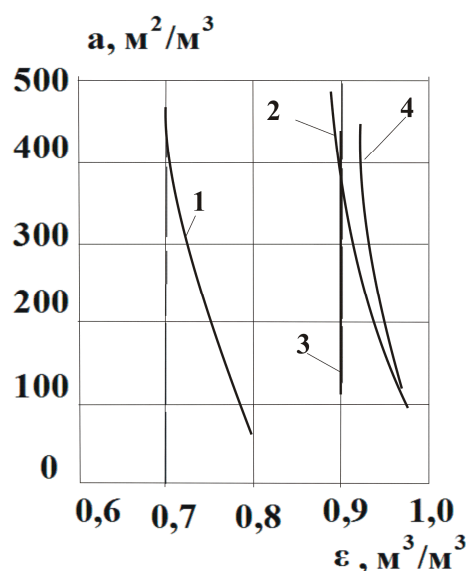


Рис. 2.12 Сравнение зависимостей $a = f(\varepsilon)$ для обычных колец и миникольцевых насадок при загрузке внавал: 1 – керамические кольца Рашига и кольца Палля; 2 – металлические кольца Рашига; 3 – металлические кольца Палля; 4 – металлические и пластиковые миникольцевые насадки по данным таблицы 1.

На рис. 2.12 представлена зависимость $a = f(\varepsilon)$. Из него следует, что для металлических насадок разных конструкций они обобщаются разными кривыми. Каждая из этих кривых описывает данные по различным типоразмерам насадки одной конструкции. В то же время керамические насадки как различного типоразмера, так и различной конструкции, обобщаются одной кривой (кривая 1).

Когда рассматривается течение потока в полых каналах сложной конфигурации (кольцевые каналы, межтрубное пространство), в качестве характерного линейного размера принимается эквивалентный диаметр – $d_{\text{э}}$, равный учетверенному гидравлическому радиусу – Γ :

$$d_{\text{э}} = 4\Gamma = \frac{4S}{P}, \quad (2.14)$$

где S – сечение канала, м^2 ; P – его периметр, м.

Поскольку в слое нерегулярной насадки пустоты образуют извилистые каналы неправильной формы и переменного сечения, в качестве

характерного линейного размера здесь также должен выступать эквивалентный диаметр.

Преобразуем выражение (2.14) применительно к условиям насадочного слоя. Возьмем 1 м^3 насадочного слоя с площадью основания 1 м^2 и высотой $H=1 \text{ м}$. Здесь площадь каналов $S_K=S_{CB}$. Произведение $S_{CB}H$ дает нам долю свободного объема, а произведение $ПН$ – удельную поверхность. Умножим числитель и знаменатель в уравнении (2.12) на H и получим выражение эквивалентного диаметра $d_{\text{э}}$ для слоя насадки [5, 8]:

$$d_{\text{э}} = \frac{4S_{CB}H}{ПН} = \frac{4\varepsilon}{a}. \quad (2.15)$$

Строго говоря, в значениях a должна быть учтена и удельная поверхность аппарата, в котором размещена насадка – $a_{\text{АПП}}$, поскольку на этой поверхности происходят те же процессы, что и на поверхности насадки. Для оценки $a_{\text{АПП}}$ может быть использовано следующее выражение:

$$a_{\text{АПП}} = \frac{\pi DH}{V_{\text{СИ}}} = \pi D \frac{H4}{\pi D^2 H} = \frac{4}{D}. \quad (2.16)$$

В [226] в выражении для $d_{\text{э}}$ предлагается учитывать значение $a_{\text{АПП}}$ с коэффициентом равным 0,75, т. е.:

$$d_{\text{э}} = \frac{4\varepsilon}{a + a_{\text{АПП}} 0,75}. \quad (2.17)$$

В [188] установлено, что более точно $a_{\text{АПП}}$ следует учитывать с коэффициентом $\varphi_{\text{СТ}}$, значения которого представлены на рис. 2.13.

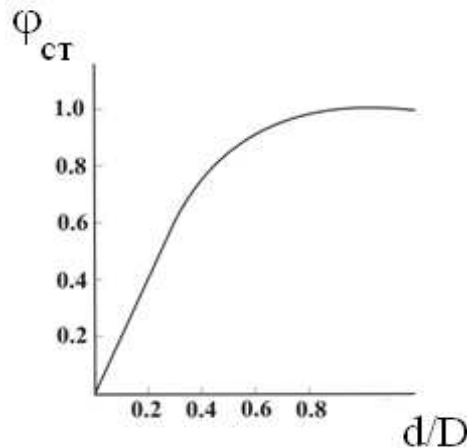


Рис. 2.13 Зависимость $\varphi_{\text{СТ}}=f(d/D)$ [22]

Тогда

$$d_{\text{э}} = \frac{4\varepsilon}{a + a_{\text{АПП}}\varphi_{\text{СТ}}} = \frac{4\varepsilon}{a + \frac{4}{D}\varphi_{\text{СТ}}}. \quad (2.18)$$

Из данных рис. 2.13 видно, что с увеличением диаметра аппарата, и числа элементов насадки, размещающихся по диаметру, как и следовало ожидать, влияние поверхности стенок аппарата снижается и при $D/d > 10$ этим влиянием практически можно пренебречь ($\varphi_{\text{СТ}} \rightarrow 0$). В тоже время в колоннах небольшого диаметра его следует учитывать.

Значения $d_{\text{э}}$ для кольцевых насадок разного размера см. в табл.2.

2.2. Технические характеристики

Важнейшей технической характеристикой насадочного контактного устройства является его эффективность. От этого показателя работы насадки зависит необходимая высота насадочного слоя в аппарате, а, значит, и высота самого аппарата. Одновременно этим показателем во многом определяется и требуемое количество насадки. Таким образом, эффективность является определяющим фактором для расчета массообменного аппарата и его технико-экономической оценки.

Процессы массопереноса в насадочном слое, факторы, влияющие на интенсивность этого процесса, массообменные характеристики – показатели эффективности рассматриваются подробно в разделе 4.3.2.

Другими важными технологическими характеристиками насадки являются ее гидродинамические характеристики (см. раздел 4.2).

Во-первых, это предельно допустимая скорость газа. Она определяет диаметр насадочного аппарата. Высота насадочного слоя и диаметр аппарата позволяют оценить требуемое количество насадки.

Во-вторых, это гидравлическое сопротивление насадочного слоя. Оно определяет энергозатраты, необходимые для прокачки газа через колонну с насадкой.

К другим характеристикам насадки, которые обычно рассматриваются, относятся количество насадочных элементов в единице объема слоя, а также насыпной вес насадки.

Первая из них напрямую связана с размером насадки – чем меньше размер насадочного элемента, тем больше их в единице объема. При этом возрастает трудоемкость их изготовления, т.е. стоимость.

Вторая из них является важной для разработки конструкции насадочного аппарата, его опорных и несущих конструкций.

Способы определения числа насадочных элементов в единице объема и насыпного веса рассмотрены выше в разделе 2.1.

Для представления о порядке величин $N_{ЭЛ}$ и $\gamma_{НАС}$ в табл. № 2 представлены данные по керамическим, металлическим и пластмассовым насадкам из колец Рашига и Палля.

Таблица 2

Характеристика насадок из колец Рашига и Палля [263,392,277]

Материал и размер насадки *	Удельная поверхность, $\text{м}^2/\text{м}^3$	Свободный объем, $\text{м}^3/\text{м}^3$	Эквивалентный диаметр, м	Число элементов насадки в 1 м^3 , шт.	Вес 1 м^3 насадки, $\text{кг}/\text{м}^3$
Нерегулярная насадка (загруженная навалом)					
Керамические кольца Рашига					
5×5	1000	0,56	-	-	900
6×6	771,9	0,60-0,62	-	3022936	970
8×8	550,0	0,65	-	1261000	-
10×10×1,5	440	0,65-0,70	0,006	672000-700000	700-820
13×13	370	0,64-0,65	-	378000	840
15×15×2	310-330	0,7	0,009	210000-220000	670-700
16×16×2	300	0,69-0,73	0,0097	189091-	730

				192500	
25×25×2,4	174	0,72-0,81	0,0186	43000	505-680
25×25×3	190-200	0,68-0,74	0,015	45000-54000	530-670
35×35×4	140	0,76-0,78	0,022	18000-20200	530-610
38×38×4,4	115-150	0,68-0,76	0,0264	12700-13400	570-650
50×50×4,4	92-98	0,74-0,83	0,0332	5500-6000	457-550
50×50×5	90-120	0,7-0,785	0,035	5500-6800	530-630
75×75×9,5	69-92	0,71	0,0412	1900-4500	714-750
80×80×8	60-75	0,77-0,80	-	1950	490-520
100×100	44-75	0,81	-	1850	450
Пластмассовые кольца Рашига					
16×16	350	0,86	-	-	164
25×25	220	0,87	-	-	138
38×38	150	0,90	-	-	82
50×50	110	0,91	-	-	71
80×80	65	0,91	-	-	66
Металлические кольца (стальные) Рашига					
8×8×0,3	630	0,9	-	900000-1500000	750
80×80×8	-	0,74	-	374000	440
10×10×0,5	500	0,88	0,007	770000	960
12×12×0,5	500	-	-	450000	810
15×15×0,2 5	350	-	-	240000	330
15×15×0,5	350-378	0,917-0,92	0,012	210000-260778	660
16×16×0,3	370	-	-	-	-
25×25×0,5	220	0,92	0,017	46000-55000	640
35×35×1,0	150	-	-	19000	570
50×50×0,8	110	0,95	0,035	5600-7000	430
Керамические кольца Палля					
25×25×3	220-250	0,73-0,74	0,041	45000-54000	610-620
35×35×4	165	0,76	0,018	18500	540
50×50×5	110-120	0,78-0,783	0,026	5500-6800	550
80×80×8	75	0,80	-	1950	520
Металлические (стальные) кольца Палля					
15×15×0,4	368-380	0,9-0,93	0,01	229225-230000	525

25×25×0,6	223-235	0,9-0,954	0,015	52000-53900	471-490
25×25×0,8	220	0,92	-	46000	-
35×35×0,8	139-170	0,9-0,965	0,021	18200-19517	455
38×38×0,8	149,6	0,940-0,952	-	15180-15772	424
50×50×1,0	108-115	0,950-0,951	0,033	5600-6442	393-415
76×76×1,5	72	0,951	-	1830	384
Пластмассовые кольца Палля					
16×16	341	0,87	-	-	-
25×25×3	220-225	0,73-0,887	-	50220-52300	69
35×35	151,1	0,906	-	14870-17000	80
50×50	110	0,92	-	6130-6765	60-68,6
50×50 (Grid)	108,1	0,930	-	6280	-
90	-	0,95	-	1171	40-43

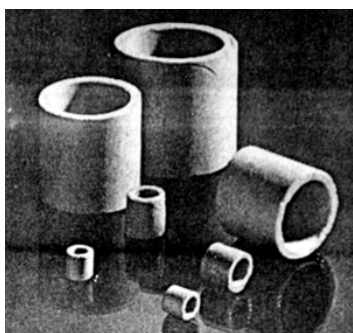


Рис. 2.14 Керамические кольца Рашига

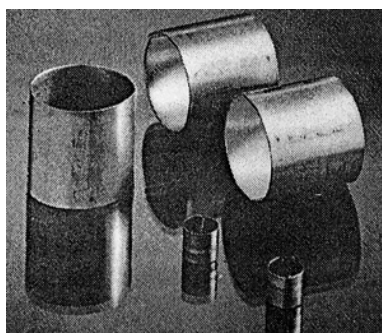


Рис. 2.15 Металлические кольца Рашига

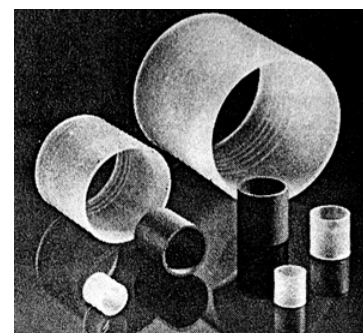


Рис. 2.16 Пластмассовые кольца Рашига



Рис. 2.17 Металлические кольца Палля



Рис. 2.18 Пластмассовые кольца Палля



Рис. 2.19 Керамические кольца Палля

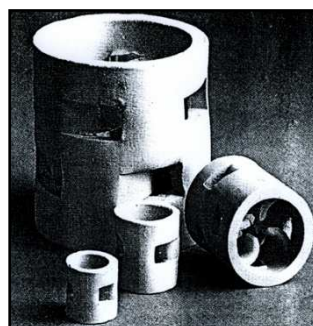


Рис. 2.20 Керамические кольца Палля

Как это видно из сравнения числа элементов для насадок из керамики и металла одной формы их число в единице объема приблизительно одинаково. Также близки значения d_3 для насадок различной формы одинакового размера. Что касается насыпного веса, то для насадок одного размера и формы, изготовленных из керамики, этот показатель лишь на $\sim 15\%$ выше, чем для металлических, несмотря на то, что толщина стенок керамических насадок в ~ 5 раз выше. Так, например, у металлических насадок размером 50 мм толщина стенки 1 мм, у керамической 5 мм. Это связано с бóльшим удельным весом металла по сравнению с керамикой.

2.3. Материалы

Для изготовления насадочных контактных устройств используется довольно широкий круг материалов. Применение некоторых материалов в одних случаях обусловлено геометрической формой насадочных элементов, в других случаях температурным режимом процесса или коррозионными свойствами среды.

Исторически первыми, как уже говорилось, появились нерегулярные насадки кусковой формы, которые в настоящее время находят ограниченное применение. Они изготавливались преимущественно из твердых горных пород – базальта и гранита. Дольше всех продолжали использоваться: кокс, который благодаря своей дешевизне себя оправдывал во многих простых и небольших по масштабу установках; дробленый кварц в башнях Гловера для производства серной кислоты, а также известняк в одном из методов получения сульфид-целлюлозы. Все кусковые материалы подвергались дроблению и последующему отсеиванию на механических ситах. Элементы такой насадки перед началом работы освобождались от мелочи и пыли, механических загрязнений, чаще всего обрабатывались острым паром, а то и обезжиривались.

Нерегулярные насадки правильной формы (кольца, седла и другие) изготавливаются в основном из керамики, фарфора, металла, полимерных материалов, в ограниченном количестве из стекла. Выбор материала обусловлен условиями процесса и стоимостью насадки. Наиболее дешевыми, естественно, являются керамические насадки. Однако они имеют ряд недостатков. Главный из них это то, что элементы из керамики имеют большую толщину стенки, чем насадки той же формы из полимерного материала и особенно металла. Это ухудшает некоторые характеристики насадки: снижает живое сечение, а это ведет к снижению пропускной способности и увеличению гидравлического сопротивления. Очень высок насыпной вес насадок из керамики и фарфора. В то же время большая

шероховатость и лучшая смачиваемость керамической насадки несколько интенсифицирует массоперенос.

Кроме того, насадки из керамики и фарфора отличаются меньшей прочностью при ударных нагрузках и разрушаются при транспортировке и загрузке в аппараты, а также гидроударах при эксплуатации. Чтобы уменьшить разрушение насадки при загрузке принимаются специальные меры. Наиболее действенным способом является загрузка в аппарат, заполненный водой (если позволяют прочностные характеристики корпуса аппарата, опорных конструкций и фундамента). Наилучший эффект при этом способе загрузки достигается при загрузке мелкими порциями (дискретной загрузке), при которой избегается соударение элементов насадки при их погружении в воду и формировании структуры слоя.

Керамические насадки в отличие от фарфоровых не обладают и достаточной коррозионной стойкостью. Как показывает, например, опыт промышленной эксплуатации аппаратов очистки конвертированного газа от диоксида углерода (очистка «Карсол») в производстве аммиака, там происходит довольно быстрое разрушение керамических седел Инталокс. В горячих растворах поташа происходит выщелачивание и забивка аппаратуры, в том числе верхнего слоя насадки абсорберов, трубопроводов бедного раствора, трубок холодильника, регулирующих и блокирующих клапанов продуктами распада и мелкодисперсной керамической крошкой, что снижает производительность системы. За время эксплуатации, начиная с 1975 г. на всех 12 крупнотоннажных агрегатах синтеза аммиака производительностью 1360 тонн в сутки с очисткой «Карсол» России, Украины и Белоруссии производилась неоднократно вынужденная частичная замена керамических седел Инталокс, причем начиная с первых же лет эксплуатации. Из-за возникающих трудностей все указанные выше производства стремились заменить керамическую насадку на металлическую.

Кислотоупорная керамика химически стойка к большинству химических соединений, за исключением некоторых соединений фтора и

крепких растворов щелочей. В производствах серной и соляной кислот и ряде других используются седла и кольца, изготовленные из фарфора глазурированного и неглазурированного, который более коррозионностоек, чем керамика. Однако стоимость насадки из кислотоупорной керамики и фарфора существенно выше, чем из обычной керамики.

Общим недостатком насадок из фарфора и керамики, как упоминалось, является их значительно бóльший насыпной вес, по сравнению с насадками из других материалов, особенно из полимерных. Это вызывает необходимость утяжеления опорных решеток и прижимных конструкций, корпуса и т. д., т. е. ведет к увеличению металлоемкости и стоимости аппаратов.

Большинство конструкций промышленных нерегулярных насадок правильной формы могут изготавливаться в варианте из полимерных материалов. В качестве последних преимущественно используются такие термопласты, как полипропилен (ПП) и полиэтилен низкого давления высокой плотности (ПЭНД). Оба они достаточно устойчивы в щелочных средах до $pH=12$. Однако использование их ограничено по термостойкости: упомянутый полиэтилен можно использовать при $t < 50^{\circ}C$, полипропилен при $t < 80^{\circ}C$. В настоящее время ведется разработка более термостойких полимерных материалов для изготовления насадок, в том числе композиции на основе полипропилена с добавлением талька, стекла и других добавок, что возможно позволит поднять порог использования ПП еще на $15 \div 20^{\circ}C$.

Для изготовления регулярных насадок используются также: поливинилхлорид (ПВХ), полистирол (ПС), тефлон, текстолит, стеклоткани и некоторые другие. Преимуществом насадок из полимерных материалов по сравнению с керамическими той же конструкции и размера являются: бóльшее живое сечение и пропускная способность, меньшее гидравлическое сопротивление. Недостатком – худшая смачиваемость и бóльшая стоимость.

Для изготовления насадок находят применение также и такие материалы как: графит, стекло, даже резина. Насадки из графита

используются при работе с плавиковой и фосфорной кислотами, фторидами, горячими растворами щелочей. Использование этих материалов, однако, ограничено.

Практически все конструкции промышленных нерегулярных насадок изготавливаются из металлов, преимущественно из углеродистых и нержавеющей сталей, меньше из алюминия.

Для изготовления некоторых регулярных насадок используются также медь, медистая бронза, никель, никелевые сплавы, титан, тантал, цирконий, монель-металл, хастеллой и другие. Насадки из металлов имеют наименьшую толщину стенки по сравнению с насадками из других материалов и поэтому при прочих равных условиях более высокие гидродинамические показатели. Однако поверхность насадок из нержавеющей стали смачивается хуже, чем у насадок из других материалов. Это, пожалуй, единственный их недостаток.

В ряде процессов даже насадки из углеродистой стали, не говоря уже о насадках из нержавеющей стали, имеют бóльшую коррозионную стойкость по сравнению с другими. Так, например, в процессе очистки конвертируемого газа от диоксида углерода (процесс «Бенфилд») производства аммиака, кольца Палля из углеродистой стали надежно работают в ингибированных поташных растворах при $\text{pH}=12$ при $t < 100^\circ\text{C}$. Однако распассивация системы вызывает усиленное растворение насадки. В этих же условиях при $t > 110-120^\circ\text{C}$ необходимо использование насадок из легированных сталей с содержанием хрома типа 08X13. Пробег насадки существенно удлиняется при изготовлении ее из стали, с содержанием хрома, титана и никеля (типа 1X18H9T или 1X18H10T). Насадки из нержавеющей стали используются и во многих других производствах. Им нет альтернативы: в процессах чувствительных к содержанию железа в рабочих средах, при производстве особо чистых веществ, при осуществлении массообменных процессов в условиях глубокого холода и др.

В некоторых случаях для изготовления насадок используют алюминий, который в большинстве случаев обладает невысокой химической стойкостью

и механической прочностью. В силу малого удельного веса, он упрощает и удешевляет стоимость колонн.

Ниже в табл. 2.1 приводятся некоторые данные, представленные в [381], о коррозионной стойкости материалов, из которых изготавливаются массообменные насадки правильной формы.

Таблица 2.1

**Коррозионные свойства материалов насадок
в различных средах [381]**

Среда	Керамика и фарфор	Пластмассы на основе полипропи лена	Углеродист ая сталь	Нержавею щая сталь
Ацетон	A200	A65	A200	A200
Анилин	A200	A65	A200	A200
Бензол	A200	B20	A200	A200
Диэтаноламин	A200	A65	B150	B120
Керосин	A200	B20	A200	A200
Лимонная кислота	A150	A65	Г	B95
Метанол, этанол	A150	A65	B150	B120
Моноэтаноламин	A200	A65	B150	B120
Скипидар	A200	Г	A200	A200
Толуол	A200	Г	A200	A200
Уксусная кислота 5%	A120	A65	-	B120
Уксусная кислота 95%	A180	A20	Г	B180
Фенол	A95	A65	B180	E150
Четыреххлористый углерод	A200	Г	B40	B40
Этиленгликоль	A200	A20	B95	A150
Азотная кислота 10%	A200	B65	Г	B120
Азотная кислота 70%	A200	Г	Г	-
Вода	A200	A95	B65	A95
Едкий калий 30%	B40	A65	B65	B95
Едкий натр 5%	B40	A65	B80	A95
Едкий натр 10%	B40	A65	B80	A95
Едкий натр 30%	B40	A65	B80	B95
Фосфорная кислота	B120	A95	B65	B40

10%				
Фосфорная кислота 85%	B150	Г	B95	A95
Перекись водорода	A200	A20	Г	B95
Плавиковая кислота	Г	B95	Г	Г
Серная кислота 10%	A120	A95	Г	Г
Соляная кислота 98%	A200	A20	B12	Г
Соляная кислота 10%	A120	B95	Г	Г
Соляная кислота 35%	A120	A65	Г	Г
Сульфат аммония	A150	A65	Г	B40
Царская водка	A200	Г	Г	Г
Хлор (сухой)	A200	-	B40	B65
Хлор (влажный)	A200	B65	Г	Г

Обозначения: А – без изменений; Б – незначительные изменения; В – ограниченный срок службы; Г – применение не рекомендуется. Цифра обозначает температуру эксплуатации.

Эти данные рекомендуются для предварительной оценки, поскольку имеют лишь информативный характер. Поэтому при выборе материала для изготовления конкретной насадки следует руководствоваться специальной литературой по коррозии материалов.

Особое внимание должно быть уделено подготовке насадки к работе: очистке, осушке, обезжириванию (если необходимо). Продуманность, последовательность и тщательность этих операций должны соответствовать требованиям конкретного процесса.

Все сказанное выше относительно прочности и коррозионной стойкости нерегулярных насадок в равной степени относится и к регулярным насадкам, которые для осуществления массообменных процессов изготавливаются преимущественно из нержавеющей стали и полимерных материалов.

Регулярные насадки, используемые для испарительного охлаждения воды в градирнях (оросители), до конца 60-х годов изготавливались в СССР в основном из древесины. Использование ее в ряде регионов РФ, странах СНГ и Балтии, но в гораздо меньших объемах осуществляется и в настоящее время.

О материалах, используемых для изготовления регулярных насадок градирен см. в [365,366].

2.4. Требования, предъявляемые к насадкам

Требования, предъявляемые к насадочным контактными устройствам можно разделить в основном на три группы: технологические, конструктивные и технико-экономические.

К технологическим требованиям, которые лишь условно можно назвать главными, относятся требования к показателям, определяющим эксплуатационные характеристики насадки. К ним относятся.

1. Высокая эффективность. Этот показатель для вновь организуемых процессов позволяет минимизировать высоту насадочного слоя, а, следовательно, высоту массообменного аппарата, т. е. свести к минимуму капитальные и энергетические затраты на преодоление гидравлического сопротивления насадочного слоя. Для действующих аппаратов переход на более эффективную насадку обеспечивает возможность либо интенсифицировать процесс – повысить нагрузки, либо, сохранив прежние нагрузки, увеличить степень извлечения.
2. Высокая пропускная способность. Для вновь организуемых процессов этот показатель позволяет иметь аппараты с минимальным диаметром. Для действующих аппаратов - повысить нагрузки.
3. Низкое гидравлическое сопротивление. Как для вновь организуемых процессов, так и для действующих аппаратов, этот показатель приводит к снижению потери напора в насадочном слое и тем самым уменьшает энергетические затраты.

4. Малая удерживающая способность – способность насадки удерживать меньше жидкости (более подробно об этом показателе см. в главе 3) улучшает все три указанных выше показателя.

Необходимо отметить, что между технологическими показателями работы насадки существует определенная связь. Снижение удерживающей способности, правда в разной степени, повышает эффективность и пропускную способность и снижает гидродинамическое сопротивление. Насадки, имеющие более высокое гидравлическое сопротивление, имеют, как правило, более низкую пропускную способность. Эти вопросы более подробно обсуждаются в главе 4.

Конструктивные требования к насадкам следует рассматривать с трех позиций.

Во-первых, конструкция насадки должна обеспечивать технологические требования к насадке. А это значит, что насадка должна иметь:

- возможно бóльшую удельную геометрическую поверхность, т. к. при прочих равных условиях с увеличением поверхности пропорционально растет эффективность;
- возможно более высокую долю свободного объема, что обеспечивает более высокую пропускную способность;
- форму, создающую условия для омывания, как можно бóльшей доли геометрической поверхности;
- форму, создающую возможно меньшее сопротивление движению встречных потоков в насадочном слое;
- форму, которая должна препятствовать избирательному движению жидкости и газа в насадочном слое и обеспечивать, по возможности, наиболее равномерное распределение контактирующих потоков по всему поперечному сечению аппарата.

Во-вторых, конструкция насадки и материал, из которого она изготавливается, должны обеспечить необходимую механическую прочность насадочных элементов, а материал и необходимую коррозионную стойкость и термостойкость. Это должно обеспечить сохранность и неизменность формы насадочных элементов в ходе загрузки в аппарат и в течение всего периода эксплуатации.

В-третьих, конструкция насадки должна удовлетворять технико-экономическим требованиям. К ним относятся:

- низкая материалоемкость;
- технологичность, т.е. простота конструкции элементов, делающая возможной разработку технологии массового производства с наименьшими капитальными и трудовыми затратами.

Эти два показателя в совокупности определяют стоимость изготовления насадки.

Таким образом, трудно выделить какие-либо доминирующие требования к насадкам и потому ни одно из них нельзя игнорировать.

Из сказанного следует, что любая конструкция насадки может претендовать на промышленное использование лишь в том случае, если она будет соответствовать всем без исключения указанным выше требованиям.

ГЛАВА 3

КОНСТРУКЦИИ ПРОМЫШЛЕННЫХ НАСАДОЧНЫХ КОНТАКТНЫХ УСТРОЙСТВ

3.1. Классификация насадок

Вопросу классификации насадок ранее уделялось мало внимания, видимо, в силу ограниченного количества разработанных конструкций. Однако за последние десятилетия появилось не только много модификаций известных конструкций, но насадки принципиально новых форм. Появились также новые материалы для их изготовления. По этой причине необходимость в новой, более полной классификации насадок актуальна. Попытки ее осуществления были, в частности, предприняты в [20,32,33].

В [20] предлагалось разделить насадки, предназначенных для процессов ректификации термически нестойких веществ, на три типа в зависимости от использования для их изготовления материала:

- неметаллические насадки (керамические, фарфоровые, стеклянные, пластмассовые);
- металлические насадки, выполненные из листового материала;
- металлические насадки, выполненные из сетки и просечно-вытяжной стали.

Такое разделение насадок не учитывает ни структуру насадочного слоя, ни конструктивные признаки насадки, ни ее технологическое назначение.

В [32] насадки классифицируются только по конструкции. Классификация насадок, предложенная в [33], более предпочтительна, т. к. в ней учитывается и конструкция насадки и структура насадочного слоя. Однако не учитывается материал насадки и ее принципиальное технологическое назначение. Также требует уточнения и детализации классификация по конструкции.

На наш взгляд учет этих моментов представляется важным, т. к. насадка одной и той же конструкции, изготовленная из разных материалов (например, кольца Палля из металла, пластмассы и керамики), несет в себе заметные конструктивные особенности, следствием чего являются существенные отличия в гидродинамических и массообменных характеристиках.

Технологическое назначение насадки – для массообменных процессов (абсорбция, ректификация) или для охлаждения воды при непосредственном контакте с воздухом в испарительных градирнях – также накладывает свои особенности на детали конструкций регулярных насадок формально одной и той же формы в силу отличительных особенностей и самих технологических процессов и аппаратов, в которых они осуществляются (включая масштабы аппаратов, их конфигурацию и многое другое). Аргументом в пользу сказанного является то, что регулярная насадка, используемая в градирнях, практически не используется в абсорбционных и ректификационных колоннах и наоборот.

С учетом изложенного ниже предлагается более полная и информативная классификация насадок, учитывающая: характер структуры насадочного слоя (расположение элементов в пространстве), форму элементов, виды конструктивного исполнения, используемый материал, назначение [34].

Что касается технологического назначения насадок, то по этому признаку их следует прежде всего разделить на две группы: насадки, используемые для массо- и теплообменных процессов в колонных аппаратах и насадки для испарительного охлаждения воды в градирнях (рис. 3.1). Ниже классификация первой группы насадок представлена на отдельных схемах (рис. 3.2, 3.3)



Рис. 3.1 Классификация насадок по состоянию и назначению.

Детализация классификации насадок:
нерегулярные рис. 3.2, регулярные рис. 3.3.

Для охлаждения технологических газов или жидкостей при непосредственном контакте в скрубберах, процессе не столь часто используемом в промышленной практике, в принципе могут быть использованы как нерегулярные (рис. 3.2), так и регулярные насадки (рис. 3.3). Для процессов вакуумной ректификации предпочтительны сетчатые насадки [20], как обладающие наименьшим гидравлическим сопротивлением, причем, в основном, регулярные.

Все насадочные контактные устройства для осуществления тепло-массообменных процессов в колонных аппаратах в свою очередь могут быть, прежде всего, разделены на две большие группы, различающиеся по тому, какую структуру имеет образованный ими насадочный слой (рис. 3.1).

К первой группе относятся нерегулярные насадки, т. е. контактные устройства, в которых элементы насадки, имеющие относительно небольшой

размер, загружаются в аппарат внавал, неорганизованно, образуя хаотическую структуру. Оси отдельных элементов занимают при этом различное положение по отношению к оси аппарата. В результате межнасадочное пространство представляет собой систему каналов (в поперечном сечении аппарата) различной формы и размера. При этом и форма и размер каждого канала изменяется и по высоте слоя. По способу загрузки нерегулярные насадки могут быть разделены на насадки со сплошной загрузкой (наиболее часто встречающийся способ) и с загрузкой в контейнерах.

Нерегулярные насадки (рис. 3.2), в свою очередь, можно разделить на насадки с элементами неправильной формы и насадки с элементами правильной геометрической формы. Отличие состоит еще в том, что для насадочных элементов неправильной формы (кусковых) характерен некоторый спектр размеров, очерченный верхним и нижним пределом данной фракции. Элементы правильной формы данного размера имеют в точности одинаковые размеры, т.е. все размеры всех элементов полностью воспроизводятся.

Нерегулярные насадки с элементами правильной формы могут быть разделены на несколько видов, в зависимости от того, какая геометрическая форма доминирует в данной конструкции: сферические, кольцевые, полукольцевые, миникольцевые, конусообразные, спиральные, розеточные, винтовые, седлообразные и насадки без преобладания какой-либо правильной геометрической формы. Каждый из этих видов может иметь различную запатентованную конструкцию. Наконец, насадка каждой из конструкций может изготавливаться из различного материала (глава 2, раздел 3), что может привносить некоторые конструктивные особенности.

Наиболее многочисленной является группа кольцевых насадок. Эти насадки имеют форму цилиндра, высота которого равна диаметру. Конструктивно они могут иметь форму сплошного цилиндра, гладкого или с рифленой поверхностью, цилиндра с внутренними перегородками различной формы, перфорированного цилиндра, цилиндра с прямоугольной перфорацией

и лепестками отогнутыми во внутрь цилиндра. Форма и расположение лепестков могут быть самыми различными.

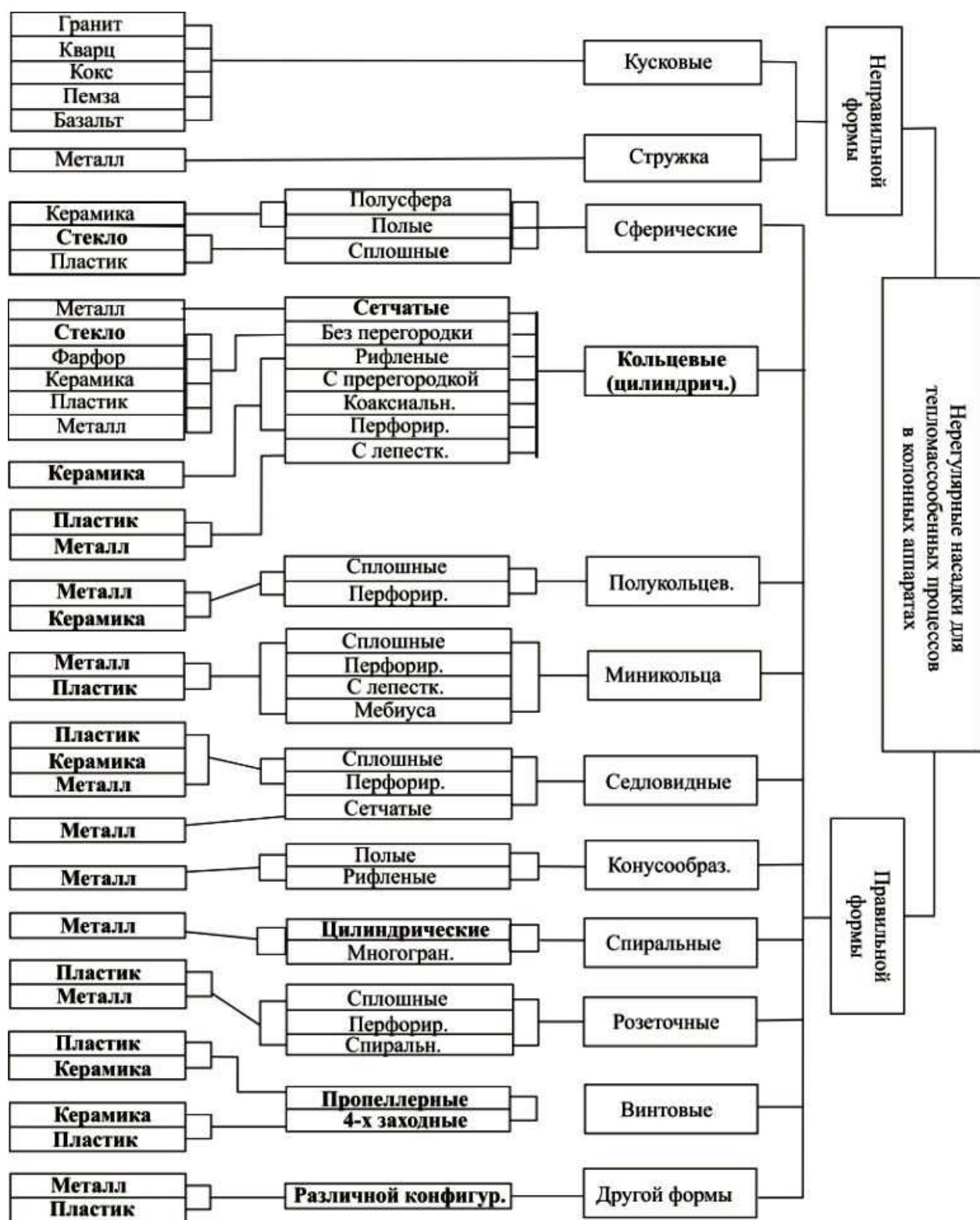


Рис. 3.2 Классификация фиксированных нерегулярных насадок для тепло-массообменных процессов в колонных аппаратах.

К этой группе могут быть отнесены и насадки, имеющие форму коаксиальных цилиндров.

Более других близки к описанным миникольцевые насадки. Эти насадки имеют форму цилиндра, высота которого меньше диаметра. Наибольшее применение получили насадки этой группы, у которых высота равнялась 0,3 диаметра, перфорированные с лепестками отогнутыми во внутрь кольца.

К полукольцевым можно отнести насадки, элементы которых образованы двумя полукольцами, оси которых взаимно перпендикулярны. Это одна из наиболее новых форм насадок, нашедших применение в довольно широких масштабах, начиная с 80-х годов в странах СНГ.

Значительно менее многочисленны конструкции насадок, имеющие форму конуса, простого или усеченного. Для насадки, в основе которой лежит спиральная форма, известно несколько модификаций, отличающихся конструктивными признаками по профилю металла, из которого они изготавливаются. Модификации винтовых насадок отличаются в основном количеством лопастей и их профилем.

Довольно большим разнообразием отличаются широко используемые в промышленности насадки, имеющие форму седел. Они заметно отличаются друг от друга конструктивно. В то же время есть значительные отличия в конструкции и для седел одной формы, но изготовленных из различных материалов, например, металла и керамики.

Нерегулярные сетчатые насадки в основном имеют форму колец или седел. Насадки, у которых нет преобладания какой-либо правильной формы, большей частью довольно сложны в изготовлении и, как правило, в промышленности мало используются.

Описание конструкций насадок с акцентом на насадки, использование которых в настоящее время продолжается (см. далее в разделе 3.2 и 3.3).

Исторически первыми регулярными насадками для осуществления массообменных процессов в колонных аппаратах были нерегулярные насадки правильной формы, уложенные в аппарат в определенном порядке (рис. 3.3).

Это были кольца или кирпичи. В настоящее время такого рода массообменные устройства мало используются, как в силу их недостаточной эффективности, так и высокой трудоемкости загрузки в колонны. Впрочем также, как и блочные насадки, основу которых составляют сотовые керамические элементы или щиты из досок. Блоки из вертикально установленных винтовых элементов или гофротруб могут использоваться в пленочных абсорберах. Более эффективными являются насадки из гофрированных листов (неперфорированные и перфорированные). Модификации этих насадок различаются наклоном и высотой гофр, расстоянием между ними, конфигурацией перфорации и другими деталями. Такие насадки могут изготавливаться из полимерного материала и металла (рис. 3.3).

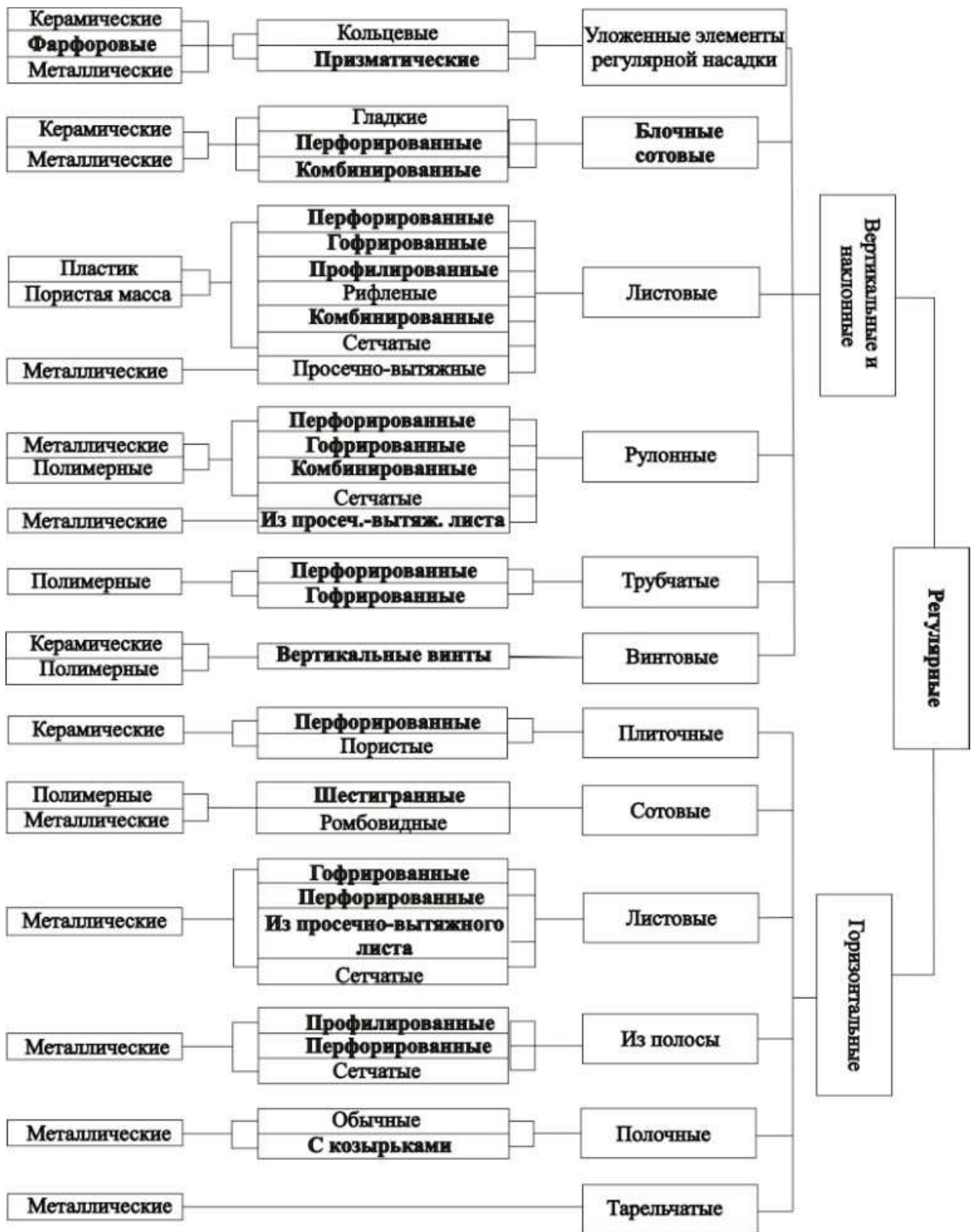


Рис. 3.3 Классификация регулярных насадок для тепло-массообменных процессов в колонных аппаратах.

Из этих материалов изготавливаются сетчатые гофрированные насадки, которые могут укладываться в виде параллельных пластин или в виде рулонов. В последнем случае имеет место меньшее влияние пристенного эффекта на однородность потоков. Сетчатая гофрированная насадка обладает высокой эффективностью и низким гидравлическим сопротивлением, поэтому она широко используется для разделения трудноразделяемых компонентов, а также для ректификации под вакуумом. Для изготовления как рулонных, так и листовых насадок широко используются также просечно-вытяжные листы.

В [36] предлагается классификация насадок, представляющая собой некую трансформацию классификации, приведенной выше. Она отличается громоздкостью, менее удобна для использования. В силу этого более предпочтительной следует считать классификацию насадок, предложенную в [34].

3.2. Нерегулярные насадки

Представляется интересной эволюция в развитии конструкций насадочных контактных устройств.

На протяжении длительного времени в XIX веке и ранее в качестве насадки использовались тела неправильной, в основном кусковой формы: базальт, гранит, пемза, шлак, кокс, гравий и даже щепа. Насадочные слои с такого рода насадкой имели низкую долю свободного объема, т.е. низкую пропускную способность, большое гидравлическое сопротивление. Большая доля их поверхности была омертвлена в местах контактов насадочных элементов, а также в застойных зонах жидкости. Естественно, что эффективность таких насадок была невелика.

Первой нерегулярной насадкой правильной формы были шары. Эти тела не имели внутренней полости и потому им были присущи указанные выше недостатки насадок неправильной формы. Но в то же время их показатели были несколько более высокими.

По истине, революционным было изобретение в начале прошлого века насадки правильной формы, имеющей внутреннюю полость. Ею стали так называемые кольца Рашига [45] – кольца, имеющие высоту, равную их диаметру. Кольца изготавливались из керамики, металла, позднее из пластмассы (рис. 2.14, 2.15 и 2.16). Наличие внутренней полости существенно увеличило, по сравнению с шарами, геометрическую поверхность и пропускную способность насадки, снизило ее гидравлическое сопротивление и увеличило эффективность. Однако с позиций сегодняшнего дня кольца Рашига обладают существенными недостатками: их внутренняя поверхность недостаточно хорошо омывается жидкостью. Особенно это касается той части колец, которые в насадочном слое занимают горизонтальное или близкое к нему положение, а доля таких значительна. Также в насадочных слоях из колец Рашига наблюдается экранирование вышележащими элементами нижележащих, что препятствует омыванию жидкостью части внешней поверхности колец. Эти обстоятельства приводят к потере эффективности. Несмотря на это кольца Рашига продолжают использоваться в промышленной практике и в настоящее время благодаря простоте изготовления, а значит и невысокой их стоимости. Возможно и в тех случаях, когда нет требований большой эффективности насадки.

Чтобы повысить эффективность колец Рашига изготавливаемых из керамики, их стали дополнять внутренними перегородками. Так родились кольца с одной перегородкой (кольца Лессинга), с крестовидной перегородкой (рис. 3.4), со спиральными перегородками (рис. 3.5) и др.

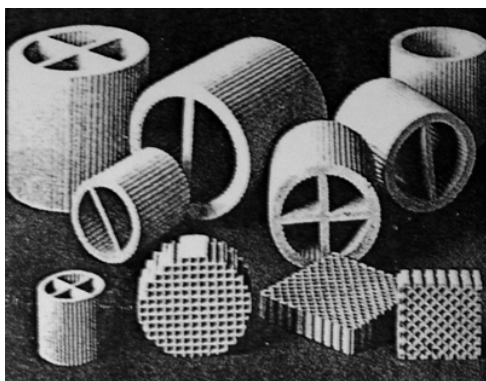


Рис. 3.4 На заднем плане керамические кольца Рашига с одной и крестовидной перегородкой.

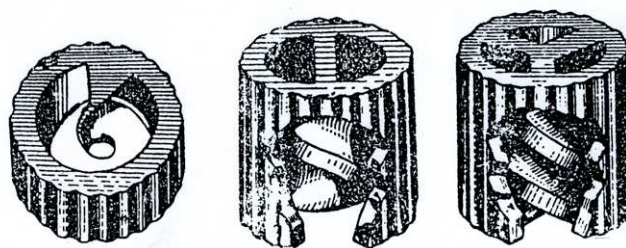


Рис. 3.5 Керамические кольца Рашига с одничной, двойной и тройной спиралью.

Хотя внутренние перегородки увеличили геометрическую поверхность колец Рашига, они в то же время еще более ухудшили омывание внутренней полости жидкостью и увеличили застойные зоны жидкости. Поэтому эффективность колец с внутренней перегородкой увеличилась не столь значительно по сравнению с кольцами Рашига без перегородок.

Существенного увеличения эффективности от насадок с перегородками следует ожидать только в том случае, если оси таких колец будут ориентированы параллельно оси аппарата с насадкой. Такое имеет место при правильной укладке колец, т.е. когда они являются составными элементами регулярной насадки.

Для дальнейшего улучшения показателей кольцевых насадок очень важным явилось нанесение перфорации. Последняя улучшила омывание внутренней поверхности колец, как жидкостью, так и газом и улучшила как гидродинамические показатели, так и эффективность (см. разделы 5.2 и 5.3). Но перфорация сама по себе неминуемо снижает удельную поверхность насадки, что нежелательно.

Этого удалось избежать в конструкции колец Палля [47] (рис. 2.17, 2.18, 2.19 и 2.20). Эти кольца имеют прямоугольную перфорацию, а образовавшиеся в результате перфорации язычки, отогнуты вовнутрь кольца. Таким образом, с одной стороны сохранилась удельная поверхность, с другой стороны язычки

способствуют лучшему перемешиванию потоков внутри кольца и на турбулизации. В результате существенно улучшились все показатели по сравнению с кольцами Рашига: эффективность увеличилась на 25%, гидравлическое сопротивление снизилось на 37%.

Эта высокоэффективная насадка в середине прошлого века занимала доминирующие позиции и широко использовалась во всех промышленных странах мира.

Вскоре после появления колец Палля различными фирмами стали разрабатываться их разновидности. Они различаются размером и месторасположением перфорации, формой язычков (плоские или искривленные), формой самой перфорации. Так кольца Белецкого имеют перфорацию в виде треугольника и соответствующей формы язычки, а кольца Germania преформацию в виде усеченного конуса. В некоторых конструкциях наносились горизонтальные дуги для увеличения жесткости элементов и большей турбулизации стекающей по насадке жидкости. В некоторых конструкциях язычки разрезались, и разрезаемые части отгибались в разные стороны для более интенсивного перемешивания фаз внутри колец.

На рис. 3.6 приводятся некоторые из разновидностей металлических колец Палля. Следует отметить, что, несмотря на довольно многочисленные трансформации начальной конструкции колец Палля с целью улучшения их характеристик, эта цель практически не была достигнута. Основные характеристики, такие как эффективность и гидравлическое сопротивление, оказались весьма близкими к друг к другу для всех модификаций и мало отличаются от характеристик первоначальных колец Палля. Некоторые сравнительные характеристики приведены в разделе 3.4.



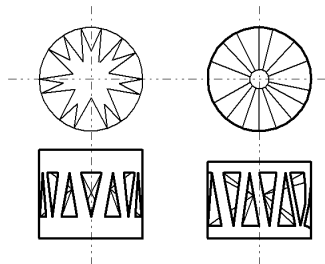
Кольца “flexiring”[48]



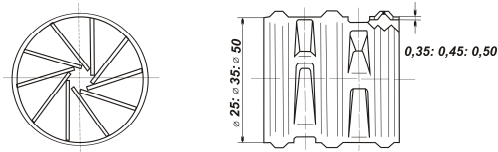
Кольцо Хай-Пэк [49]



Кольца K-PAC [48]



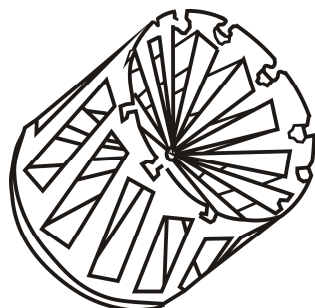
Кольца Белецкого [32]



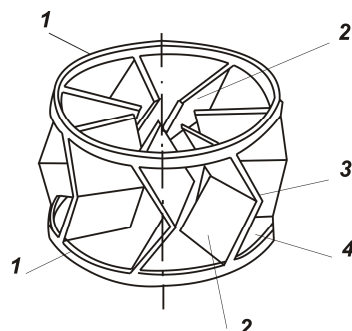
Кольца Germania [53]



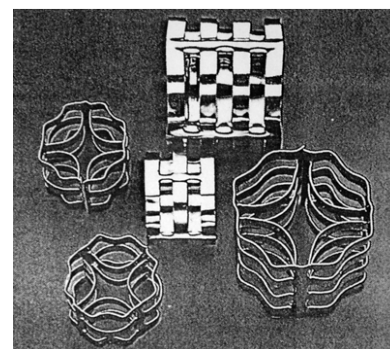
Кольца Niflow [82]



Кольца PSL [67]



Модифицированная цилиндрическая насадка [77]



Кольца VSP [78]

Рис. 3.6 Конструкции кольцевых насадок – разновидностей колец Палля.

Еще более высокими показателями обладает отечественная насадка ГИАП-НЗ. Эффективность ее на 10% выше, гидравлическое сопротивление на 26% ниже, чем у колец Палля. Этого удалось достигнуть за счет оригинальной формы насадочных элементов, которые представляют собой два перфорированных полукольца, расположенных под углом 90° друг к другу и соединенных перфорированной квадратной перегородкой.

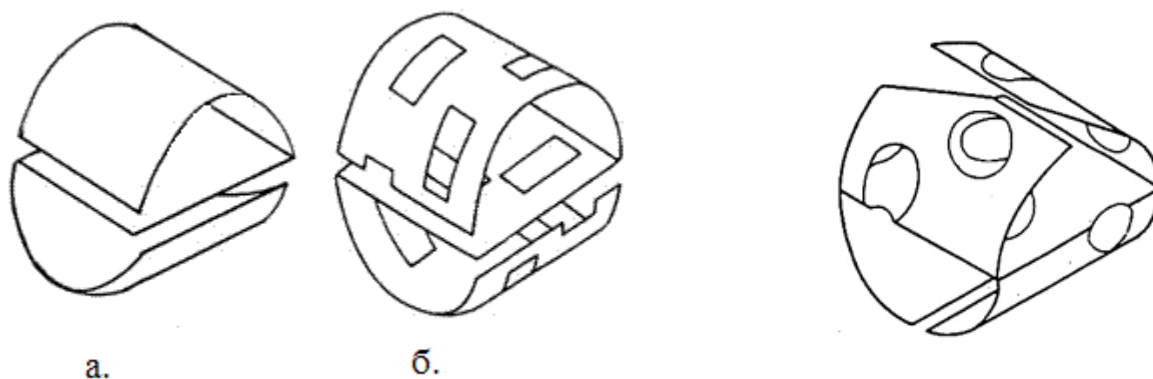


Рис. 3.7 Насадка ГИАП-Н2: а – без перфорации; б – с перфорацией [444].

Рис. 3.8 Металлическая насадка ГИАП-Н3 [448].

Эта насадка при любой ориентации элемента в слое более открыта для омывания ее внутренней поверхности по сравнению с кольцами Палля: открытый торец полуцилиндра, либо зазор на полуцилиндрах всегда будут располагаться перпендикулярно основному вектору скорости.

Насадка ГИАП-Н3 нашла себе широкое использование в два последних десятилетия прошлого века. Она была загружена в абсорберы и десорберы агрегатов большой единичной мощности производства аммиака на многих азотно-туковых комбинатах взамен выбывающих из строя колец Рашига и Палля. Всего было внедрено более 1 миллиона насадочных элементов, избавив страну от закупки колец Палля за рубежом.

В течение последнего государственного пятилетнего плана Союза планировалось изготовление 3,5 миллионов насадочных элементов ГИАП-Н3 для замены на них насадки на всех комбинатах азотной промышленности страны. Эта насадка и на сегодня остается одной из лучших кольцевых нерегулярных насадок в мировой промышленной практике.

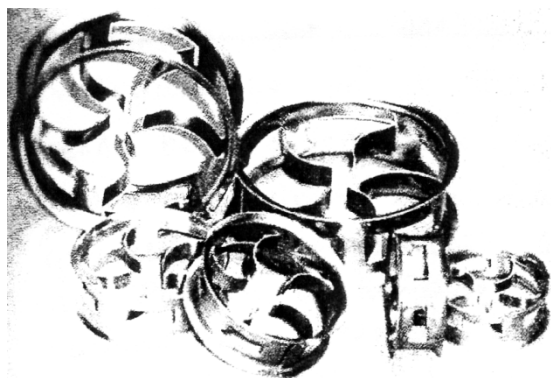
Большим успехом в совершенствовании нерегулярных массообменных насадок было создание миникольцевых насадок. Миникольцо представляет собой как бы $\frac{1}{3}$ разрезанного перпендикулярно его оси кольцо Палля. Такое миникольцо, высота которого в 2 раза меньше его диаметра, имеет, как и кольцо Палля, перфорацию и отогнутые вовнутрь кольца лепестки.

В настоящее время известен ряд конструкций металлических миникольцевых насадок, отличающихся одним или двумя рядами прямоугольной перфорации, дополнительной перфорацией, мелкими круглыми отверстиями на корпусе и на отогнутых лепестках, одной или двумя отбортовками по концам насадочного элемента, количеством (двумя или тремя) вдавленных полос. Ряд конструкций миникольцевых насадок изготавливается из пластмасс. Некоторые конструкции металлических миникольцевых насадок представлены на рис. 3.9.

Главным структурным свойством миникольцевых насадок является их способность к самоориентации в пространстве колонного аппарата при загрузке внавал. В отличие от кольцевых насадок с высотой равной диаметру, 60% которых при загрузке внавал преимущественно укладываются горизонтально [32], горизонтальную позицию занимают значительно больший процент миникольцев. Особенно в случае их дискретной загрузки. Это свойство делает их существенно более открытыми для контактирующих в условиях противотока газа и жидкости в слое насадки.

Миникольцевые насадки образуют в силу сказанного выше квазирегулярную объемную структуру с относительно большим живым сечением, с пониженным гидравлическим сопротивлением и повышенной пропускной способностью. Высокая степень омывания поверхности элементов жидкостью способствует высокой эффективности миникольцевых насадок, превосходящей по эффективности кольцевые насадки типа колец Палля.

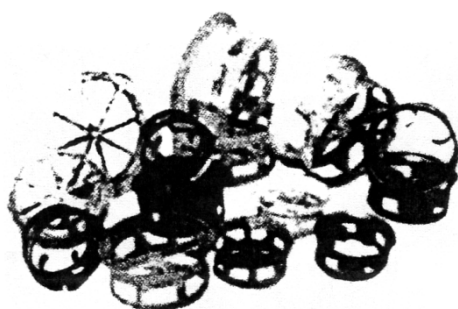
Единственным недостатком миникольцев является большое количество насадочных элементов в единице объема, что, естественно, ведет к удорожанию изготовления 1 м^3 насадки.



Каскадные миникольца «Koch-Glitsch» [49]



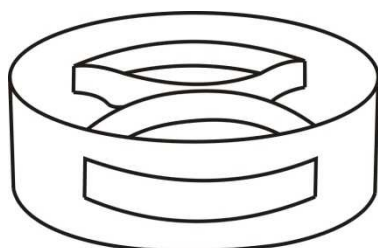
Каскадные миникольца «Mass Transfer Inc» [82]



Миникольца Ladder [83]



Миникольца β -ETA RING [49]



Миникольцо ГИАП [118]



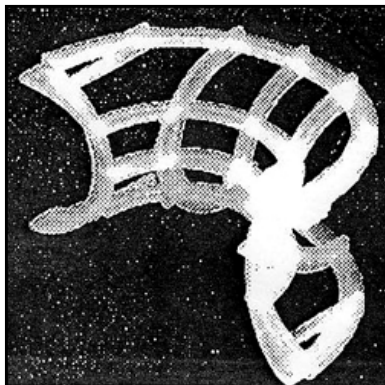
Миникольцевая насадка NT-1 [83]

Рис. 3.9 Миникольцевые насадки из металла.

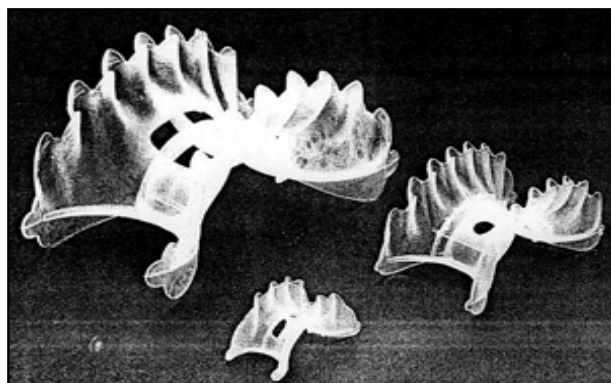
Особую группу насадок составляют седлообразные насадки. Первоначально эти насадки изготавливались из керамики. Это седла Берля и Инталокс. Хотя элементы этих насадок не имеют внутренней полости, благодаря особенности формы их поверхность лучше смачивается, чем поверхность колец Рашига, и потому их эффективность выше последних при достаточно высоком гидравлическом сопротивлении и соответственно невысоких предельных нагрузках по газу. В свое время керамические седла

находили себе довольно широкое использование наряду с керамическими кольцами Рашига. Особенно в агрессивных средах. Для чего изготавливались из коррозионно стойких керамик.

1



2



3

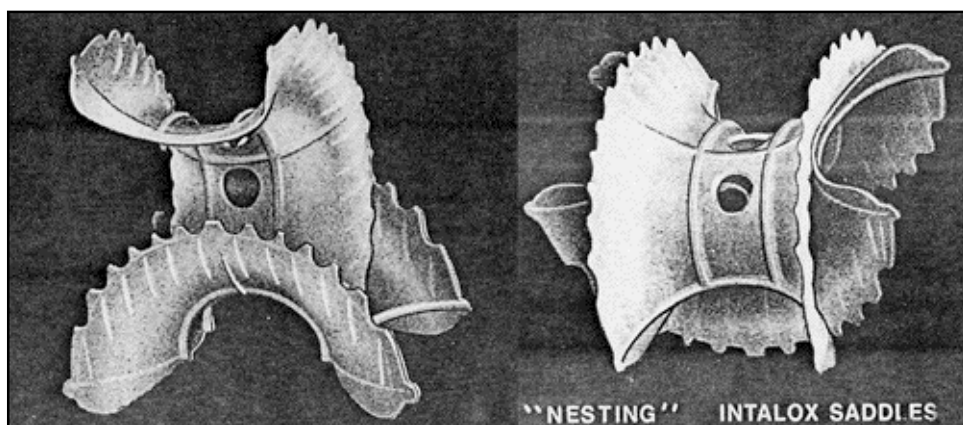


Рис. 3.10. Полимерные насадки в форме седел: 1- Хифлоу; 2 – Суперторус; 3 – СуперИнталокс.

Седлообразные насадки из пластмасс (см. рис. 3.10) различаются формой гребешков по краям элементов, размером, формой и месторасположением

перфорации, впадин и выступов. Преимуществом их по сравнению с керамическими седлами является большая пропускная способность и меньшее гидравлическое сопротивление. Также существенно более низкий удельный вес. Использование седел из пластмасс ограничено условиями коррозии и температурным режимом (см. табл. 3.3).

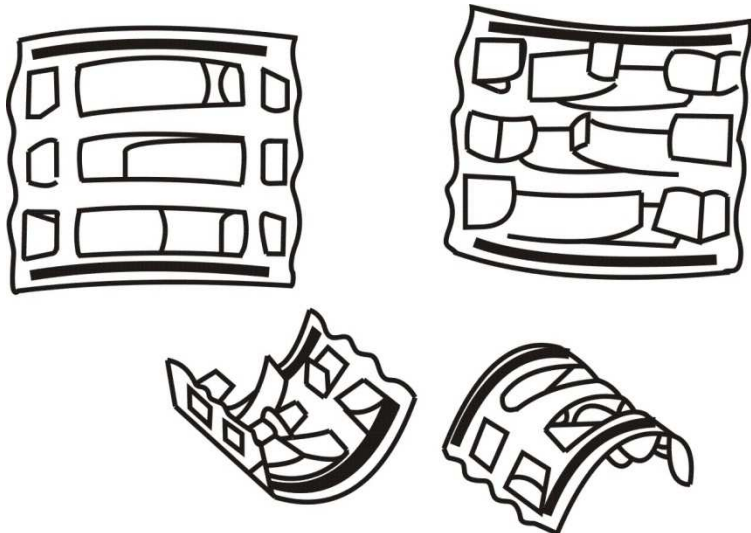
Металлические седлообразные насадки имеют форму полукольца с прямоугольной перфорацией и лепестками, отогнутыми вовнутрь (насадка Лева) или лепестками с разрезанными концами и выдавленными дугами (насадка ИМТР). Некоторые конструкции имеют дуги, выдавленные в разные стороны (см. рис. 3.11).

Все эти насадки образуют насадочные слои с весьма рыхлой структурой и потому более высокой пропускной способностью и более низким гидравлическим сопротивлением, по сравнению с кольцевыми насадками. Минимум застойных зон жидкости и омертвления поверхности в местах контакта элементов делают также и более эффективными.

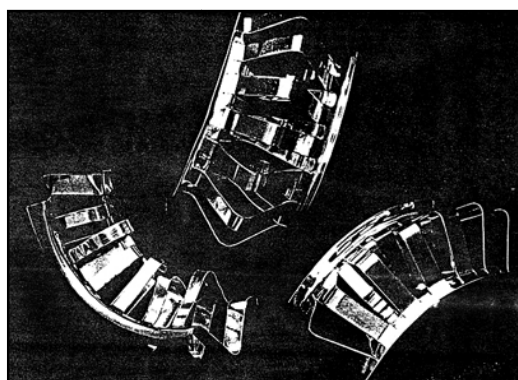
Наиболее высокие показатели имеют насадки Лева и «Инжехим 2002» (раздел 3.5). Самые высокие показатели у насадки «Инжехим 2002». Это достигается за счет уникальности формы элементов, а также тем, что вся ее поверхность имеет мелкие выступы и впадины. Эта макрошероховатость обеспечивает дополнительную турбулизацию стекающей жидкости и ее пограничного слоя, интенсифицируя массоперенос [299].

Помимо рассмотренных выше видов нерегулярных насадок известны ряд конструкций насадок иной формы, изготавливаемых из металла или полимерного материала (см. рис. 3.12). Некоторые из них отличаются сложностью изготовления, практически все они уступают по своим показателям кольцам, миникольцам и седлообразным насадкам, и потому их использование весьма ограничено.

Подробно конструкции различных насадок и некоторые их характеристики приведены в [125]. Сравнительные характеристики насадок, находящих себе промышленное использование, см. в разделе 3.4.



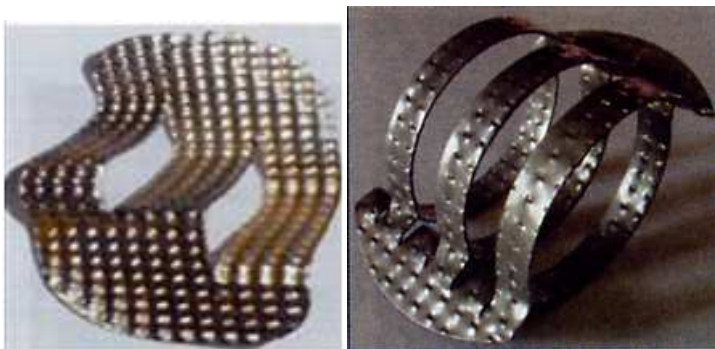
Насадка Лева [119]



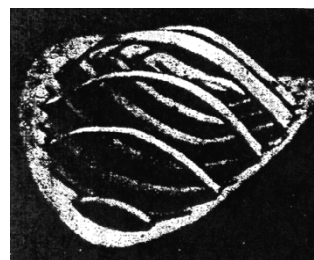
Насадка K4G [120]



Насадка ІМТР [49]

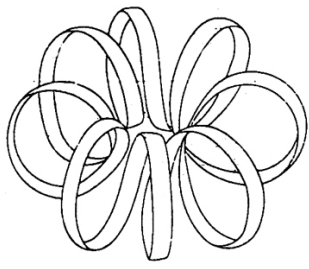


а - «Инжехим 2000», б - «Инжехим 2002»
[401,403]

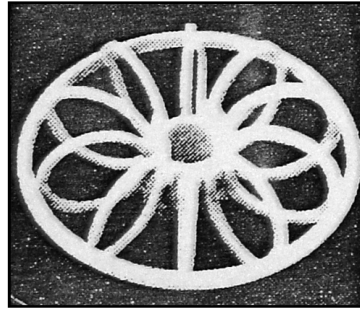


Насадка СНР МГУИЭ [127]

Рис. 3.11 Седлообразные металлические насадки.



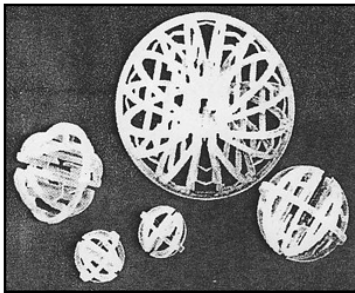
Розетка Теллера [6]



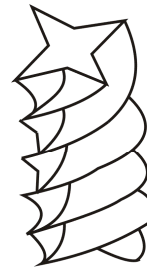
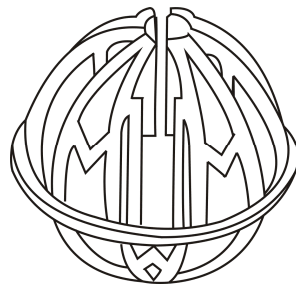
Насадка Динпак [82]



Насадка Snowflake [155]



Насадка Хакетте [78]

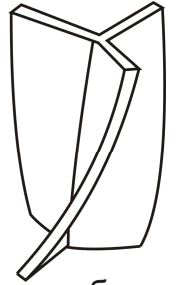


а.

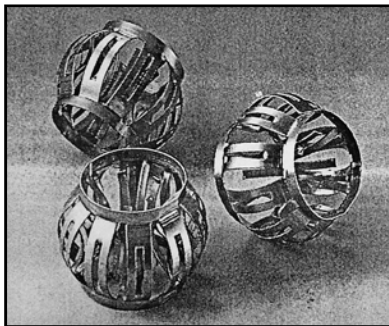
Винтовая насадка:

а – 4-хлопастная;

б - треххлопастная[151]

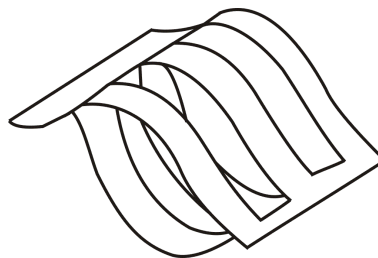


б.

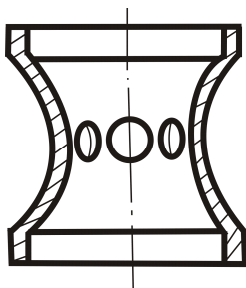
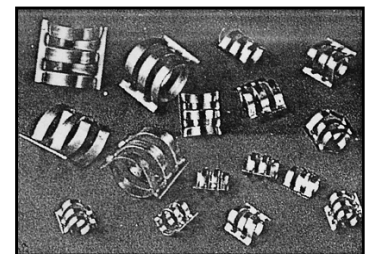


Насадка Топ-Пак

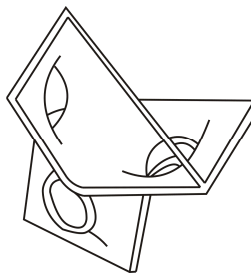
[78, 131]



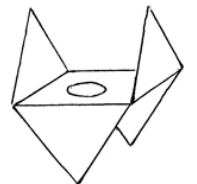
Насадка «Интерпак» [78]



Соплообразная насадка [156]



Угловая насадка [131]



Насадка с отогнутыми пластинами [125]

Рис. 3.12 Нерегулярные насадки различной формы.

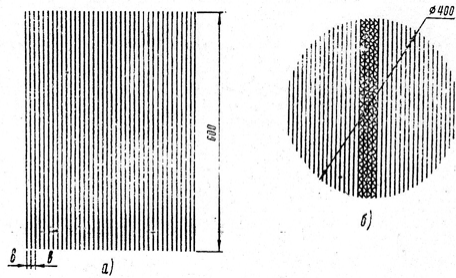
3.3. Регулярные насадки

Само название этой группы насадок говорит о том, что в отличие от нерегулярных насадок, загружаемых в навал и имеющих хаотическую структуру, регулярные насадки имеют упорядоченную структуру. Если вернуться к многоканальной модели насадочного слоя, то регулярные насадки представляют собой систему параллельных каналов постоянной формы и сечения по высоте, одинаковой формы по поперечному сечению насадочного слоя.

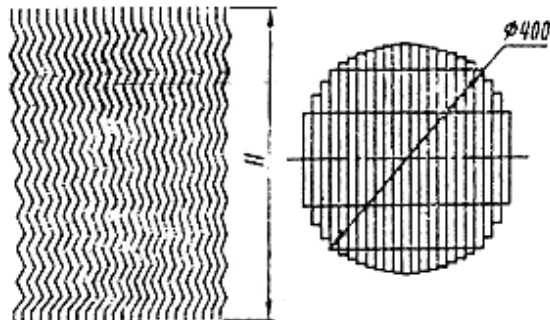
Это дает регулярным насадкам ряд преимуществ по сравнению с нерегулярными: отсутствуют застойные зоны жидкости в местах контакта элементов нерегулярной насадки, не участвующие в процессе массообмена. То есть существует теоретическая возможность 100% смачивания поверхности насадки жидкостью. Наличие каналов правильной формы способствует более низкому гидравлическому сопротивлению в расчете на единицу высоты насадочного слоя и большую пропускную способность. Увеличенная поверхность контакта фаз приводит к увеличению эффективности.

Эти преимущества определяют широкомасштабное использование регулярных насадок в последние десятилетия. В настоящее время известно несколько десятков различных конструкций нерегулярных насадок. Они изготавливаются из различных материалов: керамики, полимерных материалов, металлов (просечно-вытяжного или гладкого листа).

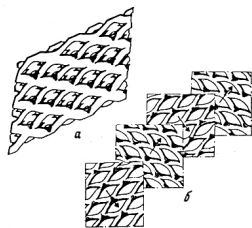
По своему основному конструктивному признаку регулярные насадки могут быть разделены на несколько групп. Наиболее многочисленной группой являются так называемые плоско-параллельные насадки, представляющие собой установленные параллельно друг другу с определенным дистанционированием вертикальные листы (см. рис. 3.13).



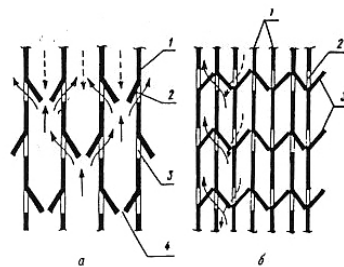
Плоскопараллельная насадка [186]



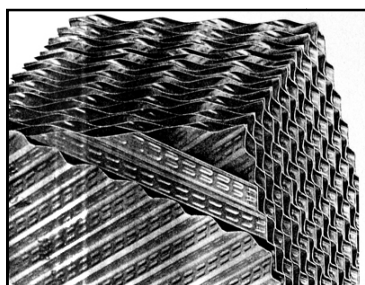
Насадка «Зигзаг» [186]



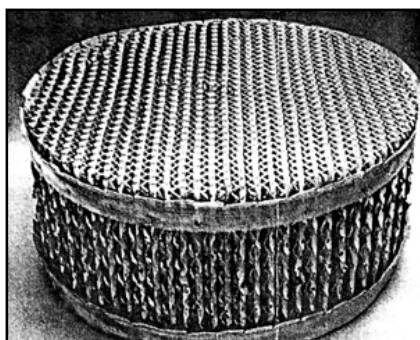
Насадка из просечно-вытяжного
листа [203]



Насадки с козырьками [227]



Насадка из пластика
BIOdec [182]



Насадка из сетки Инталокс
[233,255]



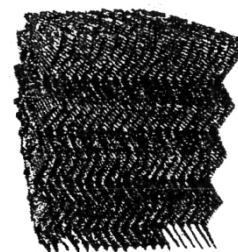
Керамическая насадка
Керопак [277]



Металлическая насадка
Зульцер



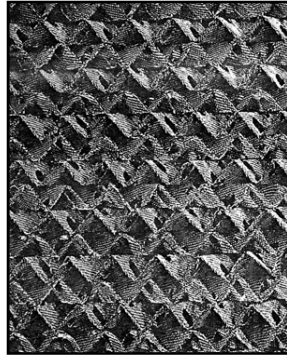
Металлическая насадка
Мелопак



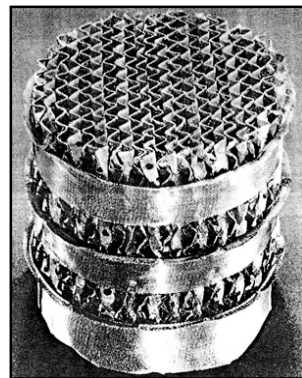
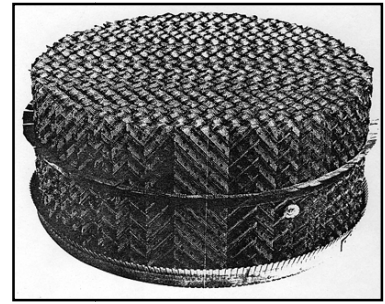
Сетчатая насадка Ваку-
Пак



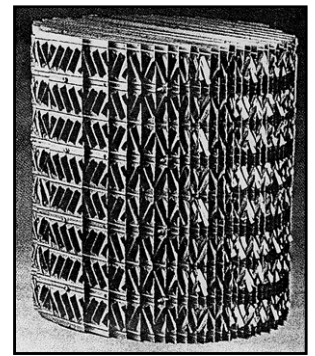
Насадка из металла или
пластика Флексипак
[299]



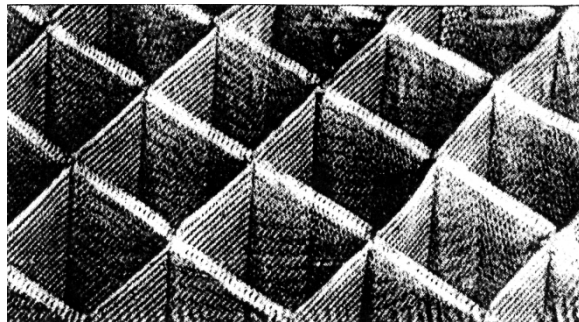
Сетчатая насадка Montz-Pack [82,233,250]



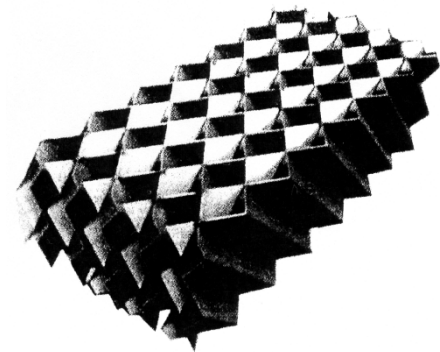
Насадка Гемпак [82,333]



Металлическая насадка
Ралу-Пак



Металлическая насадка «Спрейпак»



Насадка FLEXIPACS

Рис. 3.13 Регулярные плоскопараллельные насадки.

Первоначально это были гладкие листы и эффективность такой насадки была не очень велика. Для увеличения турбулизации текущей по поверхности насадки жидкости стали прибегать к гофрированию листов, в результате чего движение жидкости удлинит ее, и увеличилась поверхность контакта фаз. В

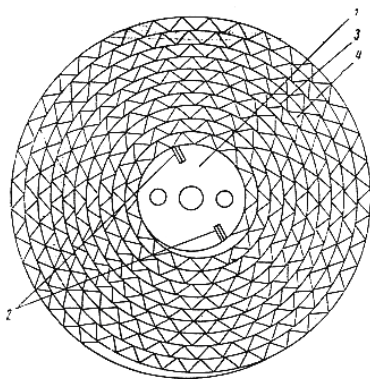
настоящее время используется различное расположение гофр (под разными углами к оси аппарата), а также чередование углов наклона гофр в соседних рядах. Используется также такой прием, как создание на поверхности листов макрошероховатостей путем комбинации выступов и впадин, что способствует дополнительной турбулизации жидкости.

Однако упомянутые конструкции регулярных насадок имели недостаток, связанный с начальным распределением жидкости. Для обеспечения эффективной работы насадки требовалось организовать подачу жидкости таким образом, чтобы в каждом канале на единицу площади его поперечного сечения приходилось равное ее количество. Это было трудно сделать даже в условиях лабораторной или опытной установки и тем более невозможно в промышленной колонне и тем труднее, чем больше ее диаметр.

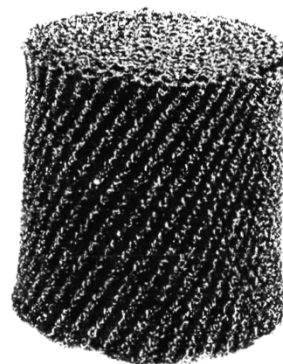
Чтобы преодолеть эти трудности стали изготавливать насадки из просечено-вытяжного листа, перфорировать листы, что ликвидировало замкнутость каналов, сделало возможным переток фаз между соседними каналами. Это также способствовало увеличению эффективности в результате поперечного перемешивания. Если ранее в замкнутый канал попадало меньше расчетного количества жидкости или не попадали совсем из-за трудности распределения, то он работал как байпас, что снижало эффективность.

Способствует повышению эффективности регулярной насадки изготовление из гофрированной сетки.

Другой значительной группы регулярных насадок являются рулонные насадки (см. рис. 3.14).



Спиральная насадка из гофрированной ленты [186]



Сетчатая насадка Гудлоу [272]

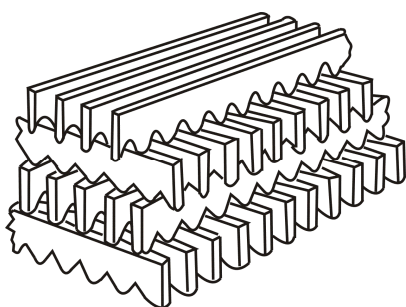


Насадка «Инжехим» [402]

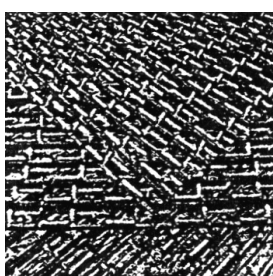


Из полосы с наклонными гофрами [274]

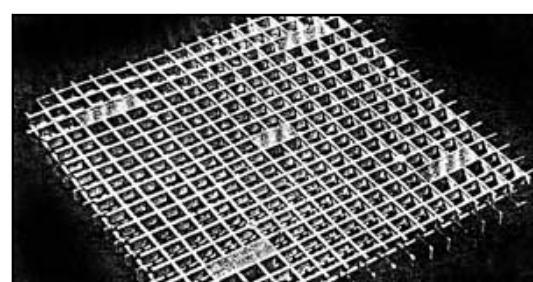
Рис. 3.14 Регулярные рулонные насадки



Хордовая насадка

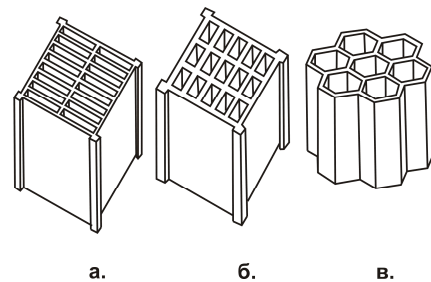
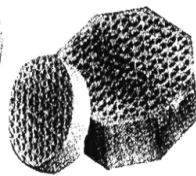
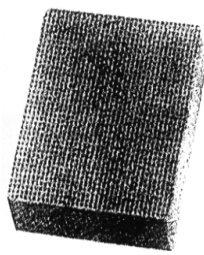


Насадка Глитч-Грид



Насадка Polygrid

Рис. 3.15 Регулярные решетчатые насадки.



Керамическая насадка
Honey-comb Ceramic [83]

Блочная сетчатая
насадка
«Инжехим» [452]

Блочные насадки:
а – щелевые блоки;
б – решетчатые блоки;
в – сотовые блоки.

Рис. 3.16 Регулярные блочные насадки.

Как и плоскопараллельные насадки, они в основном изготавливаются из металла и полимерного материала. Используются упомянутые выше приемы как гофрирование и перфорация полосы. Большой частью они изготавливаются из сетки. Рулонные насадки более удобны, чем плоскопараллельные для монтажа в колоннах, особенно большого диаметра. Более плотно укладываются вблизи стен аппарата, т.е. снижается негативный стенный эффект.

Особую группу составляют решетчатые насадки (см. рис. 3.15), которые не пользуются большей частью для охлаждения газов в скрубберах. Они имеют объемную структуру. Легко монтируются из собранных заранее больших блоков. Ранее большое распространение имели решетчатые насадки из древесины. В настоящее время они в основном изготавливаются из полимерных материалов.

Значительно меньшее распространение имеют блочные насадки (см. рис. 3.16). Они преимущественно изготавливаются из коррозионно стойкой керамики для использования в агрессивных средах. Первоначально для этих целей использовались керамические кольцевые насадки (кольца Рашига и их модификации), которые вручную укладывались в аппараты, образуя организованную структуру. В настоящее время от этого целиком отказались, используя керамические блоки. Поскольку блоки не имеют достаточно высокой

доли свободного объема, их гидравлическое сопротивление в значительной степени высоко. При укладке блоков в аппараты вблизи стенок образуются байпасные каналы, снижающие эффективность.

3.4. Насадки «Инжехим»

Инженерно-внедренческий центр «Инжехим» более двадцати лет занимается разработкой, исследованием и внедрением в промышленность различных контактных устройств для тепломассообменных аппаратов, газосепараторов и отстойников. Разработан и налажен выпуск более десятка различных регулярных и нерегулярных контактных устройств. Результаты экспериментальных исследований массообменных и гидравлических характеристик насадок даны в главе 11, а их промышленное внедрение в работах [198,202,288,294,299,302,307,309,452].

Регулярная рулонная гофрированная насадка [351]

Регулярная насадка (рис. 3.17) для тепломассообменных аппаратов, состоящая из пакетов, набранных из гофрированных листов 1 и установленных один над другим слоями, отличающаяся тем, что центральный пакет в слое выполнен в виде цилиндра 2, а остальные пакеты размещены в виде долей коаксиальных цилиндров 3, при этом гофры листов расположены под углом к горизонту, а в смежных листах пакета выполнены перекрестно.

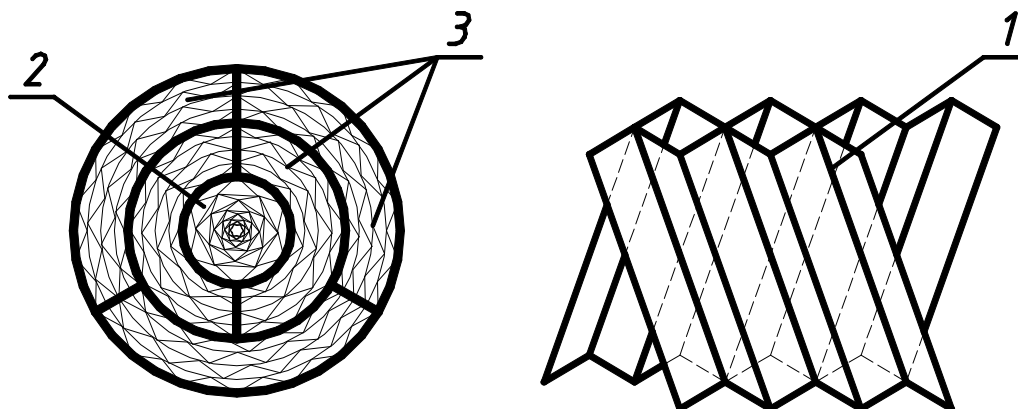


Рис. 3.17 Вид регулярной насадки.

Изобретение относится к конструкциям регулярных насадок, предназначенных для проведения тепломассообменных процессов в системе газ(пар)-жидкость и может найти применение в химической, нефтяной, газовой и ряде других смежных отраслях промышленности, в частности, в процессах ректификации, абсорбции. Задачей изобретения является упрощение конструкции насадки, снижение трудозатрат на ее изготовление, повышение эффективности массообмена. Данное техническое решение позволяет упростить конструкцию насадки, обладающей большой удельной поверхностью, снизить трудозатраты на ее изготовление и повысить эффективность работы массообменного аппарата за счет равномерного распределения насадочных элементов в пакетах, а пакетов в слое, независимо от диаметров колонн. Насадка может быть выполнена как с элементами шероховатости поверхности (пуклевкой), так и с просечками. Стабильность работы насадки при малом гидравлическом сопротивлении подтверждена успешной апробацией в промышленных условиях (глава 8).

В таблице 3.1 приведены основные характеристики разработанной насадки.

Таблица 3.1 Характеристики насадки

№ п/п	Характеристики насадки	Единица измерения	Численное значение
1	Удельная поверхность	$\text{м}^2/\text{м}^3$	180–300
2	Свободный объем	$\text{м}^3/\text{м}^3$	0,904
3	Эквивалентный диаметр	м	~ 0,015
4	Гидравлическое сопротивление при факторе пара $F = 2,6$	Па/м	120
5	Высота, эквивалентная одной теоретической тарелке (ВЭТТ)	м	0,6–0,8

Элемент регулярной насадки

Элемент насадки для массообменных аппаратов, выполненный в виде тонкостенного цилиндра 1 с изогнутыми радиально к центру просечными элементами, отличающийся тем, что просечные элементы расположены по окружности в верхней и нижней частях цилиндра (4 и 4') и соединены перемычками, являющимися частью боковой поверхности цилиндра, и образуют замкнутые фигуры, при этом нижняя фигура повернута относительно верхней вокруг оси цилиндра (рис. 3.18).

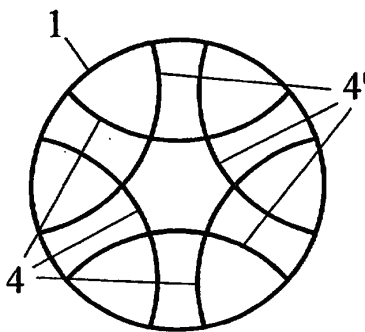


Рис. 3.18 Элемент насадки.

Регулярная насадка для массообменных аппаратов, содержащая уложенные в пакет гофрированные листы с перекрестным расположением гофров в соседних листах, с выполненными на поверхности листов выступами, отличающаяся тем, что выступы расположены горизонтальными рядами, при этом расстояние между выступами в рядах меньше расстояния между рядами (рис. 3.19).

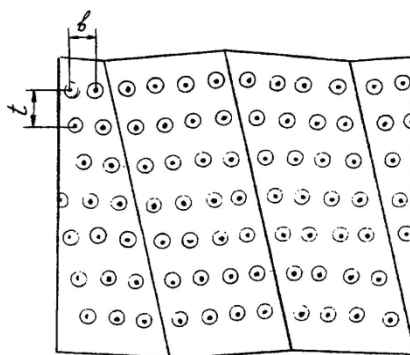


Рис. 3.19 Элемент гофрированной насадки.

Регулярная сегментная насадка

Регулярная насадка для массообменных аппаратов, выполненная в виде пакета из сдвоенных лент, одна из которых имеет треугольные гофры, отличающаяся тем, что на боковых поверхностях гофр выполнены лепестки в виде круговых сегментов, при этом хорды сегментов гофр расположены под углом друг к другу.

Сегментная регулярная насадка изготавливается в виде набора кольцевых сегментных блоков, которые при сборке плотно заполняют весь рабочий объем колонны (рис. 3.20). Каждый сегментный блок выполнен в виде пакета из гофрированных листов с перекрестным расположением гофров в смежных листах.

Такая конструкция, в отличие от традиционной формы регулярной насадки в виде прямоугольных блоков с обрезанными по радиусу колонны краями, выгодно отличается плотной укладкой с исключением зазоров между насадкой и корпусом колонны, которые приводят к нарушению равномерного

распределения жидкой фазы по сечению колонны. Благодаря своей геометрии сегментная насадка сохраняет исходное равномерное распределение фаз в поперечном сечении колонны при большой высоте слоя насадки (12 м и более). Технические характеристики представлены в табл. 3.2.

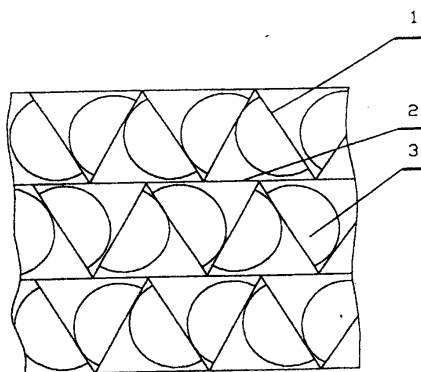


Рис. 3.20 Сегментная насадка.

Регулярная сегментная насадка (рис. 3.21) предназначена для заполнения рабочего объема колонных аппаратов для процессов ректификации, абсорбции, десорбции и экстракции при температурах от $-250\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+250\text{ }^{\circ}\text{C}$ при избыточном атмосферном давлении и под вакуумом для создания развитой поверхности контакта рабочих фаз.



Рис. 3.21 Вид сегментной регулярной насадки.

Насадка успешно применяется в качестве контактных устройств в массообменных аппаратах химической, нефтехимической, нефтеперерабатывающей и прочих отраслей промышленности.

Достоинства сегментной насадки:

- высокая разделяющая способность (ВЭТТ от 0,15 м);
- широкий диапазон устойчивой работы;
- низкий удельный перепад давления (10–300 Па/м).

Блочная регулярная насадка изготавливается в виде блоков из скрепленных между собой вертикальных гофрированных пластин (рис. 3.22).

Таблица 3.2 Технические характеристики сегментной регулярной насадки

Наименование параметра	Значение
Марка стали	по ГОСТ 4986-79 или другая, более коррозионностойкая
Толщина ленты, мм	0,2–1,0
Варианты обработки поверхности	пуклевка, просечка и гладкая
Угол наклона гофр, град	30–45
Высота гофр, мм	5–20
Удельная масса изделия, кг/м ³	200–600
Удельная поверхность насадки, м ² /м ³	160–350

Гофрированные листы уложены под углом по отношению друг к другу и образуют каналы для потока паровой фазы. Поверхность насадки может иметь специальную обработку в виде регулярных выступов и просечных элементов. Поставляется в виде модификаций с различной удельной поверхностью (от 100 до 350 м²/м³) из тонкой ленты нержавеющей стали толщиной от 0,15 мм до 1 мм. Насадка предназначена для ректификационных и абсорбционных колонн диаметром от 1 до 8 м. Характеризуется высокой разделяющей способностью при низком гидравлическом сопротивлении. Высота, эквивалентная теоретической тарелке, – от 0,2 м.

Блочная регулярная насадка

Изготавливается в виде блоков из скрепленных между собой вертикальных гофрированных под углом пластин. Гофры смежных листов расположены перекрестно по отношению друг к другу и образуют каналы для

потока паровой фазы. Поверхность насадки может иметь специальную обработку в виде регулярных выступов или просечных элементов. Поставляется в виде модификаций с различной удельной поверхностью (от 70 до 250 м²/м³) из стальной нержавеющей ленты толщиной от 0,15 мм до 1 мм. Насадка предназначена для ректификационных и абсорбционных колонн диаметром от 1 до 8 м. Характеризуется высокой разделяющей способностью при низком гидравлическом сопротивлении.

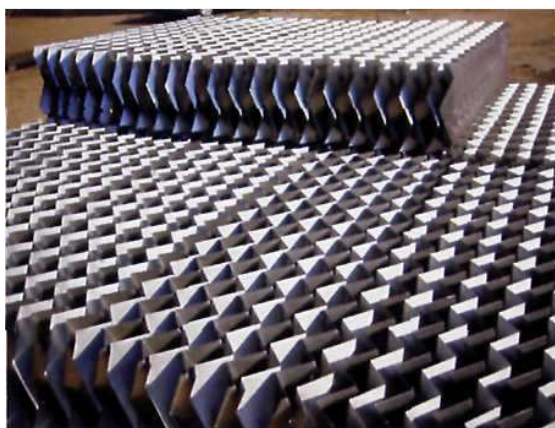


Рис. 3.22 Блочная регулярная насадка.

Характеристики блочной насадки даны в таблице 3.3

Таблица 3.3 Технические характеристики блочной регулярной насадки

Наименование параметра	Значение
Толщина ленты, мм	0,5–1,0
Виды обработки поверхности	пуклеваная, просечная и гладкая
Угол наклона гофр, град	20–35
Высота гофр, мм	12–40
Удельная поверхность насадки, м ² /м ³	70–250

Прижимные и опорные решетки

Предназначены для удерживания контактных устройств в рабочем объеме насадочных аппаратов (рис. 3.23, 3.24).

Применяются в химической, нефтехимической, нефтеперерабатывающей и прочих отраслях промышленности. Решетки фиксируются в аппарате при помощи струбцин, крепление сегментов болтовое. Выпускаются различные модификации, отличающиеся несущей способностью, размерами и материальным исполнением.



Рис. 3.23 Опорная решетка.



Рис. 3.24 Прижимная решетка.

Нерегулярные насадки «Инжесхим» [403,429]

Элемент насадки для массообменных аппаратов

Элемент относится к конструкции насыпных насадок для массообменных аппаратов и может быть использован при осуществлении тепломассообменных процессов в системах жидкость-пар (газ), например, в ректификации, абсорбции, десорбции, дистилляции и других процессах. Элемент насадки имеет на боковой поверхности просечки, изогнутые по окружности. Элемент насадки выполнен в виде параллельных цилиндров, которые образованы просечными элементами, расположенными в ряд по высоте, изогнутыми по окружности поочередно внутрь и наружу. При этом цилиндры соединены перемычками и размещены относительно друг друга таким образом, что их диаметральные плоскости образуют боковую поверхность правильной многогранной призмы. Насадка позволяет повысить эффективность тепломассообмена путем увеличения поверхности межфазного контакта за счет уменьшения каплеобразования и равномерного распределения межфазной поверхности по объему тепломассообменного аппарата.

Известен элемент насадки для массообменных аппаратов, выполненный в виде цилиндра, на боковой поверхности которого выполнены прямоугольные просечки, расположенные рядами по высоте в шахматном порядке и отогнутые по поперечной образующей внутрь цилиндра в виде лепестков, при этом концевая кромка каждого лепестка расположена под углом к поперечной корневой кромке лепестка.

Наиболее близким по технической сущности является элемент насадки для массообменных аппаратов, выполненный в виде тонкостенного отбортованного цилиндра, на боковой поверхности которого выполнены просечные элементы в виде отогнутых внутрь цилиндра лепестков, которые изогнуты по окружности и расположены в ряд по периметру и выполнены в виде встречно расположенных прямоугольных треугольников, основания которых расположены в ряд, при этом поверхность насадки выполнена перфорированной.

Недостатками указанных насадок для массообменных аппаратов является то, что концы отогнутых вовнутрь цилиндра лепестков являются каплеобразующими элементами, способствующими капельному уносу жидкости. Одновременно массообменная поверхность неравномерно распределена по объему тепломассообменного аппарата. Указанные недостатки снижают активную поверхность межфазного контакта и в целом ухудшают эффективность тепломассообмена.

Задачей является создание конструкции элемента насадки, позволяющей повысить эффективность тепломассообмена путем увеличения поверхности межфазного контакта за счет уменьшения каплеобразования и равномерного распределения межфазной поверхности по объему тепломассообменного аппарата.

Решение технической задачи позволяет повысить эффективность тепломассообмена путем увеличения поверхности межфазного контакта за счет уменьшения каплеобразования и равномерного распределения межфазной поверхности по объему тепломассообменного аппарата.

На рис. 3.25 представлен элемент насадки (вид сверху).

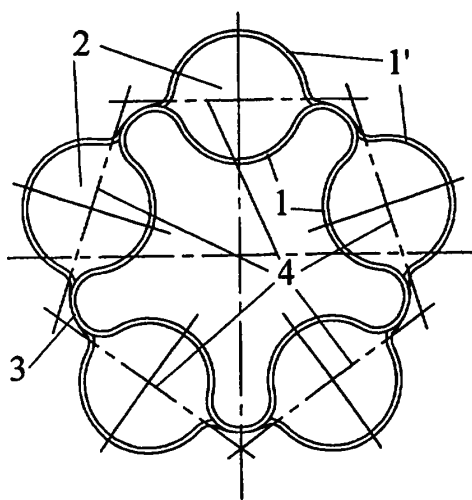


Рис. 3.25 Элемент насадки.

Предлагается насадочный элемент для неупорядоченной загрузки насадки в колонну, на боковой поверхности которого выполнены просечные элементы, которые расположены в ряд по высоте и изогнуты по окружности поочередно внутрь 1 и наружу 1', ряды кольцевых элементов по высоте образуют параллельные цилиндры 2, цилиндры соединены перемычками 3, при этом цилиндры относительно друг друга размещены таким образом, что их диаметральные плоскости 4 образуют поверхность правильной многогранной призмы.

На рис. 3.26 представлен элемент насадки в аксонометрии, который имеет пять параллельных цилиндров, цилиндры расположены так, что их диаметральные плоскости образуют поверхность правильной пятигранной призмы.

Элемент насадки изготавливают штамповкой из листовой стали. При использовании контактной точечной сварки в местах стыка краев по одной из перемычек повышается механическая прочность отштампованного элемента насадки, что позволяет изготавливать ее из более тонкого листового материала и увеличить глубину засыпки без нарушения формы насадки.

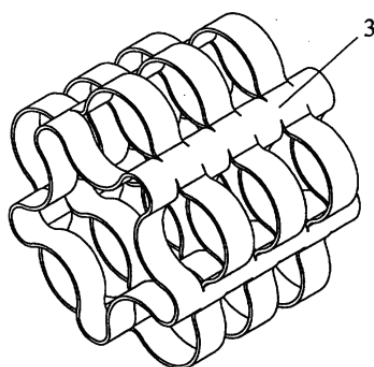


Рис. 3.26 Вид насадки в аксонометрии.

Форма элементов насадки исключает образование локализованных областей неоднородного давления и тем самым разброс эксплуатационных характеристик за счет упорядоченного распределения в навал насадки в различных частях колонны, что приводит к относительно однородной

плотности насадки и обеспечивает увеличение поверхности межфазного контакта жидкость-пар (газ).

Большая удельная контактная поверхность насадки, равномерно распределенная по объему аппарата, и отсутствие каплеобразования способствует интенсивному межфазному взаимодействию пара(газа) и жидкости, которая, стекая по поверхности насадки в виде пленки, дает возможность постоянно обновлять межфазную поверхность.

Промышленные испытания насадки в массообменных аппаратах показали высокие тепломассообменные характеристики.

Насадка «Инжехим-2000»

Нерегулярная насадка «Инжехим-2000» (рис. 3.27) применяется в качестве контактных устройств в тепло- и массообменных аппаратах химической, нефтехимической, нефтеперерабатывающей и прочих отраслей промышленности в процессах ректификации, абсорбции, десорбции и экстракции при температурах от -250°C до $+250^{\circ}\text{C}$ при избыточном и атмосферном давлениях и под вакуумом. Насадка «Инжехим» позволяет повысить эффективность массообменных процессов и имеет расширенный диапазон эффективной работы как по газовой, так и жидкой фазам.

Насадка является современной альтернативой морально устаревшим кольцам Палля, Рашига и аналогичным насадкам. При равной толщине насадочного слоя (рис. 3.28) она обеспечивает большую (на 100–150 %) производительность и меньшее (в 2–3 раза) удельное гидравлическое сопротивление. При этом высота, эквивалентная теоретической тарелке, на 25–30 % ниже, чем у традиционных насадок соответствующего типоразмера. Насадка изготавливается из листа или ленты из нержавеющей или углеродистой стали толщиной от 0,3 до 2 мм. Насадка способна работать с загрязненными средами. Поверхность листа подвергнута специальной металлообработке, улучшающей растекание жидкости по насадке.



Рис. 3.27 Нерегулярная насадка «Инжехим-2000».



Рис. 3.28 Вид насадочного слоя.

Основные технические характеристики насадки «Инжехим-2000» приведены в таблице 3.4.

Широкая номенклатура типоразмеров выпускаемых нерегулярных насадок позволяет перекрыть весь диапазон требуемых потребительских характеристик, от насадок для лабораторных установок четкой ректификации до насадок для промывных колонн, в которых на первое место выходят такие требования, как стойкость к загрязнению и высокие нагрузки по обеим фазам.

Насадка «Инжехим» может быть использована в газосепараторах, насадочных теплообменниках и массообменных колоннах.

ИВЦ «Инжехим» также разработал и запатентовал несколько других видов неупорядоченной насадки (рис. 3.29). Все они отличаются

технологичностью изготовления, простотой конструкции и обеспечивают высокие массообменные характеристики и низкое гидравлическое сопротивление.

Таблица 3.4 Основные технические характеристики насадки «Инжехим–2000»

Размер элемента D, мм	12	16		24		35		45		60	
Толщина материала, мм	0,3	0,4	0,5	0,4	0,5	0,4	0,5	0,4	0,5	0,8	1
Кол-во элементов в м ³ , шт	558 000	184 000		65 000		18 750		11 500		4 450	
Удельная поверхность, м ² /м ³	415,92	266,9	270,9	165,8	167,9	106,3	107,4	100,6	101,3	68,6	69,2
Свободный объем, м ³ /м ³	0,94	0,950	0,938	0,968	0,961	0,979	0,974	0,981	0,976	0,974	0,967
Эквивалентный диаметр, мм	9,06	14,2	13,9	23,4	22,9	36,9	36,3	39,0	38,5	56,8	55,9

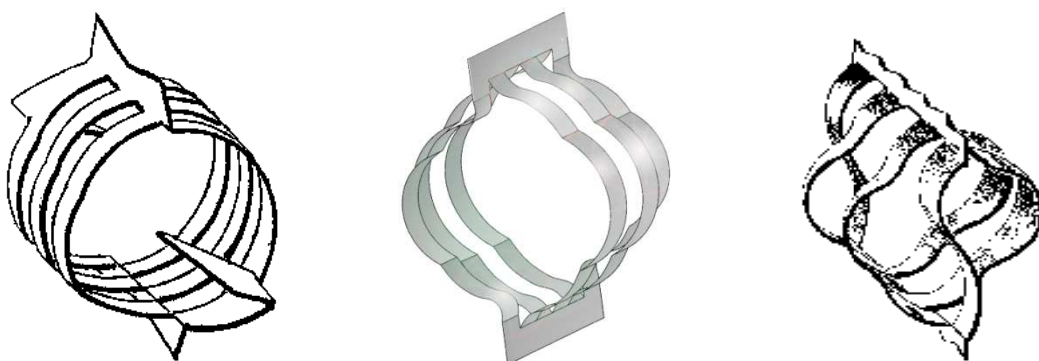


Рис. 3.29 Элементы насадок «Инжехим».

Характерной особенностью этих насадок является способность обеспечивать высокую разделяющую способность в широком диапазоне нагрузок как по газовой, так и по жидкой фазам. При этом насадки пригодны

для колонн, работающих как под разряжением, так и при атмосферном и избыточном давлениях. Кроме того, эти насадки способны работать с загрязненными средами.

3.5. Сравнительная оценка насадок разной конструкции

Прежде всего, необходимо отметить, что при осуществлении сравнительной оценки показателей насадок особая сложность состоит в том, что характеристики различных типов насадок получены зачастую в несопоставимых условиях: на различных системах, в колоннах различного диаметра, в условиях различных систематических погрешностей, а также, что очень важно, для насадок отличающегося размера.

Особо корректное сравнение может быть достигнуто при сравнении насадок одной принципиальной конструкции: сравнение меж собой кольцевых насадок, миникольцев, седловидных насадок. Поскольку, например, сравнивая кольцевые насадки и миникольцевые, мы сравниваем насадки, принципиально отличающиеся числом элементов в единице объема и удельной поверхностью. Последнее не может не отразиться на величине потери напора и эффективности.

Поэтому сопоставительная оценка носит в определенной степени условный характер.

Естественно, что сравнение должно производиться для насадок одного и того же размера при одинаковых нагрузках по газу и жидкости.

Наиболее целесообразным представляется сравнение характеристик насадок, находящих себе наибольшее промышленное использование. К таким насадкам, в первую очередь, относятся металлические нерегулярные насадки.

Металлические нерегулярные насадки находят себе применение для осуществления тепломассообменных процессов в различных областях промышленности и, в первую очередь, химической.

Особенно широко они используются в азотной промышленности, а также в промышленности основного органического синтеза.

По отношению к насадкам, изготовляемым из керамики или полимерных материалов, металлические имеют ряд преимуществ. В том числе бóльшую коррозионную и термическую стойкость и прочность и, следовательно, бóльший период эксплуатации. Другим важным преимуществом, из-за бóльшей тонкостенности металлических насадочных элементов, является их меньшее гидравлическое сопротивление (при равенстве размеров насадочных элементов) и, как следствие, более высокая пропускная способность. Поэтому металлические нерегулярные насадки нашли себе широкое применение, например, в установках большей единичной мощности в колоннах диаметром до 4,5 метра.

В соответствии с классификацией насадок, предложенной в [9], металлические нерегулярные насадки могут рассматриваться как: кольцевые, миникольцевые, седлообразные, конусообразные, спиральные, другой формы (все это насадки правильной формы), а также насадки неправильной формы (стружка). Наибольшее промышленное применение имеют насадки кольцевой, миникольцевой и седлообразные, а также некоторые насадки другой формы. Именно эти насадки и будут рассматриваться ниже.

Нерегулярные металлические насадки большей частью изготавливаются размером: 25, 38, 50 и 80 мм. При выборе типа или размера насадки следует исходить из конкретных условий процесса, основываясь на инженерном, а также экономическом расчете, учитывающем как стоимость насадки, так и стоимость колонны, продолжительность эксплуатации и т.д.

Наиболее широко используемый размер насадки – 50 мм, являющийся оптимальным, как с точки зрения потери напора, так и эффективности. Поэтому нами будут рассматриваться сравнительные характеристики различных насадок преимущественно этого размера.

Из геометрических характеристик будут сравниваться: доля свободного объема – ϵ , $\text{м}^3/\text{м}^3$ и удельная поверхность – a , $\text{м}^2/\text{м}^3$ или $1/\text{м}$, а также количество

насадочных элементов в единице объема – n , шт/м³. Из технических характеристик – гидравлическое сопротивление, отнесенное к единице объема слоя ΔP , мм. вод. ст./м, скорость начала подвисяния – $W_{п}$, м/с, являющееся верхним пределом допустимых нагрузок по газу и эффективность в виде высоты насадочного слоя эквивалентной одной теоретической тарелке - **ВЭТТ**, мм.

Конструкции рассматриваемых насадок приведены на рисунках данной главы. Сравнительные характеристики насадок представлены в табл. 3.5, где параметры ΔP , $W_{п}$ и эффективность даны, как относительные величины по сравнению с показателями колец Рашига, принятые как базисные для сравнения.

Таблица 3.5

Сравнительные характеристики металлических нерегулярных насадок

Наименование насадки	Доля свободного объема, ε , м ³ /м ³	Удельная поверхность a , м ² /м ³	Количество в ед. объема, шт./м ³	Потеря напора ΔP , мм. вод. ст./м	Пропускная способность, отн. %	Эффективность, отн. %
<i>Кольца, 50 мм</i>						
Рашига	0.95	110	5600-7000	100	100	100
Палля	0.96	100	5600-6400	63	120	125
Белецкого	0.95	112	6500	85	120	125
Хайпек	0.95	111	7000	65	120	150
Флексириг	0.96	102	5500-6500	42	126	-
Германия	0.97	106	6400	60	123	-
Хифлоу	0.98	96	5000	41	138	127

ГИАП	0.96	101	6500	47	133	137
<i>Миникольца, 38 мм</i>						
Каскадные	0.97	188	63700	32	139	144
Глитч	0.97	174	60740	-	-	-
<i>Седлообразные</i>						
Инталокс, 20 мм	0.95	108	12500	32	144	132
Нуттер, 20 мм	0.98	95	13700	41	127	-
Лева, 50 мм	0.98	118	-	47	-	158
<i>Другой формы</i>						
Топ-Пак Н=45мм	0.98	110	-	50	138	136
Интерпак 20 мм	0.95	-	213000	60	-	131
Инжехим 60 мм	0.96	103	31000	20	195	153
Флексимакс К4G-400	0.98	86	-	20	200	-

В табл. 3.5 представлены характеристики колец Палля, сохранившие удельную поверхность колец Рашига, но увеличившие турбулизацию потоков за счет отогнутых вовнутрь кольца язычков (рис. 3.30), а также ряда модификаций колец Палля, связанных с изменением конструкции отогнутых язычков: кольца Белецкого, Хайпек, Флексириг, Германия, Хифлоу и др. (рис. 3.6). Также приведены характеристики обладающего принципиально новой конструкцией кольца ГИАП, в котором при сохранении удельной поверхности кольца Рашига достигалась бóльшая открытость внутренней поверхности элементов для омывания ее встречными потоками газа и жидкости. Этому способствуют особенности ее конструкции, представляющей собой два

перфорированных полукольца, соединенных перегородкой и повернутых относительно друг друга на 90° (рис. 3.8).

Для сравнения представлены данные по миникольцам. Конструкции некоторых из них приведены на рис. 3.9. Эффект лучшей омываемости поверхности насадки здесь достигается благодаря более высокому проценту насадочных элементов, оси которых при загрузке ориентируются параллельно оси аппарата. За счет уменьшения высоты элементов достигается лучшее перемешивание и турбулизация потоков.

В табл. 3.4 представлены также данные по некоторым седлообразным насадкам: Инталокс, Нуттер, Лева и др. Это насадки, имеющие небольшую высоту, довольно близки к некоторым миникольцам, а потому, как и они, обладают определенным преимуществом в части организации движения потоков по отношению к кольцевым насадкам. Особо нужно отметить насадку Лева, которую в равной степени можно отнести как к миникольцевым, так и к седлообразным насадкам.

К другим, но близким к насадкам седлообразной формы относится насадка Интерпак (рис. 3.12), а также насадка Инжехим (рис. 3.11), отличающаяся тем, что ее изогнутые язычки имеют волнообразный характер, а поверхность имеет микрорельеф.

Из насадок другой формы можно также отметить насадку Топ-Пак, характеризующуюся оригинальностью конструкции (рис. 3.12), а также насадку Флексириг, имеющую ажурную конструкцию из узких полос, весьма открытую для движения потоков как газа, так и жидкости.

В табл. 3.5 использованы по характеристикам насадок, приведенные в [6,32,82,343], а также в [299,412], где они собраны из каталогов и реклам различных фирм.

Сравнение показателей насадок, представленных в табл. 3.5 и на рис. 3.30 показывает следующее:

Все кольцевые насадки, являющиеся разновидностью колец Палля, имеют близкие геометрические характеристики: $\varepsilon \sim 0,96-0,98 \text{ м}^3/\text{м}^3$; $a \sim 100-110 \text{ м}^2/\text{м}^3$; N

~6000-7000 шт/м³, а также довольно близкие гидродинамические характеристики по потере напора и скорости начала подвисяния. Это же можно сказать и об эффективности. Такие показатели следовало ожидать, поскольку в этих насадках сохраняется основной принцип конструкции, заложенный в кольцах Палля. И, как это видно, вариации в конструкции отогнутых лепестков большого эффекта не дают. Исключением, в какой-то мере, являются кольца Хайпек, которые, имея близкие с кольцами Палля гидродинамические показатели, имеют на 20% более высокую эффективность. Видимо, конструкция лепестков у колец Хайпек обеспечивает лучшее перемешивание потоков и их турбулизацию внутри насадочных элементов при незначительном превышении по сравнению с кольцами Палля гидравлического сопротивления. Более высокое значение ΔP в таких случаях является неизбежным.

Кольца ГИАП превышают все показатели колец Палля и его аналогов за исключением эффективности колец Хайпек (для колец ГИАП она ниже на 9,5%). Это объясняется, как уже говорилось, бóльшей открытостью элементов этой насадки для обеих протекающих фаз, что связано с принципиальным отличием в конструкции по сравнению с кольцами Палля.

Миникольцевые насадки, по сравнению с кольцевыми, при тех же значениях ε обладают значительно большей удельной поверхностью (в ~1,8 раза), что связано со значительно бóльшим числом насадочных элементов в единице объема (приблизительно на порядок). Наличие бóльшей удельной поверхности обеспечивает и бóльшую их эффективность, по сравнению с кольцевыми насадками при одновременно несколько лучших гидродинамических показателях.

Что касается седлообразных насадок, то, например, седла Инталокс имеют показатели близкие к лучшей из кольцевых насадок – кольцам ГИАП: чуть лучшие гидродинамические показатели и близкую эффективность. Особый интерес представляет насадка Лева, которая обладает близкими к кольцевым насадкам гидродинамическими показателями и в то же время высокую эффективность (несколько превосходящую, чем для колец Хайпек). Скорее

всего, это связано с более высокой, чем у кольцевых насадок, удельной поверхностью. Если считать, что эффективность прямо пропорциональна поверхности, то насадка ГИАП, обладая той же удельной поверхностью, что и насадка Лева, имела бы равную с ней эффективность. Однако ценность насадки Лева в том, что имея бóльшую удельную поверхность имеет то же гидравлическое сопротивление, что и кольца ГИАП. Таким образом, насадку Лева следует считать лучшей не только среди седлообразных насадок, но и всех рассмотренных выше.

Насадки другой формы Интерпак и Инжехим имеют близкие друг к другу и кольцевым насадкам показатели по доли свободного объема и удельной поверхности. Однако число насадочных элементов в единице объема для этих насадок намного (в ~4-5 раз для насадки Инжехим) превосходит их количество по отношению к кольцевым насадкам.

Как следует из табл. 3.5 весьма высокими, выделяющимися на фоне других насадок гидродинамическими показателями, и, одновременно, эффективностью обладает одна из недавно разработанных насадок – “Инжехим-2002”. (Характеристики этой насадки рассмотрены более подробно в следующих разделах).

Установленную высокую эффективность авторы [299] объясняют волновым движением жидкости по поверхности насадки. Увеличивает эффективность использования на поверхности элементов макрошероховатостей – сочетания выступов и впадин. Все это в сочетании с исключительной открытостью элементов обеспечивает эффективность более высокую, чем у всех других известных нерегулярных насадок при одновременно относительно небольшом гидравлическом сопротивлении.

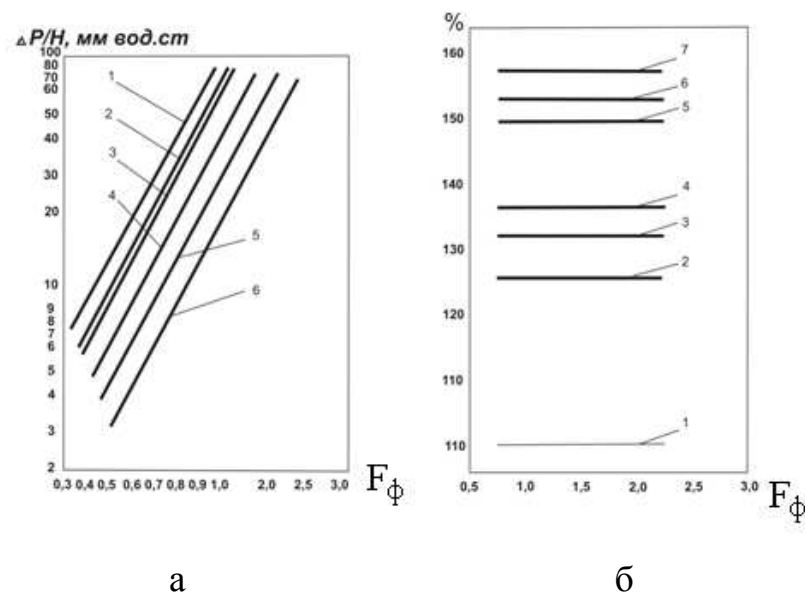


Рис. 3.30 Сравнительные характеристики нерегулярных металлических насадок, имеющих наилучшие показатели по сравнению с кольцами Рашига: а – потеря напора - $\Delta P/H = f(F)$ при $L=120 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$:

1 – кольца Рашига, 2 – кольца Хайпек, 3 – кольца Палля, 4 – кольца ГИАП и седла Лева, 5 – седла Инталокс, 6 – насадки Флексимакс и Инжехим; б – относительная эффективность, %: 1 – кольца Рашига, 2 – кольца Палля, 3 – седла Инталокс, 4 – кольца ГИАП, 5 – кольца Хайпек, 6 – насадки Инжехим, 7 – седла Лева.

Особо следует также выделить конструкцию насадки Флексимакс. Она является наиболее открытой для движения обеих контактирующих фаз, по сравнению с другими нерегулярными насадками. Это обеспечивает весьма низкое гидравлическое сопротивление и высокую пропускную способность. Представляется, что в этой насадке достигается максимально возможное (приближающееся к 100%) омывание жидкостью поверхности насадки и, как следствие этого, следует ожидать весьма высокой ее эффективности. К ее недостаткам следует отнести, возможно, более низкую прочность по сравнению с другими видами насадок и, в первую очередь, кольцевыми.

Подводя итог всему сказанному выше, можно констатировать, что из кольцевых насадок наилучшими показателями обладают кольца Хайпек и ГИАП, из седлообразных – насадка Лева, из насадок иной формы - насадки

Инжехим и Флексимакс. Причем, указанные насадки седлообразной и иной формы, в свою очередь, превосходят кольцевые насадки.

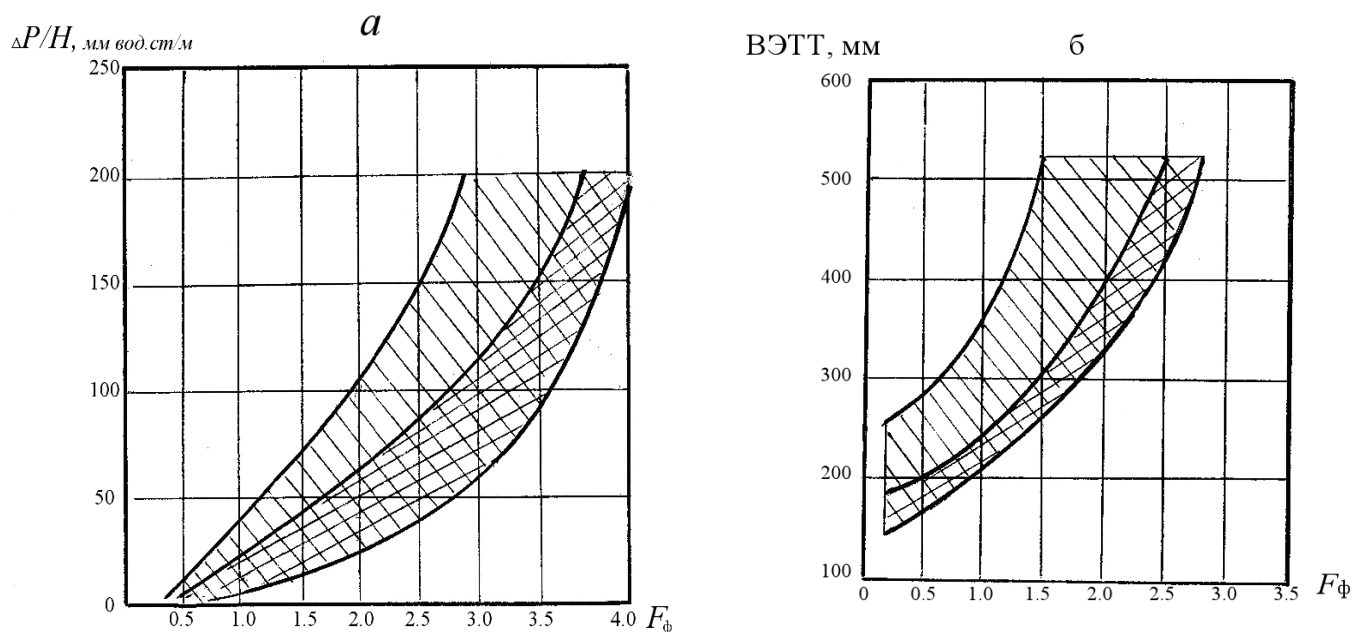


Рис. 3.31 Улучшение показателей по гидравлическому сопротивлению (а) и эффективности (б) насадочных устройств.

На рисунке 3.31 видно, насколько расширился диапазон возможного использования нерегулярных металлических насадок, показанный ранее в [20] за счет разработанных в последние десятилетия конструкций новых типов насадок: миникольцевых, седлообразных и некоторых насадок другой формы.

Из рассмотрения конструкций металлических насадок следует, что стремление улучшить их показатели достигается за счет снижения высоты элементов, что приводит к увеличению их числа в единице объема. Как следствие этого – неминуемое увеличение стоимости 1 м^3 насадки даже при самой совершенной технологии их изготовления. Поэтому миникольцевые, седлообразные и рассмотренные насадки другой формы, число которых в единице объема превышает в два или во много более раз этот показатель для кольцевых насадок, могут находить себе использование лишь в аппаратах ограниченных размеров. Таких, где потребное количество насадки составляет всего несколько кубометров. В колоннах большого масштаба, куда требуются

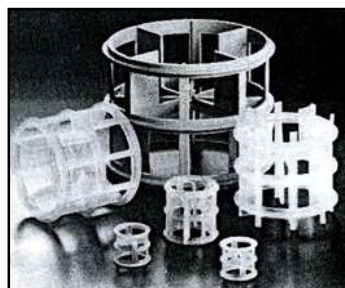
десятки кубометров, их использование представляется сомнительным. Например, в абсорбер и десорбер очистки конвертированного газа от диоксида углерода в производство аммиака по схеме Карсол требуется загрузить 666 м^3 насадки из колец Палля размером 50 мм. Если использовать для этой цели, например, каскадные миникольца, то их потребуется, если учесть, что они на 10% эффективнее колец Палля, $660 \cdot 09 \cdot 63700 \sim 38\,000\,000$ штук. Такая цифра, естественно, является нереальной. Поэтому следует считать, что для агрегатов большой единичной мощности нет альтернативы кольцевым металлическим насадкам размером 50 мм.

Второе место среди нерегулярных насадок, после насадок из металла, занимают насадки из полимерного материала.

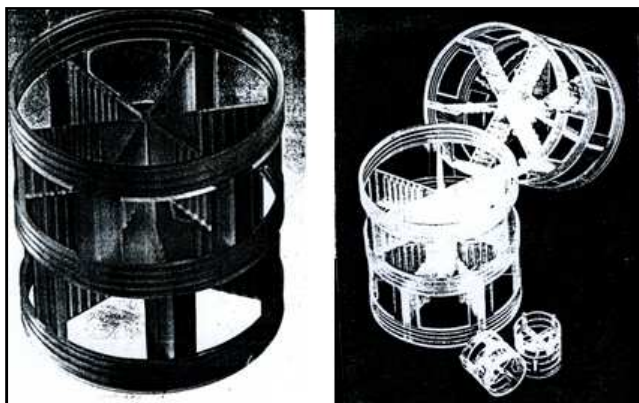
Это преимущественно кольцевые насадки (рис. 3.32) и насадки, имеющие форму седел (рис. 3.10). Для практики существенен вопрос выбора насадки оптимальной конструкции из ряда насадок, изготовленных из одинакового полимерного материала и имеющих близкую стоимость изготовления.



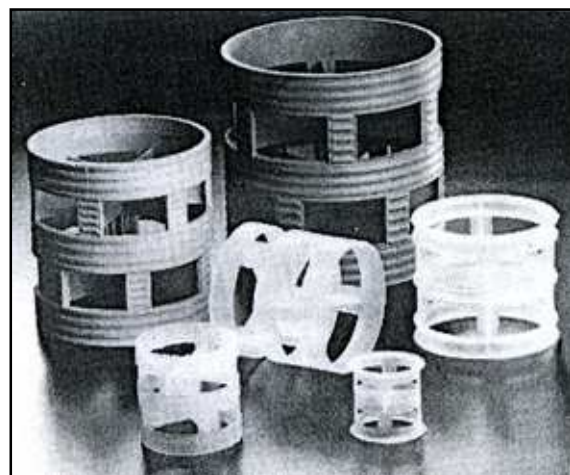
1



2



3



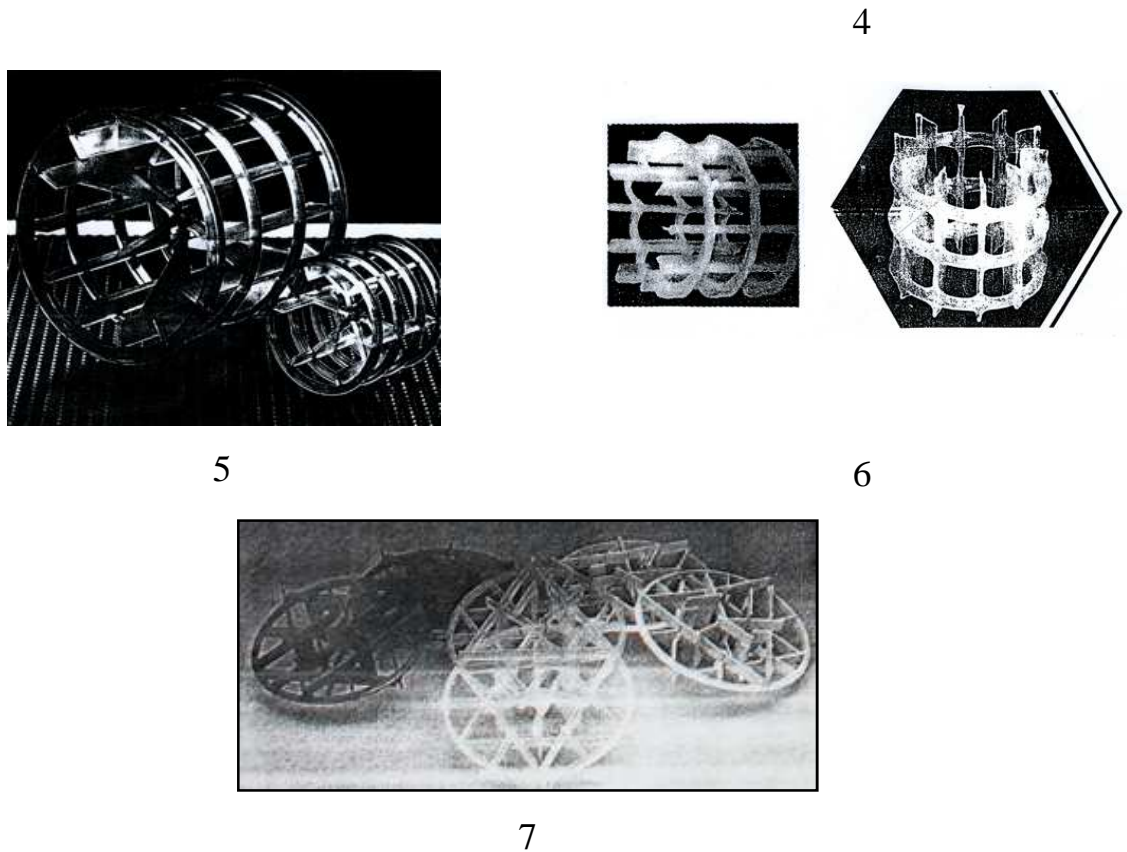


Рис. 3.32 Полимерные насадки кольцевой формы: 1- Палль; 2 - Хифлоу; 3 – Флексиринг; 4 - Рефлюкс; 5 – Ралу; 6 – Норпак; 7 – Сноуфлейк.

Как это видно, весьма схожи конструкции колец Палля, Рефлюкс и Флексигрид. От них разнятся, но близки друг другу кольца Норпак и Хифлоу. Несколько особняком в этом ряду стоит пластиковая насадка Сноуфлейк фирмы Norton с развитой кольцевой решетчатой объемной структурой, выпускаемая габаритным размером 94×30,5 мм.

Немногим различаются седла Суперторус и Суперинталокс. Сходство меж собой конструкций, указанных насадок приводит, в первую очередь, к близости их геометрических характеристик (см. табл. 3.6). В ней представлены характеристики ряда насадок одинакового размера, находящих себе наибольшее использование.

Таблица 3.6**Характеристики полимерных нерегулярных насадок
размером 50 мм [48,60,82,342-345,350,381]**

Наименование насадки	Удельная поверхность $\text{м}^2/\text{м}^3$	Свободный объем $\text{м}^3/\text{м}^3$	Количество элементов в 1 м^3 , шт	Вес 1 м^3 , кг
Насадки кольцевой формы				
Хифлоу	83	0,94	6050	51
Норпак	88,5	0,95	7330	75
Ралу	92,5	0,93	5770	-
Палля	110	0,92	6700	69
Рефлюкс	110	0,93	-	69
Сноуфлэйк размером 94×30,5 мм	91,8	0,95	4925	48,1
Насадки в форме седел				
Хифлоу	86,4	0,94	7300	58
Суперторус	121	-	-	-
Инталокс	126	0,91	8960	75

Из таблицы 3.6 следует, что для полимерных насадок значения свободного объема довольно близки. В то же время значения удельной поверхности различаются в большей степени. Практически совпадают все показатели для колец Палля и Рефлюкс. Можно ожидать, что и другие показатели для них отличаются незначительно.

На рис. 3.33 представлены результаты исследования гидродинамических и массообменных характеристик трех различных кольцевых насадок. Из него следует, что наибольшей эффективностью обладают кольца Палля. Далее по нисходящей кольца Хифлоу и Норпак. По гидравлическому сопротивлению они располагаются в обратном порядке. Наилучший показатель потери напора – ΔP на одну теоретическую ступень равновесия – $\Delta P/N_T$ имеют кольца Норпак. Однако однозначного вывода о их преимуществе сделать невозможно, т.к. при

меньшей ΔP на единицу высоты слоя сама высота слоя насадки для колец Норпак должна быть больше.

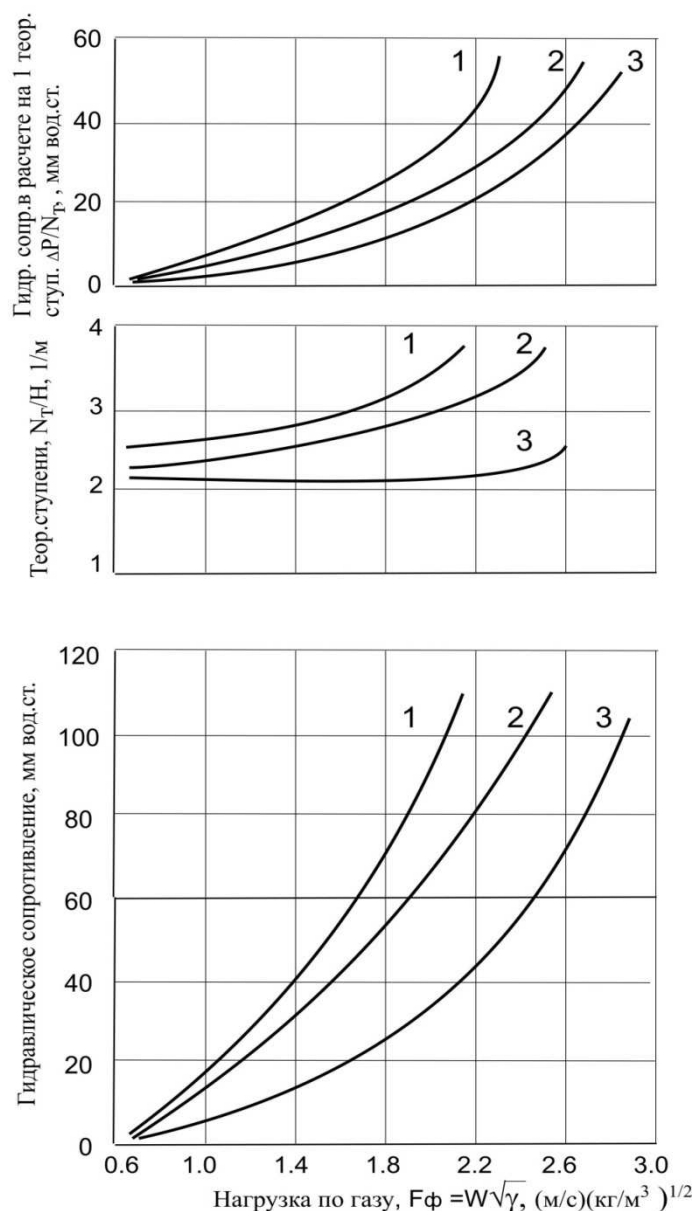


Рис. 3.33 Характеристики насадок кольцевой формы из полимерного материала размером 25 мм при плотности орошения – $q_{\text{ор}} \sim 10 \text{ м}^3/\text{м}^2 \text{ час}$ [82]: 1 – кольца Палля; 2 – кольца Хифлоу; 3 – кольца Норпак.

Хотя соотношение ΔP и эффективности для каждой насадки изменяются в зависимости от нагрузки по газу, насадочный слой из колец Палля всегда будет иметь меньшую высоту.

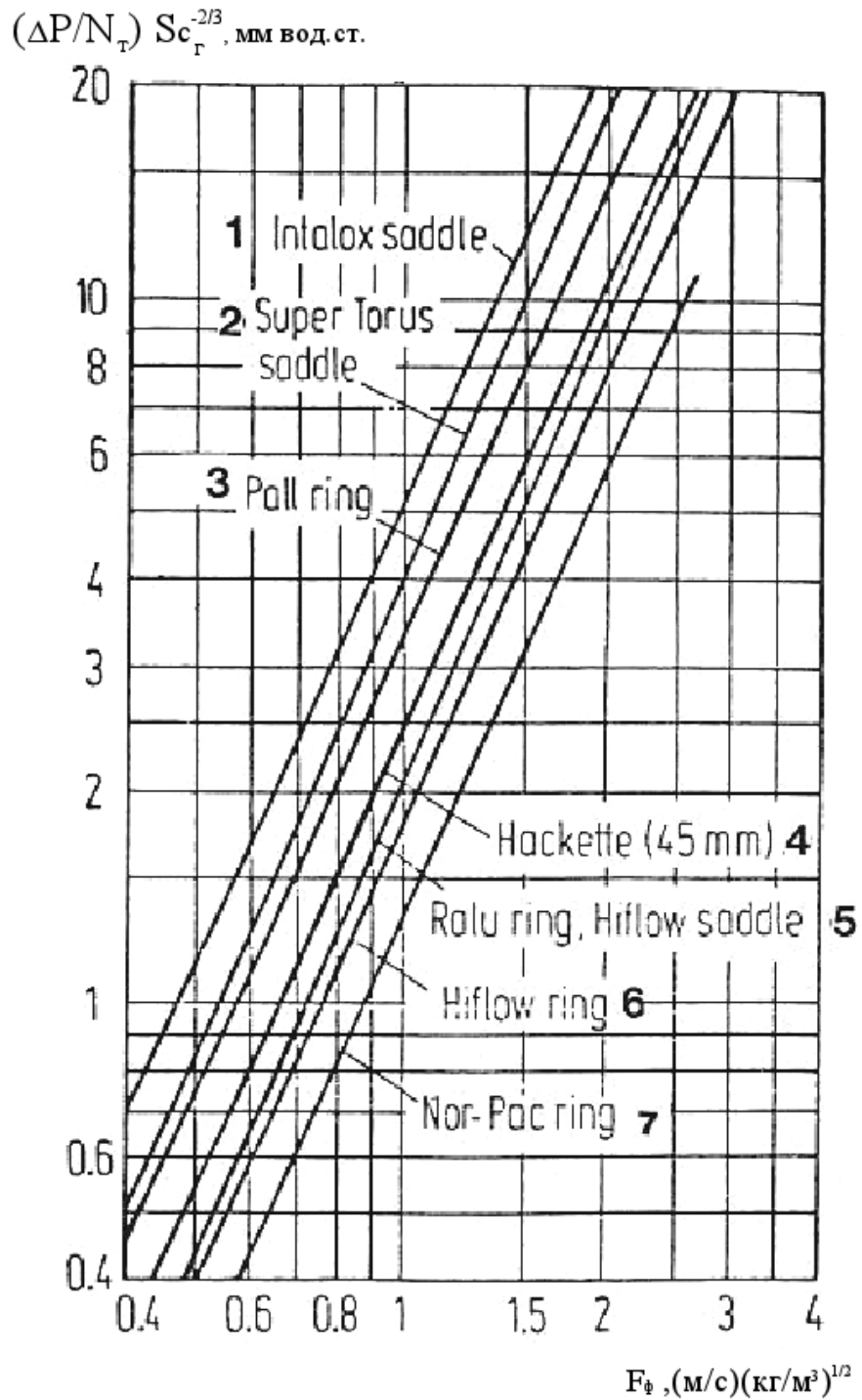


Рис. 3.34 Значения удельной модифицированной потери напора для системы аммиак-вода для различных типов полимерных насадок размером 50 мм при плотности орошения $10 \div 15 \text{ м}^3/\text{м}^2 \text{ час}$ [82]: $(Sc_r = \frac{v_r}{D_r}$ - критерий Шмидта, v_r и D_r – коэффициенты кинематической вязкости газа и диффузии).

На рис. 3.34 приведены данные по потере напора орошаемых насадок, а в табл. 3.7 их сравнительные гидродинамические и массообменные характеристики.

Таблица 3.7

Сравнительные гидродинамические и массообменные характеристики насадок из полимерного материала размером 50 мм при плотности орошения $10 \text{ м}^3/\text{м}^2$ час, $F_\phi=2$

Наименование насадки	ΔP , %	Эффективность, %	Удельная поверхность, $\text{м}^2/\text{м}^3$
Кольцо Норпак	40	61	88,5
Кольцо Хифлоу	53	85	83
Седло Хифлоу	74	90 ^{x)}	86,4
Кольцо Ралу	75	91 ^{x)}	95,2
Кольцо Палля	100	100	110
Седло Суперторус	127	104 ^{xx)}	121
Седло Инталокс	150	109 ^{xx)}	126

^{x)} – Данные получены на основании кривой 2 на рис. 3.35

^{xx)} - Данные получены на основании экстраполяции кривой 2 на рис. 3.35.

Из представленных на рис. 3.35 сравнительных массообменных и гидродинамических характеристик прослеживается логичная закономерность: более высокие значения ΔP имеют насадки с большей удельной поверхностью. Поскольку значения нагрузок по газу $F_\phi = 2$ и по жидкости $q_{op} = 10-15 \text{ м}^3/\text{м}^2$ час соответствуют режиму течения в насадочном слое, близкое к ламинарному, при котором гидравлическое сопротивление обусловлено, в основном, не конвективной составляющей, а составляющей обусловленной трением, кривые 1 и 3 симбатны.

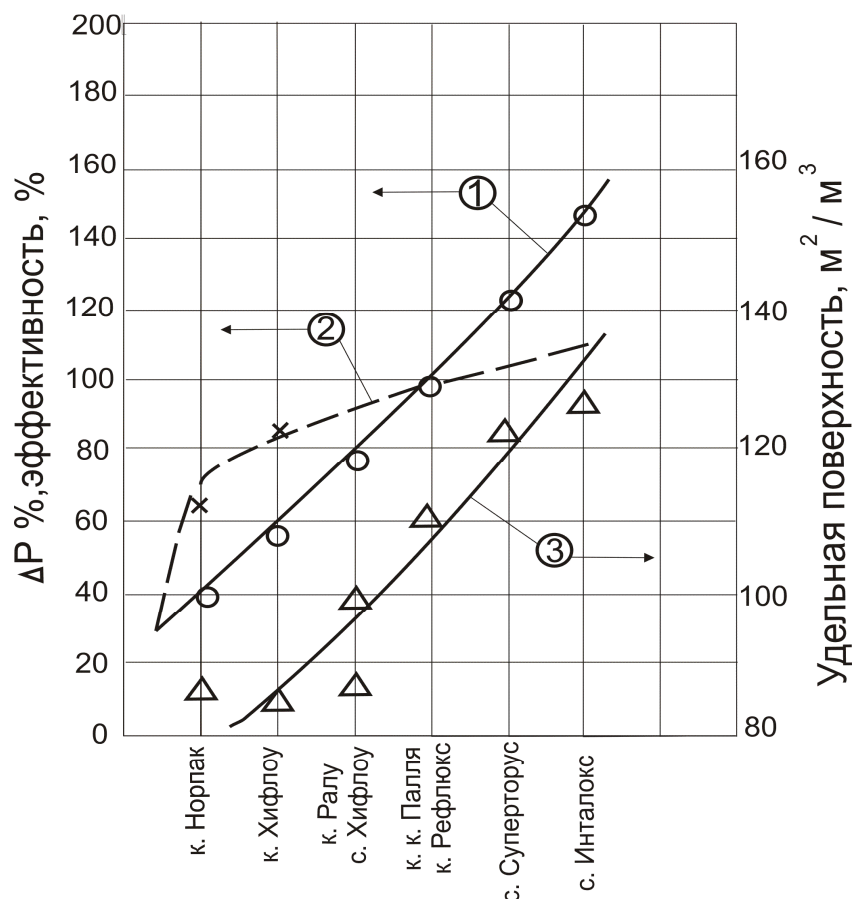


Рис. 3.35 Сравнительные гидродинамические и массообменные характеристики насадок из полимерного материала размером 50 мм при $q_{ор} = 10-15 \text{ м}^3/\text{м}^2 \text{ час}$ и $F_{ф} = 2$ [13, 17, 21, 53-56, 58, 59]

1 - O - потеря напора; 2 - X - эффективность; 3 - Δ - удельная поверхность.

Что касается эффективности, то она, естественно, также как и ΔP , растет с увеличением удельной поверхности насадок. Наиболее интенсивный рост эффективности при одной и той же плотности орошения наблюдается в диапазоне значений удельной поверхности от 0 до $\sim 115 \text{ м}^2/\text{м}^3$ (левая часть кривой 2). При дальнейшем увеличении поверхности прирост эффективности постепенно снижается. Это, видимо, может быть объяснено нехваткой жидкости для формирования ее устойчивой пленки на всей поверхности насадки. Или, иными словами, снижением доли омываемой поверхности. Кривая 2, как уже говорилось, построена на основании опытных данных, полученных при плотности орошения $\sim 10 \text{ м}^3/\text{м}^2 \text{ час}$. Надо полагать, что при больших значениях $L_{ор}$ и $F_{ф}$ характер кривых 1 и 2 на рис. 3.22 несколько изменится, т.к. все большее влияние на эти показатели будет оказывать форма

элементов насадки(будет по-разному изменяться доля активной поверхности и степень турбулизации потоков).

Кривая 2 рис. 3.35 дает возможность ориентировочно оценить отсутствующие значения относительной эффективности колец Ралу и Рефлюкс, а также седел Суперторус и Инталокс (см. табл. 3.7).

Базируясь на имеющихся данных, наиболее предпочтительными среди полимерных насадок следует считать кольца Палля, которые занимают по своим характеристикам средние позиции, сочетая достаточно высокую эффективность с умеренным гидравлическим сопротивлением. Однако окончательный выбор конструкции насадки следует осуществлять только после расчета экономической эффективности с учетом всех условий конкретного процесса [291,295,299].

Допустимые рабочие температуры полимерных материалов насадок приведены в таблице 3.8.

Таблица 3.8

Максимальная рабочая температура среды, при которой гарантируется химическая стойкость полимерных материалов насадки по данным фирмы KOCH-GLI TSCH (публикация KGPP-12 MO50EF, 2003)

№ п/п	Материал	T _{макс.} , °C
1	Полипропилен общего назначения	104
2	Полипропилен с наполнителем из стекловолокна	127
3	Полиэтилен высокой плотности	100
4	Полиэтилен низкой плотности	88
5	Поливинилхлорид	66
6	Полиформальдегид	250

Сравнительные характеристики нерегулярных насадок из полимерного материала см. в [125 и 343].

Характеристики некоторых других новых конструкций насадок из полимерных материалов приведены в [394,395,409].

Из регулярных насадок следует выделить плоско-параллельную насадку из пластика с косыми гофрами, расположенными под разным углом наклона в соседних рядах, имеющую перфорацию и искусственную шероховатость из комбинации выступов и впадин на поверхности листов.

Из рулонных насадок одной из лучших является сетчатая гофрированная, перфорированная насадка.

Регулярные насадки имеют меньшее гидравлическое сопротивление, по сравнению с нерегулярными, в особенности по сравнению с керамическими (см. рис. 3.36). Различие в величине ΔP нарастает с увеличением скорости газа и в диапазоне наиболее часто используемых скоростей газа $W = 2 \div 2,5$ м/с становится весьма значительным.

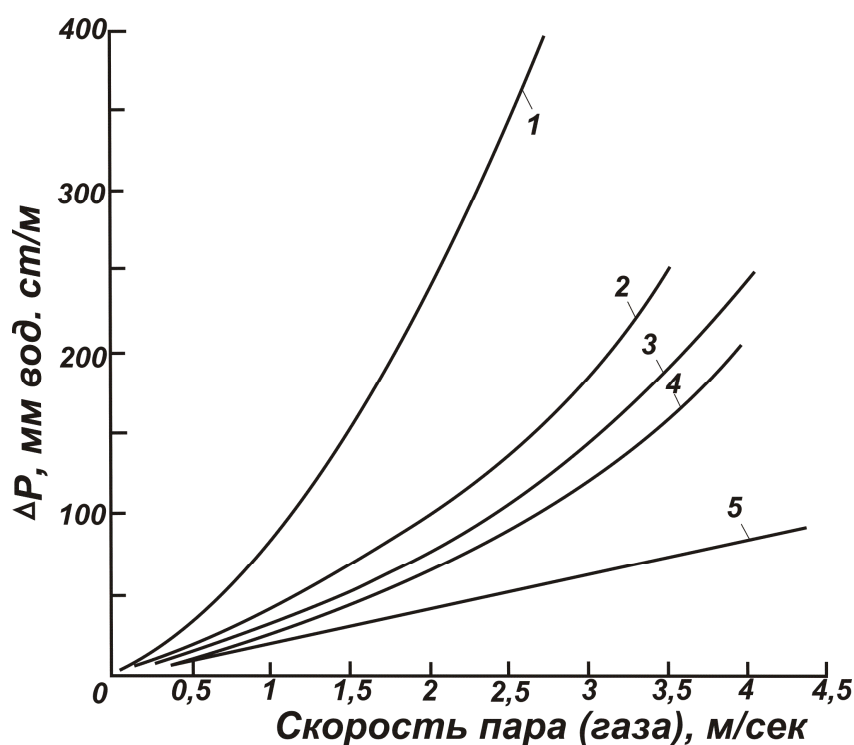


Рис. 3.36 Гидравлическое сопротивление различных типов насадок [20]:
1 – керамические насадки; 2 – металлические насадки насыпные; 3 – сетчатые насадки насыпные; 4 – сетчатые насадки рулонные; 5 – пакетные насадки.

Достаточно корректное сравнение эффективности конкретных видов нерегулярных и регулярных насадок затруднительно, т.к. нет однозначного критерия, по которому можно вести сравнение (например, размера как для кольцевых насадок).

Эксперименты проводились различными исследователями в трудносопоставимых условиях: на различных системах, при отличных нагрузках по жидкости и газу. Оценка эффективности производилась с использованием различных ее показателей. Сравнения эффективности в определенной степени достоверное, на наш взгляд, возможно используя данные, предложенные в [20] см. рис. 3.37, на котором представлены области эффективности различных типов насадок.

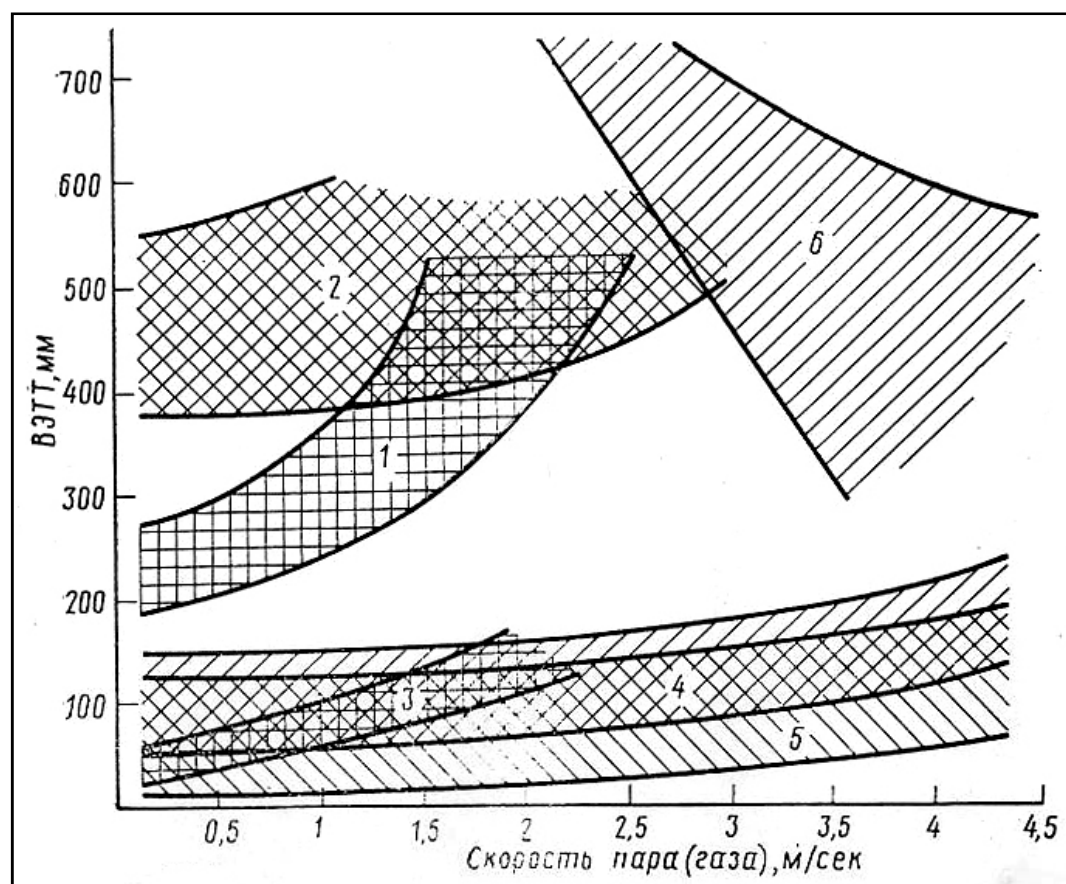


Рис. 3.37 Области эффективности различных типов насадок [20]:
 1 – керамические насадки насыпные; 2 – металлические насадки насыпные;
 3 – сетчатые насадки насыпные; 4 – сетчатые насадки рулонные;
 5 – сетчатые насадки пакетные; 6 – насадки из просечно-вытяжной стали пакетные.

Как это видно, регулярные насадки, как это и следовало ожидать, значительно превосходят по эффективности нерегулярные. Особенно это различие, как и в случае потери напора, увеличивается с ростом скорости газа. Наибольшей эффективностью обладают сетчатые пакетные насадки. В то же время пакетные насадки из просечно-вытяжного листа, обладая высокой пропускной способностью, имеют низкую эффективность, сравнимую с эффективностью нерегулярных керамических насадок.

Сравнительная оценка контактных устройств для осуществления процессов массообмена, если не привязывать ее к конкретному процессу, часто может привести к небесспорным выводам, из-за множества факторов, которые влияют на процесс и степень воздействия которых различна.

Выбор определенного контактного устройства может быть осуществлен достаточно правильно лишь при наличии необходимых исходных данных: известных потоках газа (пара) и жидкости, их физико-химических свойствах, концентрациях извлекаемого компонента, параметрах процесса, допустимой потери напора, ограничениях в габаритах аппарата и т.д.

Между тем, некая абстрактная сравнительная оценка возможна и, как нам кажется, должна в первую очередь базироваться на различии в гидродинамической обстановке, которая складывается в колоннах с тарелками и насадкой.

Гидродинамическая обстановка в насадочных аппаратах, которая подробно рассмотрена в главе 4, характеризуется неупорядоченным движением потоков в поперечном сечении аппарата по его высоте, а также во времени, оттеснением жидкости к периферии по мере ее нисходящего движения, увеличивающейся с ростом диаметра аппарата неравномерностью распределения потоков и продольным перемешиванием. Все это приводит к нарастающему с увеличением D снижению эффективности по сравнению с эффективностью, установленной для данной насадки в опытной колонне.

Движение потоков в тарельчатой колонне организовано более строго, как в пределах каждой тарелки, так и по всей высоте колонны, причем оно в

точности воспроизводится на каждой тарелке. Отсутствуют каналообразование и байпасирование. В силу этого эффективность разделения, в расчете на единицу высоты рабочей зоны аппарата, для тарельчатых аппаратов выше. Одновременно по этой же причине, а также из-за отсутствия продольного перемешивания, ниже влияние масштабного фактора на эффективность. Этим особенно отличаются секционированные тарелки.

Схема одной из тарелок такой конструкции – «безградиентной тарелки» [412] (в качестве примера) представлена на рис. 3.38.

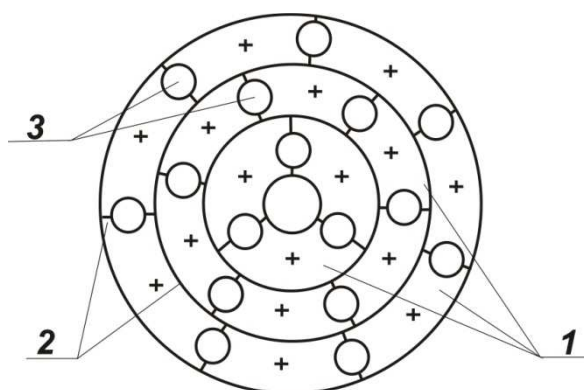


Рис. 3.38 Секционированная ситчатая тарелка $\text{Ø}2600$ мм [412], использованная в производстве метанола на АО «Ахема» г.Ионава (Литва). Расположение подвесных переливов с вышележащей тарелки обозначено +.

1 – секции $S=0,33 \text{ м}^2$; 2 – секционирующие перегородки;
3 – переливы на нижележащую тарелку.

Тарелка представляет собой ситчатое полотно, секционированное перфорированными перегородками. Каждая секция выполнена в виде части кольца, образованной отрезками кольцевых перегородок и ребрами переливных устройств. Переливы с подвесными гидрозатворами расположены на границе смежных секций и смещены от тарелки к тарелке на угол, не превышающий 90° , а их число соответствует числу секций. При хорошем начальном распределении потоков использование тарелки этой конструкции обеспечивает коэффициент масштабного перехода близкий к 1,0; т.е. практически при любом увеличении диаметра колонны высокая эффективность этой тарелки сохранится [417].

Хотя в конструкциях насадочных аппаратов предусматриваются некоторые технологические элементы, улучшающие гидродинамическую обстановку и, в определенной мере, снижающие отрицательное влияние масштабного фактора, все же насадочные колонны пока еще продолжают уступать тарельчатым по эффективности.

Однако в других моментах можно говорить о преимуществе насадочных колонн. Остановимся на главных.

1. Насадочные колонны имеют более низкое гидравлическое сопротивление в расчете на высоту единицы переноса. Это связано с тем, что каждая тарелка работает в затопленном режиме, и газу, проходящему через колонну, приходится преодолевать сопротивление, равное совокупной высоте столбов жидкости на всех тарелках. Особенно велико различие в ΔP для тарельчатых и насадочных колонн с регулярной насадкой. Низкое ΔP регулярных насадок обеспечивает условия для осуществления ректификации под вакуумом. Тарельчатые колонны, таким образом, не могут быть использованы для разделения термолабильных веществ.

Более низкие значения ΔP при прочих равных условиях обеспечивают более низкие расходные коэффициенты по электроэнергии.

2. Следующим важным, а может быть и более важным, чем первое, преимуществом являются более высокие нагрузки, которые допустимы в насадочных аппаратах. Лимитирование скорости по газу в тарельчатых колоннах, которое, как правило, не превышает 1,2 м/с (для атмосферных колонн) определяется в первую очередь межтарельчатым уносом жидкости, который при бóльших скоростях достигает таких величин, что значительно снижает эффективность разделения [129].

Лимитирование нагрузок по жидкости в тарельчатых колоннах определяется пропускной способностью переливов, скорость жидкости в которых не должна превышать значений, при которых начинается захват газа. В то же время увеличение площади переливов ведет к снижению рабочей площади тарелок, т.е. пропускной способности по газу.

В насадочных аппаратах рабочие скорости могут достигать существенно больших значений – до $2,0 \div 2,5$ м/с, а плотность орошения до $150 \text{ м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{час}$ и более. Это обеспечивает, как минимум, 2-х кратное уменьшение диаметров насадочных аппаратов по сравнению с тарельчатыми. Даже при возможно несколько бóльшей высоте насадочных колонн по сравнению с тарельчатыми, столь значительное снижение их диаметра приводит к существенному сокращению металлоемкости и капиталовложений.

3. Тарельчатые колонны более сложны конструктивно и более дороги в изготовлении по сравнению с насадочными.

К другим недостаткам тарельчатых колонн, которые заслуживают упоминания, относятся: высокая чувствительность тарелок к перекосам (в особенности ситчатых тарелок), что обеспечивает жесткие требования к их горизонтальности при монтаже (трудности обеспечения строгой горизонтальности возрастают с увеличением диаметра аппарата); также бóльшая, по сравнению с насадками, чувствительность к загрязнениям (в первую очередь это касается ситчатых тарелок, поскольку диаметры отверстий в ситчатом полотне, как правило, равны $2 \div 8$ мм, а в некоторых случаях составляют всего $0,8$ мм).

Хотя при использовании насадок также может быть обеспечена высокая эффективность разделения за счет снижения размера насадки (правда при соответствующем росте ΔP и снижении пропускной способности), тем не менее в случаях, когда требуется выделение особо чистых компонентов, используется процесс ректификации, который осуществляется в тарельчатых колоннах.

Если требования к степени разделения не столь велики, то предпочтительнее использовать абсорбционное разделение в насадочных аппаратах, особенно если речь идет об аппаратах, входящих в состав агрегатов большой единичной мощности. Учитывая огромные потоки газа и жидкости (например, в агрегатах синтеза аммиака большой единичной мощности производительностью 1360 тонн в сутки с очисткой «Карсол» они составляют в абсорбере – $100000 \text{ м}^3/\text{час}$ конвертированного газа и 900 тонн/час раствора в

нижней его части) по причинам указанным выше в качестве массообменных аппаратов используются исключительно насадочные колонны.

Интересна тенденция в объемах использования массообменных аппаратов. Если до середины 50-х годов шло расширение масштаба использования тарельчатых аппаратов, то в несколько последних десятилетий, особенно после начала промышленного производства колец Палля и других эффективных насадок, крен изменился в пользу насадочных аппаратов. Эта тенденция имеет продолжение и в настоящее время, даже в тех отраслях (как, например, в нефтехимии), где раньше традиционно возобладала тарельчатые колонны.

Ликвидировать главный недостаток тарельчатых колонн – повысить сколько-нибудь значительно их пропускную способность в расчете на единицу площади поперечного сечения, в принципе невозможно. В то же время поднять эффективность насадочных колонн, уменьшив отрицательное влияние масштабного фактора, - задача, которая может найти свое решение. Эти соображения свидетельствуют о перспективности промышленного использования насадочных массообменных аппаратов.

ГЛАВА 4

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ДВИЖЕНИИ ПОТОКОВ И ПРОЦЕССАХ ПЕРЕНОСА В АППАРАТАХ С НАСАДОЧНЫМИ КОНТАКТНЫМИ УСТРОЙСТВАМИ

4.1. Структура насадочного слоя

Особенности структуры насадочного слоя из нерегулярной насадки при ее хаотической загрузке в аппарат во многом определяет гидродинамику и эффективность осуществляемых в насадочном аппарате процессов. Неоднородности газораспределения в аппаратах с насадкой, по мнению ряда авторов [12,40,41,52,58,61], связаны со структурой насадочного слоя и распределением в нем доли пустот. Именно поэтому характер распределения ε в таких аппаратах является предметом многих исследований [12,22,52,58,62,65,66,69,91].

Насадочный слой представляет собой сложную структуру, представляющую собой систему параллельных искривленных сообщающихся каналов переменного сечения.

От формы и размера насадочных элементов зависит доля свободного объема в насадочном слое. Зависимость доли свободного объема ε от различных факторов рассмотрены в разделе 2.1. Эта усредненная ε , однако,

не распространяется на весь объем слоя. Прежде всего, она всегда выше среднего значения на участках ввода газа в слой (участки гидродинамической стабилизации), о чем пойдет речь в разделе 4.2.5. Также она имеет более высокие значения вблизи стенок аппарата, обусловленные более рыхлой укладкой там насадочных тел.

Рассмотрим распределение локальной доли свободного объема по радиусу аппарата с насадкой. Под локальной ε будем понимать величину доли свободного объема в кольцевом объеме, ширина которого соизмерима с размером элемента насадки – d , а высота $h = n d$, где $n = 20$ (что соответствует установившейся стационарной структуре укладки насадочных тел в слое) [3].

Радиальные профили ε в цилиндрических аппаратах с насадкой шаровой и другой формы представлены на рис. 4.1÷4.11.

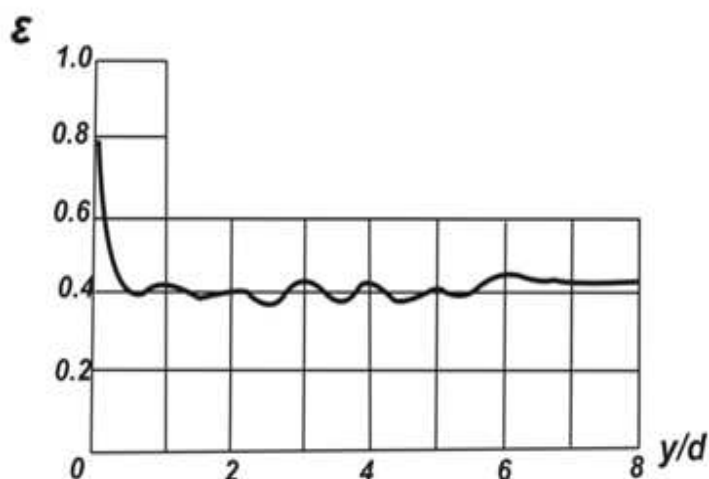


Рис. 4.1 Распределение локальной порозности по радиусу аппарата с шарами по данным [22]: $D = 198$ мм, $d = 9.52$ мм, $D/d = 20.8$.

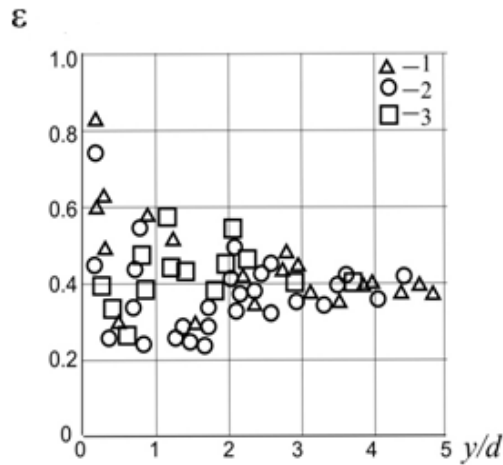


Рис. 4.2 Распределение локальной порозности ε по радиусу аппарата с шарами по данным [22]: 1 – $D/d = 20.3$; 2 – $D/d = 14.1$; 3 – $D/d = 5.6$.

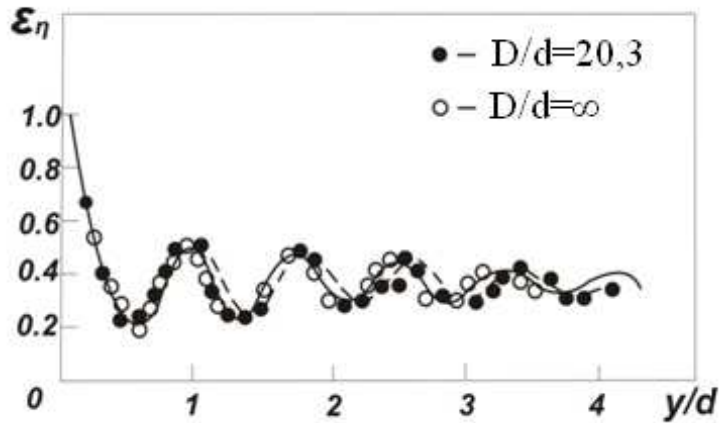


Рис. 4.3 Распределение $\varepsilon_{\text{лок}}$ по радиусу аппарата с шарами по данным [18]

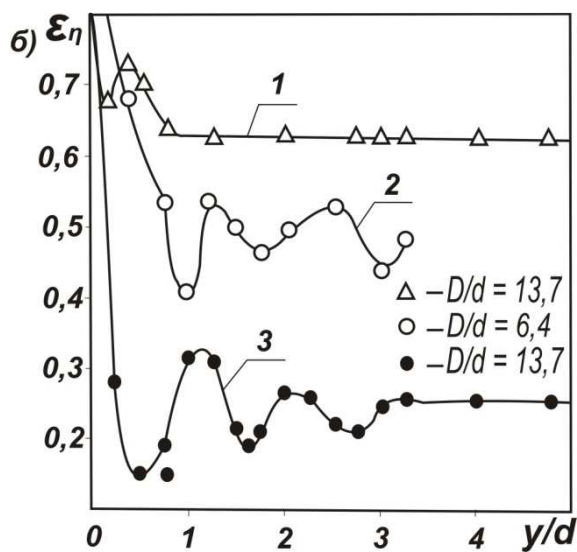


Рис. 4.4 Распределение $\varepsilon_{\text{лок}}$ по радиусу для колец Рашига по данным [18] кривая 1 и [13] (кривая 2): для цилиндриков по данным [18] (кривая 3).

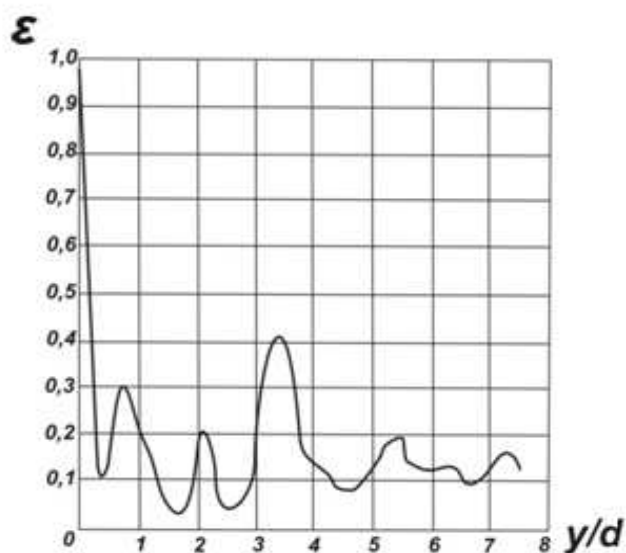


Рис. 4.5 Результаты опытов по изучению структуры аппарата с металлическими шарами [22].

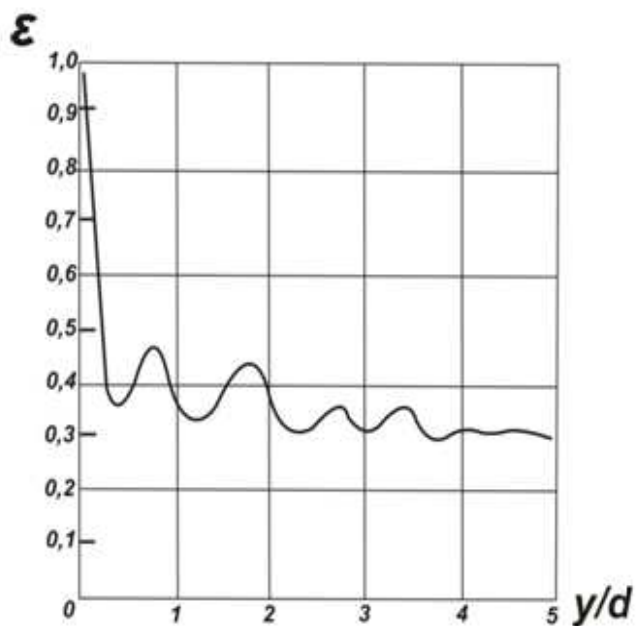


Рис. 4.6 Результаты опытов по изучению структуры аппарата с металлическими шарами [22]:

$D = 94$ мм, $d = 9.5$ мм, высота слоя $H/d = 3$.

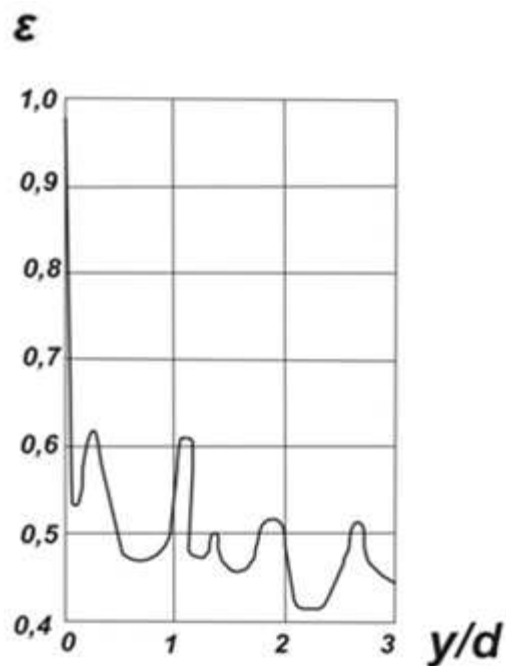


Рис. 4.7 Результаты опытов по изучению структуры аппарата с металлическими шарами [12]:

$D = 94$ мм, $d = 14.5$ мм, высота слоя $H/d = 2$.

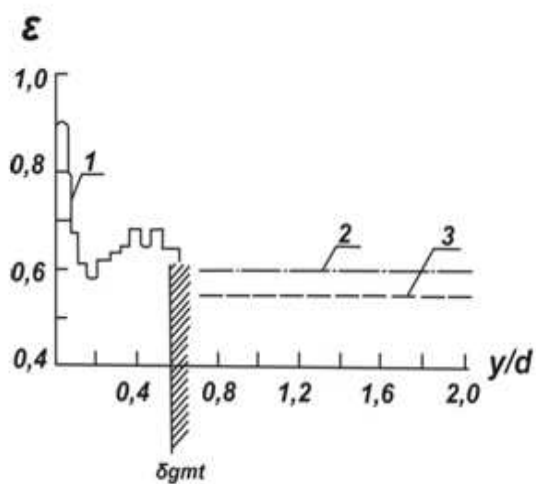
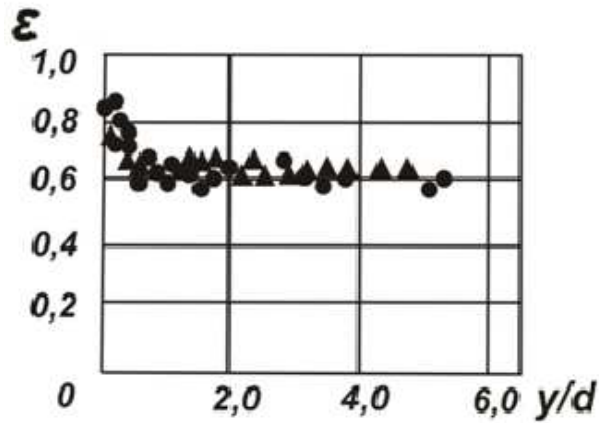
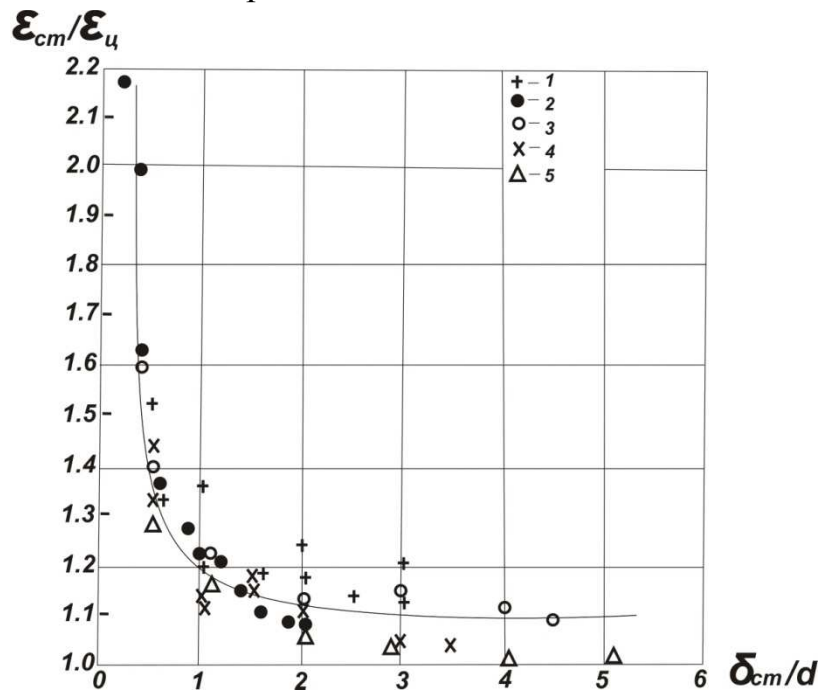


Рис. 4.8 Распределение порозности по поперечному сечению аппарата с насадкой в виде медных колец Рашина по данным [8]. Диаметр аппарата $D=40$ мм, размер колец $5 \times 5 \times 1$ мм ($D/d=8$): 1 – кривая локальной порозности вблизи стенки аппарата; 2 – $\varepsilon=0,6$ - средняя порозность по аппарату; 3 – ε_a – порозность в центральной части аппарата; δ_{gmt} – ширина геометрической пристенной области.



4.9 Зависимость распределения порозности по поперечному сечению аппарата с керамической насадкой в виде колец Рашига и седел Берля: ● – седла Берля; ▲ – кольца Рашига.



4.10 Зависимость $\varepsilon_{ст}/\varepsilon_{ц} = f(\delta_{ст}/d)$ для слоя шаров: 1 – результат опытов авторов (рентген) $H=2d$, $D=94$ мм, $d=9.5$ мм, $D/d=10$, $d=14.5$ мм, $D/d=6.5$; 2-5 – результаты нашей обработки опытных данных: работы [8] – $D=37.8$ мм, $d=3.9$ мм, $D/d=9.7$; работы [18] – $D=5.6$ мм; работы [13] – $D=170$ мм; $d=12.5$ мм, $D/d=13.6$; $d=19.3$ мм, $D/d=8.8$; работы [9] – $D=198$ мм; $d=9.52$ мм, $D/d=20.8$.

Практически для всех случаев зависимость $\varepsilon = f(y/d)$ для слоев насадки различной формы имеет форму затухающей вблизи центра аппарата синусоиды. Здесь y – расстояние от стенки аппарата. Эта закономерность характерна для всех известных литературных данных [8,10, 11-13,52,58,62,65]. При этом вблизи стенок аппарата во всех случаях наблюдается стремительный всплеск локальной доли свободного объема.

Опытные данные, представленные на рис. 4.1÷4.10 позволяют сделать некоторые выводы о закономерностях распределения ε в насадочном слое.

1. Вблизи стенки аппарата ε достигает своего максимума, приближаясь к значениям $\varepsilon=1$.

2. Первый минимум ε на амплитуде зависимости $\varepsilon_{лок} = f(y/d)$ наблюдается в интервале $y = (0,5-1) d$ (рис. 4.3÷4.8).

3. Затухающая амплитуда зависимости $\varepsilon_{лок} = f(y/d)$ заканчивается в пределах $y = (4-5) d$ (рис. 4.2÷4.4, 4.7).

4. С увеличением отношения D/d амплитуда зависимости $\varepsilon_{лок} = f(y/d)$ затухает быстрее [8, 24].

5. На распределение $\varepsilon_{лок}$ по радиусу аппарата, отношение D/d практически не оказывает влияния (см. рис. 4.2 и 4.3).

6. Насадочные тела разной формы имеют разную плотность укладки по радиусу аппарата (рис. 4.4). Так, тела цилиндрической формы укладываются более плотно по сравнению с кольцами Рашига и шарами. В то же время керамические кольца Рашига и седла Берля имеют практически одинаковую плотность укладки (рис. 4.9).

7. Пристенная зона с наиболее рыхлой укладкой для колец Рашига составляет $0,5d$ (рис. 4.8).

8. В центральной части аппарата по данным [13] кольца укладываются более плотно, чем тела иной формы.

Кроме того, было установлено: ε меняется не только по радиусу, но и по высоте насадочного слоя [66,72], поскольку оно зависит от давления

вышележащих слоев [93,94]; на ε оказывает влияние способ загрузки [66,91]; на распределение ε по радиусу аппарата некоторое влияние оказывает форма аппарата. В случае плоской стенки амплитуда затухает на несколько меньшем расстоянии от стенки по сравнению с цилиндрической стенкой [18].

Проведенная нами статистическая обработка наших и литературных опытных данных позволила установить зависимость величины пристенного всплеска локальной доли свободного объема ($\varepsilon_{ст}/\varepsilon_{ц}$) от ширины пристенной области с повышенной ε ($\delta_{ст}/d$). Указанная зависимость представлена на рис. 4.10. Здесь $\delta_{ст}$ – ширина пристенной области с экстремально повышенным значением локальной ε , $\varepsilon_{ст}$ – локальная доля свободного объема, $\varepsilon_{ц}$ – локальная ε в центральной части аппарата. Установленная зависимость подтверждает установленные закономерности распределения доли свободного объема по радиусу насадочного слоя рассмотренные выше.

Представляют интерес применяемые на практике способы измерения распределения ε в поперечном сечении насадочных аппаратов. Их условно можно разделить на 3 группы: лучевые; жидкостные и механические.

В опытах [106] насадочный слой заливался сплавом Вуда, после его затвердевания делали кольцевые проточки и фотографировали место среза. Этот метод был усовершенствован в [87]. Зерна заливали смолой, после ее застывания делали кольцевые срезы с последующим фотографированием. Этот метод был использован в [105].

В работе [8] насадочный слой заливали сургучом. После его затвердевания получившийся стержень последовательно стачивали, а стружку взвешивали. По удельному весу материала насадки и наполнителя определяли объем пустот.

Жидкостный метод измерения распределения $\varepsilon_{лок}$ по высоте слоя заключался в измерении количества заливаемой в слой насадки жидкости. Его использовали в [66,72,91].

В [62] был предложен фотометод, который, однако, нельзя использовать при $H/d > 1$.

Способ, основанный на использовании флуоресцентных свойствах жидкости, был предложен в [102]. В качестве источника света использовался лазер, а в межнасадочное пространство заливалась флуоресцентная жидкость, коэффициент преломления которой был таким же, как и у стеклянных шаров, используемых в качестве насадки.

Рентгеновский способ измерения радиального распределения ε использовали в [14]. ε определялось рентгенографированием с использованием фотометрического метода. Примерно в то же время аналогичное исследование было выполнено нами в ГИАПе.

В измеряли радиальное распределение ε послойным просвечиванием насадочного слоя рентгеновским лучом.

Продолжением и развитием упомянутых выше работ стала разработанная нами методика измерения радиального распределения доли пустот [22]. Этот метод подробно описан в [3].

Большинство способов не позволяют с высокой точностью измерять интегральное среднестатистическое распределение доли свободного объема в поперечном сечении аппаратов с насадкой. Они не позволяют судить в полной мере о взаимосвязи между структурой зернистого слоя и газораспределением в нем. Наиболее перспективным для решения этой задачи представляется неразрушающийся метод контроля структуры. Представленные ниже опытные данные были получены с использованием именно этого метода.

На рис. 4.11 представлена схема измерения распределения ε , использованная в работах [4,22,27,96].

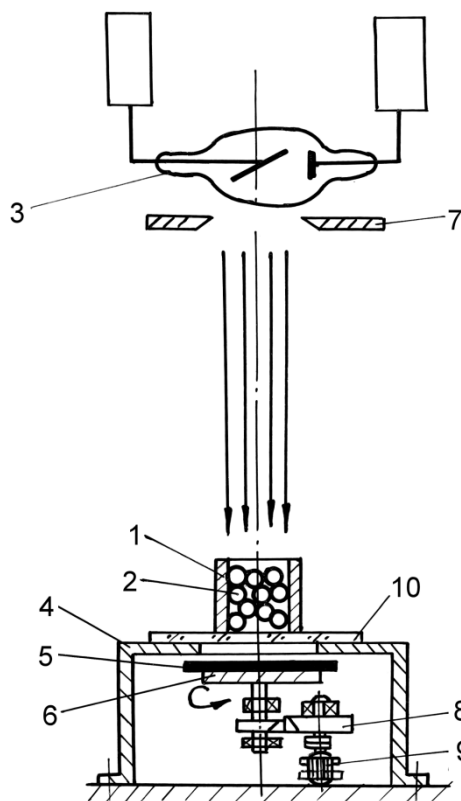


Рис. 4.11 Схема измерения распределения порозности: 1 – цилиндрический аппарат; 2 – зерна; 3 – источник рентгеновских лучей; 4 – опора; 5 – рентгеновская пленка; 6 – вращающийся столик; 7 – щелевая диафрагма; 8 – зубчатая передача; 9 – электродвигатель; 10 – стеклянное днище опытного аппарата.

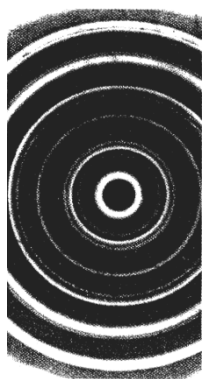


Рис. 4.12 Рентгенограмма слоя шаров. Шары $\varnothing 9,5$ мм, $H = 3d$.

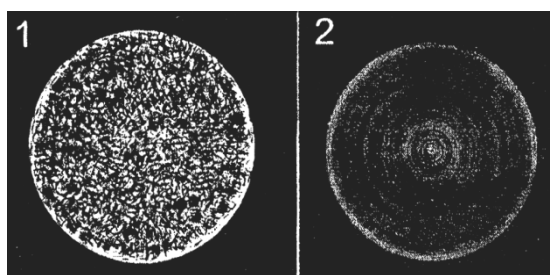


Рис. 4.13 Рентгенограммы слоя металлической кольцевой насадки типа N 1 – рентгенограмма, полученная без вращения пленки; 2 - рентгенограмма, полученная с вращением пленки.

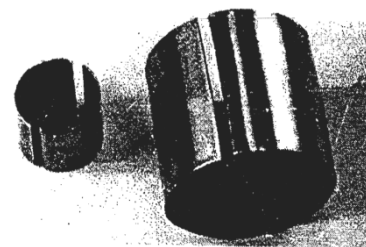


Рис. 4.14 Внешний вид кольцевой насадки типа N 1 ($10 \times 10 \times 0,9$ мм).

На рис. 4.12 приведена рентгенограмма насадочного слоя из шаров [22], а на рис. 4.13 рентгенограмма слоя кольцевой металлической насадки [27] (рис. 4.14). Методика измерения распределения ε по радиусу аппарата с насадкой приведена в работах [4,22].

4.2. Особенности движения потоков жидкости и газа через слой насадки

4.2.1. Движение жидкости через слой насадки

Как уже говорилось выше, насадочный слой, образованный элементами нерегулярной насадки, представляет собой сложную объемную структуру, хаотически пронизанную искривленными поровыми каналами переменного сечения. При встречном движении газового и жидкостного потоков в таком слое создается сложная гидродинамическая обстановка. Для удобства ее анализа целесообразно прежде всего рассмотреть однородное движение в насадке каждого потока в отдельности.

Поскольку движение жидкости по насадке можно рассматривать как пленочное, остановимся на некоторых аспектах пленочного течения жидкости по гладкой поверхности. Они в несколько трансформированном виде могут быть применены и к насадочным аппаратам.

Если объемный расход жидкости $V_{жс}$, м³/с, а периметр орошения Π , м (для трубок с внутренним диаметром d величина $\Pi=\pi d$), то линейная плотность орошения $q=V_{жс}/\Pi$, м³/м·с. Средняя толщина пленки жидкости:

$$\delta = \frac{V_{жс}/\Pi}{u_{ср}}, \quad (4.1)$$

где $u_{ср}$ – средняя скорость движения пленки жидкости, м/с. Критерий Рейнольдса:

$$Re_{ж} = \frac{u_{ср} d_{\text{э}}}{\nu_{ж}} = \frac{4q}{\nu_{ж}}. \quad (4.2)$$

Здесь эквивалентный диаметр пленки:

$$d_3 = 4\Pi \delta / \Pi = 4\delta. \quad (4.3)$$

В зависимости от величины $Re_{жс}$ наблюдаются [113,114, 157-159,281,438] три основных режима течения пленки. Ориентировочные значения $Re_{жс}$, соответствующие переходу от одного режима к другому: ламинарное течение пленки с гладкой поверхностью раздела фаз ($Re_{жс} < 30$), ламинарное течение с волнистой поверхностью раздела фаз ($30 < Re_{жс} < 1600$), турбулентное течение пленки ($Re_{жс} > 1600$). При этом скорость жидкости по толщине пленки изменяется по параболическому закону в зависимости от величины $Re_{жс}$ от $u=0$ на поверхности до u_{max} на границе раздела фаз. Для расчета δ и $u_{ср}$ имеются теоретические формулы [113,114,307].

Теперь перейдем к однофазному движению жидкости непосредственно в насадочном слое. При сравнительно малых скоростях газа его движение не оказывает заметного влияния на течение жидкости и может не учитываться.

Движение жидкости через насадку характеризуется плотностью орошения, т.е. объемным расходом жидкости через единицу площади поперечного сечения аппарата – S , м²:

$$L_{оп} = \frac{L}{S}, \text{ м}^3/\text{м}^2\text{ч или м}^3/\text{ч}, \quad (4.4)$$

где L – количество жидкости, поступающей в аппарат, м³/ч.

Средний диаметр каналов между насадочными телами в сечении колонны находят из предположения, что поверхность каналов в слое насадки равна произведению Π на среднюю длину каналов $H \cdot k$, где H – высота слоя насадки, а k – коэффициент, учитывающий извилистость каналов и численно равный отношению усредненной длины каналов – l к высоте слоя насадки: $k=l/H > 1,0$. Таким образом, поверхность насадки в слое $F = SHa = \Pi Hk$, где a – удельная поверхность насадки, м²/м³. Отсюда находим:

$$\Pi = \frac{Sa}{k}. \quad (4.5)$$

Пользуясь уравнениями (4.4) и (4.5) найдем линейную плотность орошения:

$$q = \frac{V_{ж}}{\Pi} = \frac{L_{од} k}{a}. \quad (4.6)$$

Критерий Рейнольдса для жидкости в насадочных аппаратах рассчитывается по эквивалентному диаметру пленки, т.е. q в уравнении (4.2) заменяется на q из уравнения (4.6). При $k=1$ получим:

$$\text{Re}_{ж} = \frac{4q}{v_{ж}} = \frac{4L_{од}}{v_{ж} a}. \quad (4.7)$$

Численно величина k может быть определена по уравнению [115]

$$k = (1 - S_m n^{2/3})^{1/2}, \quad (4.8)$$

где S_m – средняя площадь миделя элемента насадки, м^2 ; n – число элементов насадки в единице объема слоя.

Для шара: $S_m = \pi d^2 / 4$.

Для расчета миделя седел известны формулы:

для седел Инталокс -

$$S_m = 0,48 [\pi/2(a_1 - a_2) + 4,828a_1(a_2 + \delta) - 3,792 a_2^2] \quad (4.9)$$

для седел Берля –

$$S_m = 0,823 a_{сб}^2. \quad (4.10)$$

Значения геометрических параметров седел - a_1, a_2, δ и $a_{сб}$ см. на рис 4.15

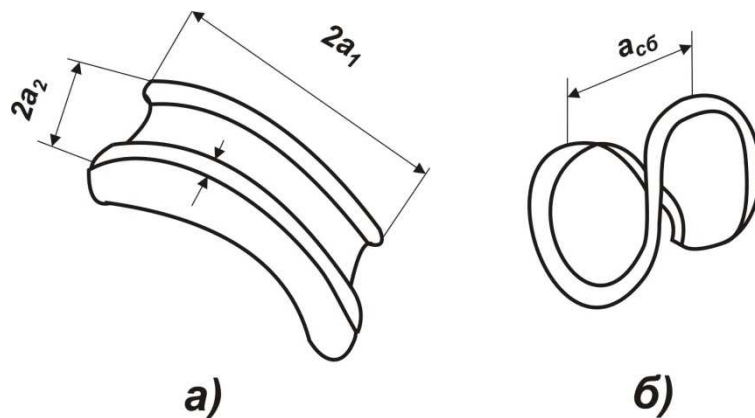


Рис. 4.15 Геометрические параметры седел Инталокс (а) и Берля (б) для расчета миделя

Величина коэффициента извилистости для насадки шаровой формы колеблется по разным оценкам от 1,41 до 1,5 [115].

Уравнения (4.6) и (4.7) выведены в предположении, что вся геометрическая поверхность насадки смочена жидкостью. Однако фактически этого не происходит. Прежде всего она остается не смоченной в местах контакта насадочных элементов, и далее насколько смочена поверхность зависит от интенсивности течения жидкости через слой насадки, т.е. от плотности орошения. С ее увеличением коэффициент смачивания (доля смоченной поверхности) – ψ_w увеличивается.

Визуальные наблюдения течения воды в колонне загруженной шарами показали [133], что при малых плотностях орошения течение имеет прерывистый характер: жидкость накапливается вблизи мест контакта насадочных тел и периодически протекает струйками (рис. 4.16а) от одной точки контакта к другой.

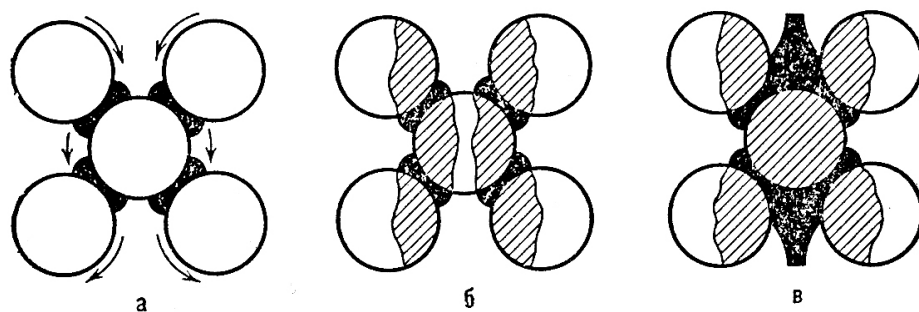


Рис. 4.16 Течение жидкости по насадке (заштрихованные области – пленка жидкости; затемненные области – накопление жидкости):
а- струйчатое; б – пленочное; в – «провал» жидкости.

При увеличении L_{op} растет количество удерживаемой жидкости и при $L_{op}=7,2$ м/ч на поверхности тел начинает образовываться пленка (рис. 4.16б). Смоченная поверхность растет, пленка утолщается. При $L_{op}=86,4$ м/ч достигается полное смачивание и жидкость начинает «проваливаться», падая между насадочными телами в виде капель и струй (рис. 4.16в). При

дальнейшем увеличении L_{op} толщина пленки не растет, а возрастает количество проваливающейся жидкости. Таким образом, в насадочных аппаратах, в отличие от движения жидкости по гладкой поверхности, пленочное течение существует лишь при определенных режимах и имеет иной характер. В зависимости от интенсивности течения меняется и степень смачивания поверхности насадки. Поэтому величину a в уравнениях (4.6) и (4.7) следует умножить на $(\psi_w < 1)$.

4.2.2. Движение газа через слой насадки

Извилистость каналов в насадочном слое и непостоянство их сечения по высоте слоя делают скорость газа переменной величиной. Поэтому исходят из средней скорости газа, которую находят делением объемного расхода газа на среднее сечение каналов. Пусть площадь сечения колонны S , m^2 , высота насадки H , m и свободный объем - ε . Тогда объем каналов, по которым движется газ - $SH\varepsilon$, m^3 . Длина каналов, т.е. пути газа Hk и среднее сечение каналов: $S_{cb} = \frac{SH\varepsilon}{Hk} = \frac{S\varepsilon}{k}$, а доля живого сечения насадки $S_{cb}/S = \varepsilon/k$.

Если объемный расход газа V_G , то действительная средняя скорость газа:

$$w = \frac{V_G}{S_{cb}} = \frac{V_G k}{S\varepsilon} = \frac{w_0 k}{\varepsilon}, \quad (4.11)$$

где $w_0 = V_G/S$ – скорость газа, отнесенная ко всему сечению аппарата (приведенная скорость). Обычно принимают коэффициент извилистости $k=1$, тогда уравнение (4.11) принимает вид:

$$w = \frac{w_0}{\varepsilon}. \quad (4.12)$$

Как говорилось в разделе 2.2., критерий Рейнольдса для газа рассчитывается по действительной скорости газа w и $d_3 = \frac{4\varepsilon}{a}$:

$$Re_{\Gamma} = \frac{wd_{\text{э}}}{\nu_{\Gamma}} = \frac{w_0 4\varepsilon}{\varepsilon \nu_{\Gamma} a} = \frac{4w_0}{\nu_{\Gamma} a}. \quad (4.13)$$

При течении газа через насадку турбулизация развивается значительно раньше, чем при движении в полых каналах. По данным [72] границе ламинарного режима соответствует $Re_{\Gamma}=60$. Переходный режим - $Re_{\Gamma}=60 \div 6000$, турбулентный - $Re_{\Gamma} > 6000$. По данным [134] соответственно $Re_{\Gamma}=40$, $Re_{\Gamma}=40 \div 1200$ и $Re_{\Gamma} > 1200$. В работе [137] предлагается несколько измененная терминология: ламинарный режим в насадочном слое называют «ползучим», а переходный режим – ламинарно-инерционным, что не меняет существа явления.

Можно предположить, что отмеченные отличия в граничных значениях Re_{Γ} в работах [72] и [134] объясняются тем, что опыты проводились при различных отношениях диаметра аппарата к диаметру элемента насадки, а, следовательно, при разной степени влияния пристенной области, в которой величина свободного объема и коэффициента извилистости существенно отличаются от их значения в остальной части аппарата. О влиянии этого фактора говорит то, что все граничные значения Re_{Γ} в работе [72] выше, чем в работе [134]. С другой стороны, различия, установленные в граничных значениях Re_{Γ} , как отмеченных выше, так и в других работах, возможно объясняются тем, что переход от одного режима к другому в слое насадки размыт и достигается по мере установления соответствующего режима во всех каналах [138,139] и поэтому границы режимов трудно однозначно фиксировать.

Газораспределение в слое насадки

В связи с важностью вопроса о взаимосвязи газораспределения в насадочном слое с его структурой и его влиянием на эффективность работы насадки рассмотрим этот аспект более подробно.

На рис. 4.17 и в табл. 4.1 представлены опытные данные в [22,27,214,379] по профилям скорости газа в аппарате, загруженном

различными насадками: кольцами Рашига, а также S-образной насадкой типа N1 и типа MS.

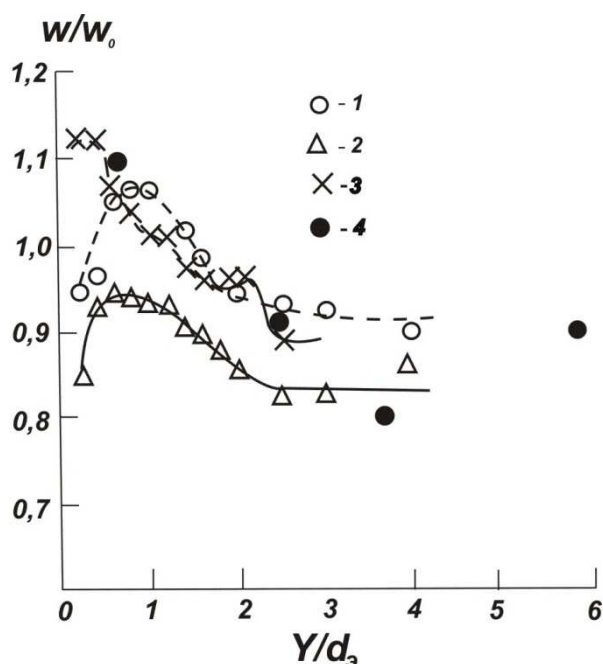


Рис. 4.17 Профили скорости в аппарате, загруженном различными насадками:

1 – кольца Рашига; 2 – насадка типа N1; 3 – насадка типа MS [27]; 4 – кольца Рашига [214].

Таблица 4.1

Результаты опытов по исследованию газораспределения в поперечном сечении слоя насадки [22,27,379]

Название насадки, ее размеры, мм	w_0 , м/с	w_{max} , м/с	w_{min} м/с	$\frac{w_{max}}{w_{min}}$	$\frac{w_{max} - w_{min}}{w_0}$	КМС * $Y_m/d_{\text{Э}}$
Кольца Рашига 10×10×0,9	1,0	1,06	0,76	1,395	0,30	1,11
ГИАП-N1 10×10×0,9	1,0	0,944	0,823	1,147	0,12	1,08
Мини-S 10×10×0,9	1,0	1,06	0,74	1,43	0,32	0,4

*КСМ – координата максимальной скорости,
 Y_m - расстояние w_{max} от стенки

Измерения проводились непосредственно на выходе газового потока из слоя. При такой организации эксперимента датчики термоанемометра не нарушали структуру слоя насадки, обеспечивая высокую достоверность полученных данных.

На рис 4.18 представлены данные, полученные различными авторами [40,62,65,140,143,149,150,160,162] для насадочных тел, имеющих форму шара и цилиндра.

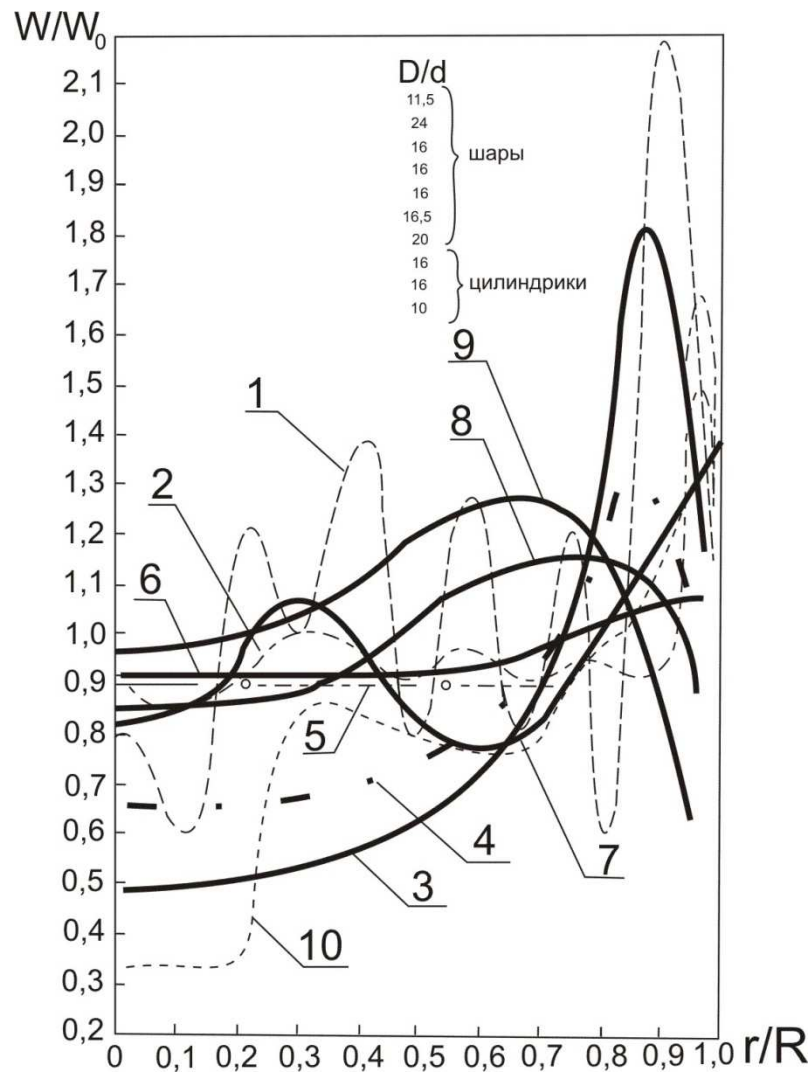


Рис. 4.18 Профили скорости в аппаратах с насадками по данным различных авторов.

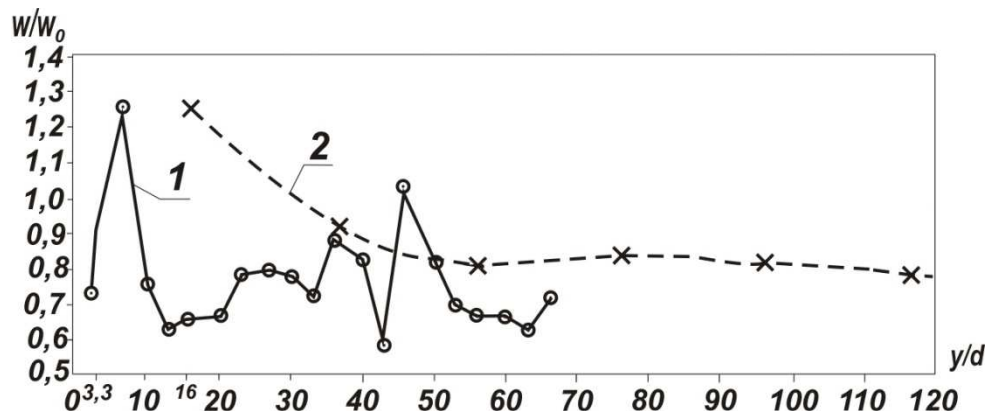


Рис. 4.19 Безразмерные профили скорости в аппаратах большого размера при обычной загрузке по данным [62,215] в нашей обработке: 1 – $D/d=133.3$ – [215] Клёнова; 2 - $D/d=280$ – [62] Попова

На рис. 4.19 представлены профили скорости полученные для отношений $D/d > 100$ по данным [62 и 215].

Из этих данных следует, что профиль скорости в цилиндрических аппаратах с насадкой равно, как и с неподвижным зернистым слоем (НЗС), имеет характерный максимум вблизи стенки, обусловленной более рыхлой укладкой насадочных элементов в этой области. Важным выводом является и то, что как сам характер профиля, так и величина максимальной скорости в пристенной области при одной и той же скорости газа и одинаковых условиях ввода газа в слой значительно отличаются для различных насадок и напрямую зависят от формы и размера насадочных тел. В аппаратах ограниченного размера, где $D/d < 10$, для насадочных тел одной и той же формы и одного и того же размера характер профиля изменяется при изменении соотношения D/d .

Существенным представляется оценка координаты максимума скорости. Опытные данные по этому вопросу противоречивы. По данным [66] она составляет $(0,6-1,5) d$, по данным [40] $(2,5-4) d$, причем с ростом D/d она возрастает [65,217]. В [221] утверждается, что координата максимума скорости постоянна и равна $0,25 d$. По данным [225] скорость у стенки на 30-70% выше, чем в центральной части слоя. Но и в центральной части профиль

неравномерен. Здесь максимальное отклонение местных значений скорости от средних составляет $\pm 18\%$.

Из опытов [143] следует, что плотно уложенные шары ($\varepsilon = 0,382$) дают малое отличие в профиле $W/W_0 = f(V/d)$ по сравнению со свободно уложенными шарами ($\varepsilon = 0,402$) того же размера. В работе [259] расхождения в профилях скорости между свободной и специальной загрузкой несколько больше.

Более плотная укладка зерен позволяет получить более равномерную структуру НЗС в центральной части аппарата при $D/d > 100$, что приводит к некоторому сглаживанию профиля скорости в этой части аппарата. Вместе с тем можно сделать вывод о том, что при плотной укладке зерен все характерные особенности профиля скорости сохраняются [143,226,259].

Рассмотрим влияние скорости газового потока на профиль скорости.

Работа [52] показала, что в области малых чисел Рейнольдса флуктуации скорости должны быть выражены более резко. Уменьшение неравномерности газораспределения в НЗС при увеличении скорости потока отмечается в работах [12,52,62,268,269,273,279,293]. Противоположное мнение высказывалось лишь в работе [94].

Опыты [268,269] показали, что при $W_0 > 1-2$ м/с неравномерность газораспределения не меняется, а при $W_0 < 1$ м/с она резко возрастает. Автор работы [143], проводивший опыты при $Re_d = 1470-4350$ нашел, что скорость не влияет на газораспределение [273]. Другие авторы установили, что при увеличении W_0 с 0,4 до 0,8 м/с профиль скорости становится более плоским, и пристенный всплеск уменьшается. Опыты [62,275,367] также показали снижение неравномерности потока с ростом величины W_0 . Основываясь на опытах работы Попова [367], Идельчик объясняет этот факт возрастанием перетекания потока к стенкам аппарата с уменьшением числа Рейнольдса из-за уменьшения при этом отношения коэффициента сопротивления проходных каналов у стенки к коэффициенту сопротивления в остальной части слоя зерен [283,322].

С результатами работы [367] согласуются данные работ [268,273,322].

В [22] исследовались турбулентность в насадочном слое. Более подробно об этом смотри в [96 и 326].

Экспериментальные данные, полученные различными авторами по распределению доли свободного объема и скорости газа по сечению насадочного аппарата, позволяют выделить в нем две характерные зоны: центральную и пристенную.

В [322], исходя из этого, предлагается поликанальная структурная модель движения газового потока в слое насадки (см. рис. 4.20).

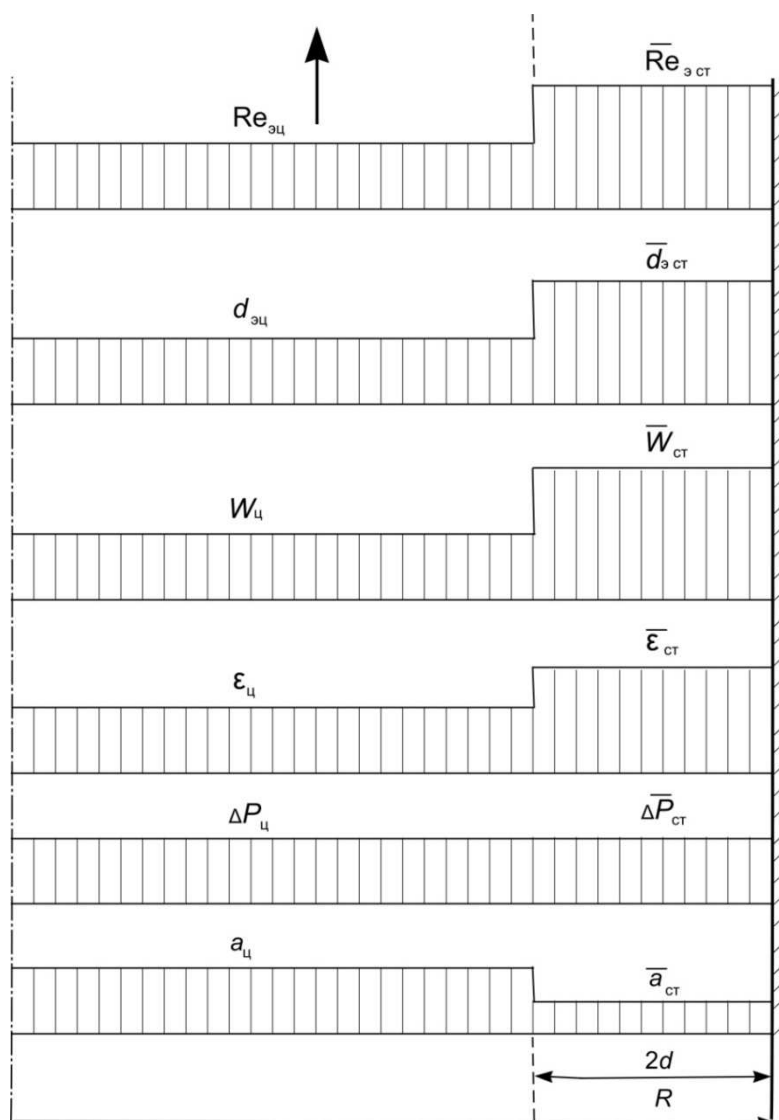


Рис. 4.20 Поликанальная структурная модель движения газового потока в слое насадки: R – радиус аппарата; d – средний размер элемента насадки.

При этом общий расход газового потока G в аппарате равен сумме газовых потоков в центральной части аппарата – $W_{ц}$ и пристенной области $W_{ст}$: $G = W_{ц} + W_{ст}$.

Ширина геометрической пристенной зоны, вообще говоря, может быть меньше по сравнению с гидродинамической пристенной зоны, что может быть объяснено эффектом растекания газового потока по фронту слоя насадки. Этот эффект подробно обсуждается в [22 и 322].

В работе [341] получено следующее соотношение, устанавливающее взаимосвязь между скоростью потока и долей свободного объема в двух параллельно работающих каналах с различной величиной доли свободного объема в них:

$$\frac{W_{ц}}{W_{ст}} = \left(\frac{\varepsilon_{ц}}{\varepsilon_{ст}} \right)^2 \cdot \left(\frac{1 - \varepsilon_{ст}}{1 - \varepsilon_{ц}} \right)^2. \quad (4.14)$$

Из формулы (4.14) следует, что неоднородность порозности насадочного слоя весьма существенно влияет на газораспределение в отдельных трубках. Так, изменение отношения $\varepsilon_{ц}/\varepsilon_{ст}$ всего на 5 % приводит к изменению отношения $W_{ц}/W_{ст}$ на 25 % [100].

Используя идеи, развиваемые в работах [4, 12, 26, 100, 101], на базе предлагаемой поликанальной структурной модели движения потока в аппаратах с насыпной насадкой можно получить расчетные соотношения для оценки реального распределения среднеинтегральных удельных расходов газового потока в двух характерных зонах аппаратов с насадкой. Воспользуемся для этой цели, например, уравнением для расчета потери напора в насадочном слое, предложенным в [340,372] для зерен различной формы:

$$Eu_m = \frac{100}{Re_s} + 0,9. \quad (4.15)$$

Модифицированный критерий Эйлера и критерий Рейнольдса, отнесенный к эквивалентному диаметру канала, рассчитываются по формулам:

$$Eu_m = \frac{\Delta P}{H} \cdot \frac{\varepsilon^2}{\rho \cdot W_0^2 \cdot a}, \quad (4.16)$$

$$Re_{de} = \frac{W_0 \cdot d_3}{\nu \cdot \varepsilon}, \quad (4.17)$$

$$d_3 = \frac{4\varepsilon}{a}. \quad (4.18)$$

По аналогии с неподвижным зернистым слоем удельную поверхность насадки можно рассчитать по формуле:

$$a = \varphi \cdot (1 - \varepsilon). \quad (4.19)$$

Для определения фактора формы воспользуемся для простоты вывода шаровой насадкой, у которой фактор формы, рассчитывается по формуле:

$$\phi = \frac{6}{d_e}. \quad (4.20)$$

После преобразований выражение (4.15) с учетом формулы (4.20) имеет вид:

$$\frac{\Delta P}{H} = 900 \cdot \frac{\nu \cdot \rho \cdot (1 - \varepsilon)^2}{\varepsilon^2} \cdot W_0 \cdot \left[1 + 0,006 \cdot \frac{W_0 \cdot d_3}{\nu \cdot (1 - \varepsilon)} \right]. \quad (4.21)$$

В соответствии с предложенной поликанальной моделью для двух выделенных характерных зон аппарата с насадкой пристенной и центральной вследствие неразрывности потока имеет место следующее равенство:

$$\Delta P_u = \Delta P_y = \Delta P_{cm}. \quad (4.22)$$

С учетом равенства (4.22) уравнение (4.21) для каждой из выделенных двух характерных зон аппарата с насадкой, будет иметь следующий вид [372]:

В пристенной зоне:

$$\frac{\Delta P}{H} = 900 \cdot \frac{\nu \cdot \rho \cdot (1 - \varepsilon_{cm})^2}{\varepsilon_{cm}^2 \cdot d_3^2} \cdot W_{cm} \cdot \left[1 + 0,006 \cdot \frac{W_{cm} \cdot d_3}{\nu \cdot (1 - \varepsilon_{cm})} \right]. \quad (4.23)$$

В центральной зоне:

$$\frac{\Delta P}{H} = 900 \cdot \frac{\nu \cdot \rho \cdot (1 - \varepsilon_u)^2}{\varepsilon_u^2 \cdot d_3^2} \cdot W_u \cdot \left[1 + 0,006 \cdot \frac{W_u \cdot d_3}{\nu \cdot (1 - \varepsilon_u)} \right]. \quad (4.24)$$

Учитывая, что $Re_{de} = \frac{W_0 \cdot d_3}{\nu}$, после соответствующих алгебраических преобразований уравнений (4.23) и (4.24), получаем:

$$\frac{W_{cm}}{W_u} = \left[\frac{(1 - \varepsilon_u) \cdot \varepsilon_{cm}}{(1 - \varepsilon_{cm}) \cdot \varepsilon_u} \right]^2 \cdot \left[\frac{1 + 0,006 \cdot Re_3 \cdot \frac{1}{(1 - \varepsilon_u)} \cdot \frac{W_u}{W_0}}{1 + 0,006 \cdot Re_{ds} \cdot \frac{1}{(1 - \varepsilon_{cm})} \cdot \frac{W_{cm}}{W_0}} \right]. \quad (4.25)$$

При $Re_3 \rightarrow 0$ вторым членом правой части уравнения (4.25) можно пренебречь. В этом случае получим выражение аналогичное полученному ранее в [341] для двух параллельно работающих каналов с различной ε насадочного слоя в них, а именно:

$$\frac{W_{cm}}{W_u} = \left[\frac{(1 - \varepsilon_u) \cdot \varepsilon_{cm}}{(1 - \varepsilon_{cm}) \cdot \varepsilon_u} \right]^2. \quad (4.26)$$

Полученное уравнение (4.26), позволяет расчетным путем оценить величину соотношения реальных среднеинтегральных удельных расходов газового потока в пристенной и центральной зонах аппарата с нерегулярной насыпной насадкой любого типа по известным величинам средней порозности в указанных зонах.

Для практического использования уравнения (4.26), необходима информация по $\varepsilon_{ц}$ и $\varepsilon_{ст}$. Что касается величины $\varepsilon_{ц}$, то для аппаратов, в которых отношение $D/d > 8$ [58] можно принимать $\varepsilon_{ц} \approx \varepsilon_0$ [27]. Близость величин $\varepsilon_{ц}$ и ε_0 хорошо иллюстрируется опытными данными Sonntag [8].

При определении средних по всему аппарату значений ε_0 , можно использовать эмпирическую формулу Аэрова [12]:

$$\varepsilon_0 = 0.39 + \frac{0.068}{D/d} + \frac{0.542}{(D/d)^2}. \quad (4.27)$$

Опытные данные по ε_{pz} для насадок шаровой формы приводятся в работе [322]. Там же показано, что в диапазоне отношений D/d от 5 до 22 наибольшие отклонения величины $\varepsilon_{ст}$ от среднего значения в аппарате — ε_0 для слоя насадки шаровой формы приходятся на область аппарата шириной $(1—2) d$ насадки от стенки.

Ширина гидродинамической пристенной зоны с повышенным удельным расходом газового потока для шаров в работе [22] оценивается в $(2-3) d$ насадки от стенки аппарата. В [8] было показано, что в слое насыпной насадки кольцевой формы ширина пристенной зоны составляет $(2-2,5) d$.

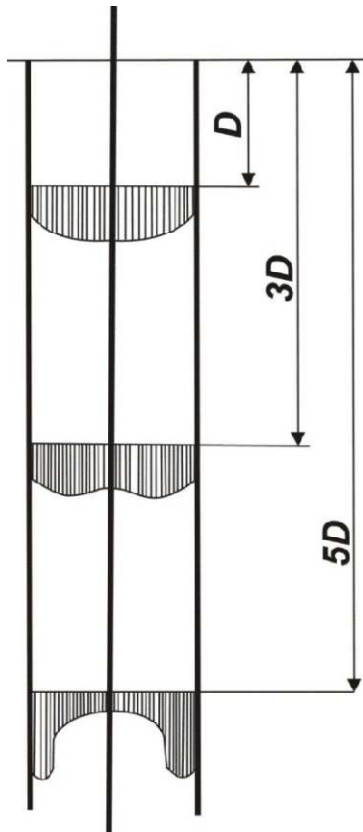
Следует отметить, что в связи с зависимостью от многих факторов, в том числе от средней скорости газа, получение достаточно точных уравнений для описания профиля скорости газа в насадочном слое вызывает большие трудности [357,379].

Таким образом, может быть сделан однозначный вывод о существенном влиянии конструкции и размера насадки на характер газораспределения в насадочном слое, что должно оказывать соответствующее влияние на эффективность работы колонного аппарата с насадкой и поэтому не может остаться без внимания при выборе насадки и разработке конструкции аппарата, в который она загружается.

4.2.3. Гидродинамические режимы при двухфазном движении потоков через насадку

При двухфазном движении жидкости и газа через насадку на границе раздела фаз (при противоточном движении) возникают касательные напряжения, равные по величине, но противоположные по знаку. При противотоке газ тормозит стекание пленки, увеличивается ее толщина, снижается средняя скорость. При больших скоростях газа жидкость накапливается, наступает захлебывание, а затем и отрыв жидкости от поверхности и унос в виде брызг. При нисходящем прямотоке газ увеличивает скорость жидкости, снижает толщину пленки.

Характер распределения скоростей в газовом и жидкостном потоках [356] показан на рис. 4.21 и 4.22.



При двухфазном движении свободный объем между зернами уменьшается на величину δ , взаимодействие между фазами ведет к увеличению ΔP по сравнению с сопротивлением неорошаемой насадки.

Почти полное оттеснение жидкости к стенкам аппарата происходит на расстоянии, равном 4-5 диаметрам колонны [372,392].

Рис. 4.21 Распределение плотности орошения жидкостью по высоте насадочной колонны.

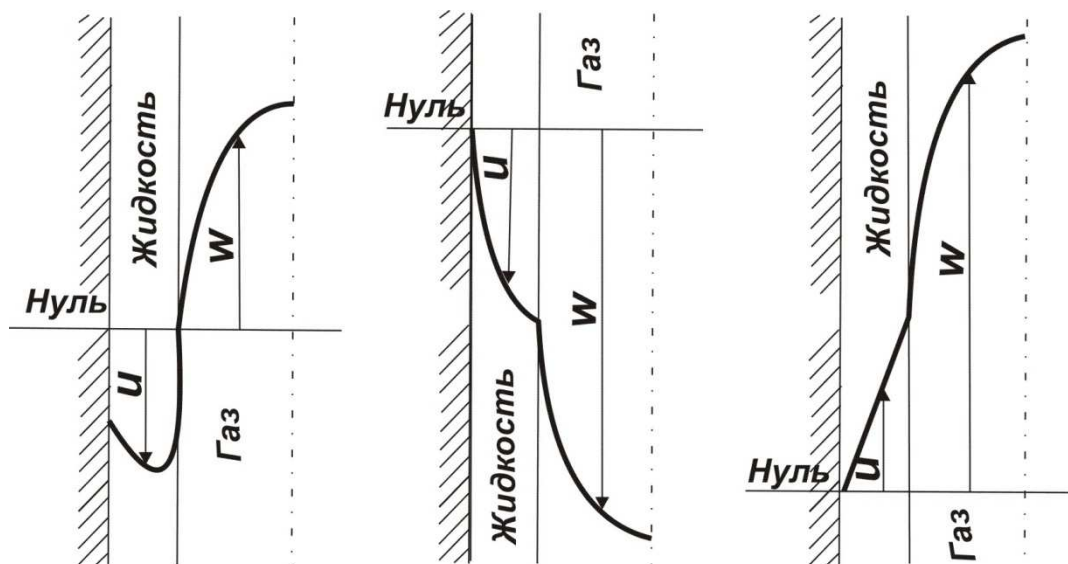


Рис. 4.22 Распределение скорости при пленочном течении в двухфазном потоке:
а – противоток; б – нисходящий прямоток; в – восходящий прямоток.

При противотоке в зависимости от скоростей потоков наблюдается несколько различных гидродинамических режимов.

Пленочный режим имеет место при сравнительно небольших нагрузках по газу и жидкости. Взаимодействие фаз тут незначительно, количество удерживаемой жидкости u_3 невелико, и оно не зависит от скорости газа. На кривой $\Delta P=f(w_0)$ (рис. 4.23) линии $A_1 B_1, A_2 B_2, \dots$ выражающие сопротивление орошаемой насадки, в пленочном режиме, параллельны линии для сухой насадки, но лежат выше нее, сдвигаясь вверх с увеличением плотности орошения. Здесь $\Delta P \sim w_0^{2,0}$.

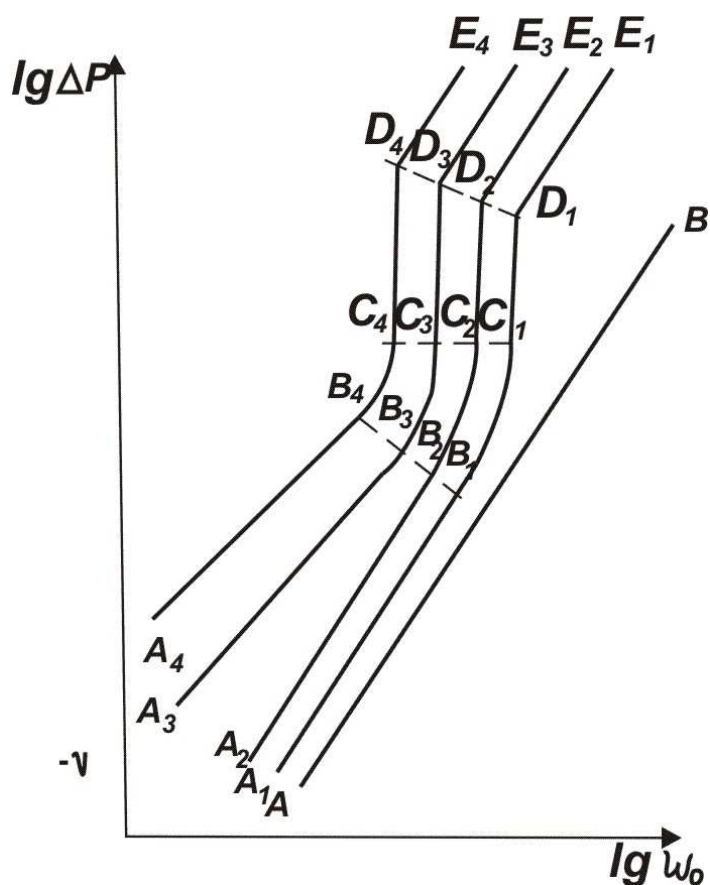


Рис. 4.23 Кривые зависимости ΔP от w_0 : АВ – кривая для сухой насадки; $A_1 B_1 C_1 D_1 E_1, A_2 B_2 C_2 D_2 E_2, \dots$ – кривые при постоянной плотности орошения; B_1, B_2, \dots – точки начала подвисания; C_1, C_2, \dots – точки начала захлебывания (инверсии); D_1, D_2, \dots – точки захлебывания (уноса).

Режим подвисяния (линии B_1C_1, B_2C_2, \dots) характеризуется торможением жидкости. Скорость ее течения снижается, растет толщина пленки, снижается ε и более резко растет $\Delta P \sim w_0^{4,5}$. Увеличиваются смоченная и активная поверхности, что ведет к возрастанию интенсивности массопередачи [372,380] (см. раздел 4.3).

Режим захлебывания возникает вследствие того, что сила трения уравнивает силу тяжести жидкости, накопившейся в насадке. Накопление жидкости начинается с нижнего слоя и постепенно распространяется на всю высоту. Происходит инверсия фаз: газ перестает быть сплошной фазой и барботирует через жидкость, заполнившую насадку. Этот режим на рис. 4.23 изображается участками C_1D_1, C_2D_2, \dots расположенными почти вертикально. Точки перегиба C_1C_2, \dots - точки начала захлебывания. Согласно [170,171,172,175] режим захлебывания соответствует максимальной эффективности насадочных колонн. Объясняется это бóльшей поверхностью контакта фаз, которая здесь определяется не геометрической поверхностью, а условиями барботажа.

Многочисленные экспериментальные определения точек захлебывания [72,176,180,184,203,207,379,380] и др. позволили сделать следующие выводы:

1. С увеличением плотности орошения захлебывание наступает при более низких скоростях газа.
2. Для большинства нерегулярных насадок диапазон соотношений скорости начала подвисяния w_n к скорости начала захлебывания w_3 равен $0,6 \div 0,9$. Причем с ростом L_{op} w_n приближается к w_3 . Для $L_{op} > 100$ $w_n/w_3 = 0,8 \div 0,9$.
3. При одинаковых плотностях орошения w_3 выше при более высоких значениях d_3 , т.е. при более крупной насадке.
4. При одинаковых размерах насадочных тел предел нагрузок тем ниже, чем ниже ε насадки.

5. Для регулярной насадки пределы нагрузок существенно выше, чем для беспорядочно загруженных.
6. При повышении давления захлебывание наступает при более высокой массовой скорости.
7. Повышение вязкости жидкости и уменьшение ее удельного веса приводят к снижению предельных нагрузок.

Режим уноса – участки $D_1E_1, D_2E_2 \dots$ (рис. 4.23). При дальнейшем увеличении скорости газа происходит вторичная инверсия фаз: газ становится сплошной фазой и жидкость уносится вместе с газом в основном в виде брызг.

При прямотоке сила трения и тяжести действуют в одном направлении, и взаимодействие потоков меняется. С ростом w_0 толщина пленки жидкости снижается, ΔP растет медленно и точка подвисяния не достигается. При большей скорости жидкость срывается с поверхности и уносится в виде брызг.

Как уже говорилось, даже при однофазном движении жидкости через насадку в ней накапливается и удерживается определенное количество жидкости. При противоточном движении фаз через насадку количество удерживаемой жидкости увеличивается. Это в большинстве случаев оказывает негативное влияние на эффективность работы аппаратов с насадкой, т.к. снижается активная поверхность контакта фаз. О расчете количества удерживаемой жидкости см. ниже.

4.2.4. Распределение и перемешивание потоков

Большое влияние на гидродинамическую обстановку в насадочных аппаратах оказывает распределение жидкости по насадке.

Наибольшая эффективность насадочных аппаратов достигается при равномерном распределении жидкости в поперечном сечении аппарата,

поэтому в идеале желательно сохранение равномерности во всех поперечных сечениях по высоте слоя насадки.

Равномерность распределения жидкости определяется, главным образом, первоначальным распределением подаваемой на насадку жидкости, т.е. работой, устройства для подачи жидкости (оросительного устройства), а также изменением равномерности, вносимой насадкой. При стекании с какого-либо насадочного тела жидкость может попасть на другой элемент насадки, либо расположенный под ним, либо сдвинутый в ту или иную сторону. Величина отклонения жидкости в сторону в нижеследующем ряду определяется формой насадочных элементов и их размером. По указанной причине равномерность распределения жидкости изменяется даже при равномерной подаче орошения на верхние слои насадки, ухудшаясь в нижних слоях (рис. 4.21).

Для колонн малого диаметра характерно достижение жидкостью стенок колонн и далее байпасирование части жидкости без эффективного взаимодействия с газом. Однако при $D/d > 8$ растекание жидкости к стенкам имеет место лишь в верхней части насадки (на высоте около 1 м). В [363] установлено, что высота начального участка «стабилизации» неравномерности жидкости $H/d \approx 30$. Увеличение плотности орошения снижает неравномерность, а противоток ее увеличивает, усиливая отток жидкости к стенкам. Регулярная укладка колец по сравнению с навалом ухудшает равномерность. В [367,368] установлено, что когда D/d достаточно велики (как в промышленных условиях) H насадки не влияет заметно на распределение жидкости.

Источником неравномерности в распределении газа является способ его ввода в аппарат. При центральном вводе за счет кинетической энергии входящей струи газ движется преимущественно в центральной части аппарата, постепенно заполняя все сечение (рис. 4.24).

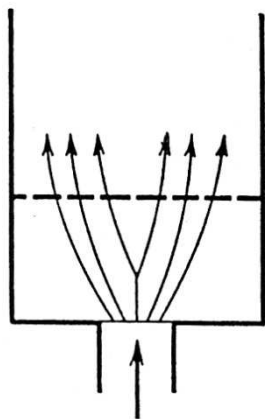


Рис. 4.24 Распределение газовой струи при центральном вводе газа.

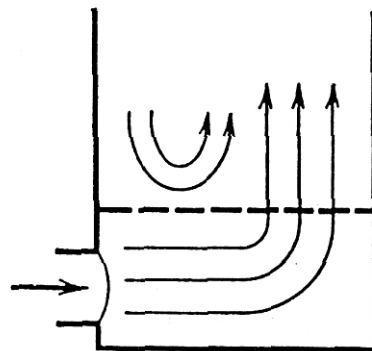


Рис. 4.25 Распределение газовой струи при боковом вводе газа.

При боковом вводе газовая струя движется к противоположной стенке и, ударяясь о нее, затем поворачивает вверх (рис. 4.25).

Присутствие насадки способствует улучшению распределения газа [283,293]. С увеличением скорости газа равномерность его распределения улучшается. При наличии орошения она ухудшается, возможно, как результат недостаточно равномерного распределения жидкости.

Необходимо кратко остановиться еще на одном явлении, которое в значительной мере имеет гидродинамическую природу и в насадочном слое отличается своими особенностями – перемешивание потоков.

При описании процессов массопереноса в аппаратах с насадкой используются идеализированные модели, в том числе модель идеального вытеснения, которая предполагает параллельное движение частиц с одинаковыми скоростями и определенное поле концентраций в поперечном сечении аппарата и вдоль его оси (см. раздел 4.3). Однако упомянутая выше неравномерность распределения потоков, локальное байпасирование, наличие застойных зон жидкости и, в особенности, продольное перемешивание нарушают поле концентраций, соответствующее идеализированной модели. Продольное перемешивание ведет к выравниванию концентраций по высоте аппарата и тем снижает движущую силу массопереноса. В то же время поперечное перемешивание несколько

уменьшает его отрицательное воздействие. Зависимость для расчетов коэффициентов перемешивания в жидкой и газовой фазах см. в [133,137,299,452].

Неравномерное распределение потоков и продольное перемешивание, негативное влияние которых на эффективность массопереноса увеличивается с увеличением диаметров аппаратов с насадкой, требуют принятия специальных мер по борьбе с ними. Возможности повышения эффективности работы насадочных аппаратов путем снижения отрицательного влияния масштабного фактора рассмотрены в разделе 4.2.6.

Еще одним негативным явлением в насадочном аппарате является брызгоунос, который может иметь место и в пленочном режиме и в режиме подвисяния. Его интенсивность может быть различной.

В насадочном слое брызгоунос возникает вследствие того, что газ срывает с поверхности жидкости капли, которые частично задерживаются в верхних слоях насадки, частично уносятся с газом. Унос брызг также возникает и в наднасадочном пространстве в результате воздействия газа на струи жидкости, вытекающие из оросительного устройства. Особенно значительный унос наблюдается при повышенных скоростях газа при орошении брызгалками и разбрызгивающими оросительными устройствами, а также распределительными плитами, в которых газ и жидкость проходят через одни и те же патрубки.

4.2.5. Гидродинамическая стабилизация в слое насадки

На входе газового потока в насадочный слой существует так называемый участок гидродинамической стабилизации. В его пределах происходит стабилизация структуры слоя, профиля скорости, потери напора, приходящегося на единицу высоты слоя и некоторых других параметров.

Как известно в полых каналах постоянного сечения поток стабилизируется на участках определенной длины, когда в нем исчезают

возмущения, вызванные условиями входа. При этом величина участка формирования и стабилизации профиля скорости, в соответствии с данными работы [381] для турбулентного режима течения (числа Рейнольдса $Re_D = 1 \cdot 10^4 - 1 \cdot 10^7$), составляют $H_{ст}/D = 30-50$, где $H_{ст}$ – участок гидродинамической стабилизации, D – диаметр канала.

Для предварительной оценки $H_{ст}$ в насадочном слое рассмотрим упрощенную модель насадочного слоя, в основе которой, как и в случае зернистого слоя, являющегося частным случаем насадочного слоя, лежит внутренняя задача. Т.е. насадочный слой представляет собой систему параллельных цилиндрических каналов постоянного сечения, совокупная площадь поперечного сечения которых равна площади поперечного сечения насадочного слоя ($S_{св}$).

Установим соотношение d_k/d для слоев с $D/d > 10$ (наиболее часто встречающимся на практике). Отношение площади поперечного сечения, занятого насадкой S_n , к площади поперечного сечения, занятого каналами - $S_{св}$:

$$\frac{S_n}{S_{св}} = \frac{S(1-\varepsilon)}{S\varepsilon} = \frac{1-0.34}{0.34} = 1,94, \quad (4.28)$$

где $\varepsilon = 0,34$ для насадки шаровой формы при $D/d > 10$ [382], d_k – диаметр канала между насадочными телами.

Принимая число каналов в сечении насадочного слоя – n_1 , равным числу насадочных элементов в том же сечении – n_2 , получим:

$$\frac{S_n}{S_{св}} = \frac{d^2 n_1}{d_k^2 n_2} = 1,94.$$

Откуда $d_k = 0,718 d$ и для участка стабилизации в идеальной модели, если принять, как и в полых каналах $H_{ст}/D = 30$, в случае насадки $H_{ст}/d_k = 30$, то $H_{ст}/d = 30 \cdot 0,718 = 22$. Для металлических насадок с $\varepsilon \approx 0,9$ при таких же условиях $H_{ст}/d \approx 30$.

Таким образом, для участка стабилизации в идеальной модели насадочного слоя:

$$H_{ст}/d = 22-30. \quad (4.29)$$

В реальном пространстве сложной конфигурации между насадочными телами омывающие их потоки все время соединяются и разъединяются. Имеют место отрывные течения [383]. Опыты по визуализации потока воды в слоях прозрачных стеклянных шаров [383], а также наши исследования в открытом гидрлотке показали, что для течения в межзерновом пространстве характерно единство струйного и вихревого течения. Течения эти перемежаются с постоянным изменением вектора скорости. Причем, с увеличением скорости потока пульсация вектора скорости несколько уменьшается. Кроме того, в пространстве между телами вектор скорости меняет свое направление и величину от нуля, у поверхности насадочного тела, до некоторого максимума, примерно в средней части случайного просвета между двумя соседними телами [12,384].

Как показано в работе [385], закономерность течения турбулентной струи заключается в малости поперечных составляющих скорости по сравнению с продольной [386]. Это полностью распространяется на течение в насадочном слое. Имеются застойные зоны, куда основной поток практически не проникает [384]. Установлено, что с ростом линейной скорости (вплоть до $Re \sim 100$) непроточные зоны сокращаются, далее практически остаются неизменными [322].

Упомянутые выше особенности, присущие стохастическому перемежающемуся течению в насадочном слое неизбежно вызывают повышенную турбулизацию потока уже при значениях $Re_э = 40-100$, а устойчивый турбулентный режим при $(Re_э)_{кр} = 1000-1200$ [382].

Учитывая сказанное, следует ожидать, что характерное для насадочного слоя снижение $(Re_D)_{кр}$ по сравнению с $(Re_D)_{кр} = 1 \cdot 10^4$ для полых каналов должно привести к уменьшению $H_{ст}/d$ по сравнению с полученным выше отношением (4.29) для идеальной модели насадочного слоя. Однако в насадочном слое имеется еще одно отличие от полых каналов. В последних поток стабилизируется в канале постоянного сечения. В насадочном слое

формирования структуры слоя происходит на участке определенной протяженности от входа в слой, что не может не влиять на гидродинамику потока.

Исходя из полученных в [396] результатов по изучению профиля скорости в зависимости от структуры насадочного слоя, можно утверждать, что в случае стабилизации структуры слоя в пределах указанного выше отношения $H_{ст}/d = 22-30$ последнее можно рассматривать как верхний предел участка гидродинамической стабилизации.

Гидродинамическая стабилизация в насадочном слое изучалась в ряде работ [40,62,384,396] и др., полученные в них данные малочисленны и противоречивы. Поэтому для проверки высказанных положений о формировании и стабилизации профиля скорости нами было выполнено специальное исследование [399]. Методика этих экспериментов описана в [119], а результаты экспериментов представлены ниже на рис. 4.26.

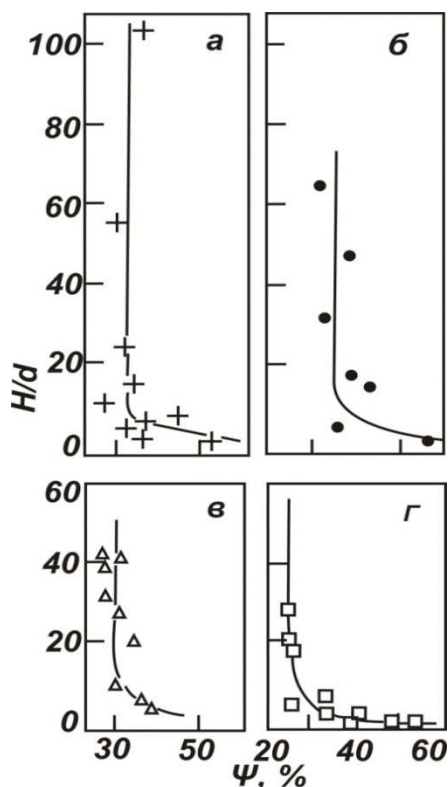


Рис. 4.26 Зависимость неравномерности газораспределения от относительной высоты слоя зерен в аппарате $D=94$ мм при $\bar{W} = \text{const}$:
а — шары, $d=4$ мм, $D/d=23.5$; б — шары, $d=6$ мм, $D/d=15.7$; в — шары, $d=9.5$ мм, $D/d=9.9$; г — шары, $d=14,5$ мм, $D/d=6,6$.

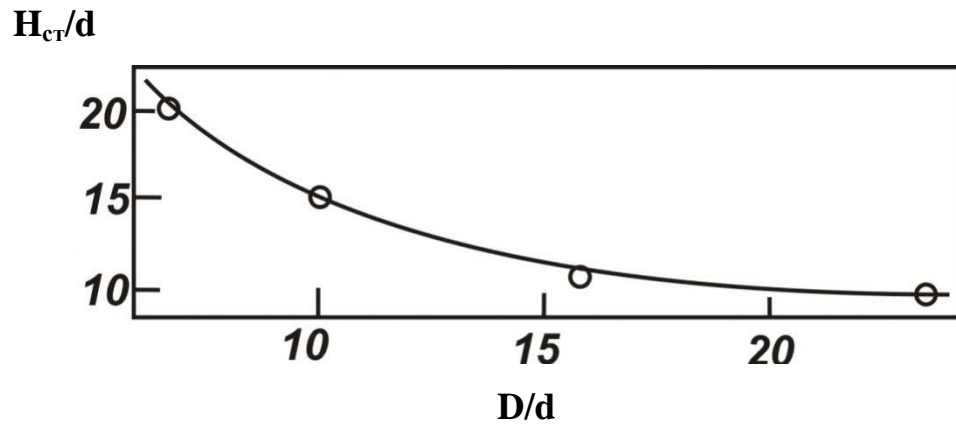


Рис. 4.27 Зависимость $H_{cr}/d = f(D/d)$ при $\bar{W} = \text{const}$.

На рис. 4.26 представлены результаты экспериментов, характеризующие зависимость неравномерности газораспределения ψ от безразмерной высоты слоя H/d при $\bar{W} = \text{const}$, где \bar{W} - средняя по всему поперечному сечению аппарата скорость, равная средней арифметической локальных скоростей W_i . Из их рассмотрения следует, что относительная высота участка гидродинамической стабилизации потока в слое насадки (НЗС) H_{cr}/d зависит от величины D/d (рис. 4.27). Характерно, что H_{cr}/d монотонно убывает с ростом D/d и зависимость становится автомодельной при $D/d \geq 20$, чему соответствует $H_{cr}/d \approx 9$. В диапазоне изученных значений $D/d=6,5 - 23,5$ кривая на рис. 4.27 описывается уравнением:

$$H_{cr}/d = 70(D/d)^{0,64}. \quad (4.30)$$

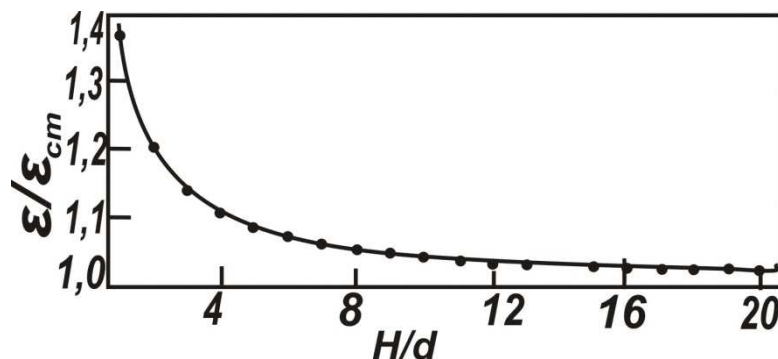


Рис. 4.28 Зависимость $\varepsilon/\varepsilon_{cm} = f(H/d)$ (шары, $d=14,2$ мм, $D/d=6,6$).

Значения $H_{ст}/d = 9-20$ для изученного диапазона D/d соответствуют результатам предварительного анализа и хорошо согласуются с данными специального эксперимента по изучению стабилизации структуры НЗС в аппарате $D=94$ мм, загруженном шарами $d=14,2$ мм. Из установленной экспериментально зависимости $\varepsilon/\varepsilon_{cm} = f(H/d)$ видно, что при $D/d=6,6$ стабилизация структуры зерен достигается $H/d \approx 20$ ($\varepsilon_{ст}$ - доля свободного объема слоя зерен (насадки) со стабилизированной структурой). При том же значении $H_{ст}/d$ (см. рис. 4.27) достигается гидродинамическая стабилизация в этом слое. Следовательно, участок гидродинамической стабилизации в данном случае совпадает по величине с участком стабилизации структуры НЗС.

Как это видно из сопоставления кривых рис. 4.26, при $H/d > 9$ для НЗС с $D/d > 9,9$ зависимость $\psi = f(H/d)$ описывается одной прямой, соответствующей установленной ранее зависимости $\psi = f(H/d)$ [397,399].

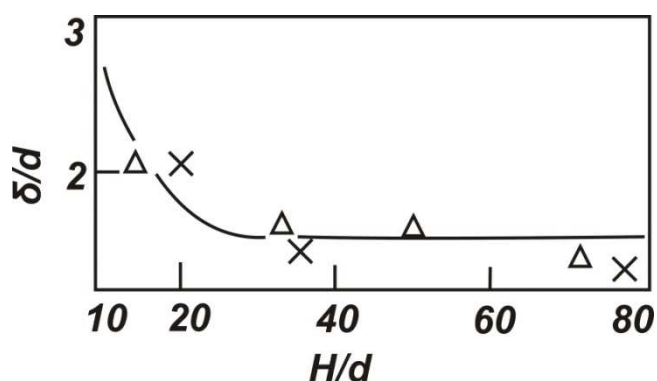


Рис. 4.29 Зависимость $\delta/d = f(H/d)$ по результатам опытов с шарами $d=6$ мм в аппарате $D=94$ мм: Δ — $\bar{W} = 1.3$ м/с; \times — $\bar{W} = 2.7$ м/с.

Рис. 4.29 иллюстрируется стабилизация ширины δ пристенного всплеска скорости, а рис. 4.30 — стабилизация высоты пристенного всплеска скорости $(\bar{W}_j)_{\max}^{np.3} / \bar{W}$ в аппаратах с НЗС с ростом относительной высоты слоя зерен H/d . Как следует из этих рисунков, характерный для НЗС пристенный всплеск скорости с ростом отношения H/d на участке стабилизации профиля скорости претерпевает следующие изменения: ширина и высота этого

всплеска уменьшаются до величин, соответствующих установившемуся течению [119]. Характер взаимного расположения кривых на рис. 4.30 (кривые с бóльшим D/d лежат выше) объясняется тем, что плотность упаковок зерен в пристенной и центральной частях в аппарате с бóльшим D/d различаются между собой в большей степени, чем в аппарате с меньшим D/d .

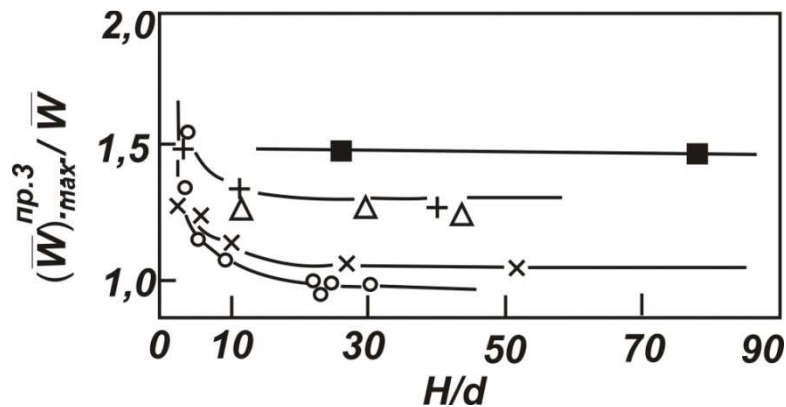


Рис. 4.30 Зависимость $(\bar{W}_j)_{\max}^{\text{пр.3}} / \bar{W} = f(H/D)$: наши данные: (аппарат $D = 94$ мм. шары) \circ - $d = 14,5$ мм, $D/d = 6,5$; Δ — $d = 9,5$ мм, $D/d = 9,9$; данные работы [22] в нашей обработке; \times - $D = 100$ мм, $d = 4$ мм (дробь). $D/d = 25$; +. — $D = 200$ мм. $D = 5-6$ мм (шары), $D/d = 36,4$; \blacksquare — $D = 400$ мм, $d = 5-6$ мм (шары). $D/d = 72,8$.

Что касается влияния средней скорости газового тока \bar{W} в аппарате с НЗС на величину участка гидродинамической стабилизации, то результаты проведенных экспериментов показывают, что в исследованном диапазоне скоростей потока оно незначительно. В частности кривая 1 на рис. 4.31 вполне удовлетворительно обобщает опытные точки, полученные для шаров $d = 6$ мм ($D/d = 15,7$) в диапазоне $H/d = 20-70$ при средней скор газа от 0,45 до 2,1 м/с, а кривая 2 — опытные точки, полученные для шаров $d = 14,5$ мм ($D/d = 6,5$) в диапазоне $H/d = 1-9$ при скорости газа от 0,6 до 3,0 м/с.

Отсутствие влияния скорости газового потока свидетельствует о том, что высота участка гидродинамической стабилизации в основном определяется высотой участка формирования структуры укладки зерен в слое.

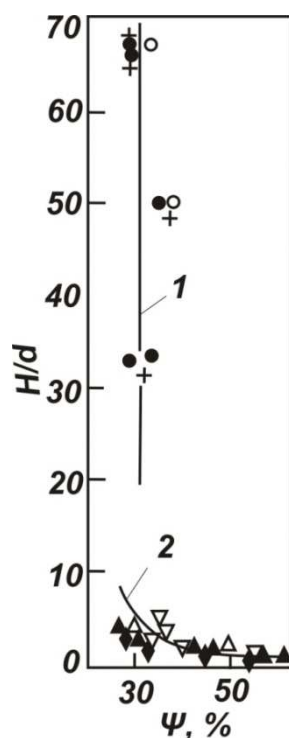


Рис. 4.31 Влияние средней скорости газового потока на зависимость $\psi = f(H/d)$ в аппарате

$D=94$ мм: шары, $d=6$ мм, $D/d=15,7$: \circ — $\bar{w}=0,45$ м/с, \bullet - $\bar{w}=1,0$ м/с. + - $\bar{w}=2,1$ м/с шары.

$d=14,5$ мм, $D/d=6,5$: Δ — $\bar{w}=0,6$ м/с, \blacktriangle - 1,2, ∇ - 2,1, \blacklozenge - $\bar{w}=3,0$ м/с,

Результаты проведенных исследований подтверждают выводы анализа условий стабилизации профиля скорости на входе газового потока в НЗС на основе упрощенной модели НЗС с учетом особенностей последнего.

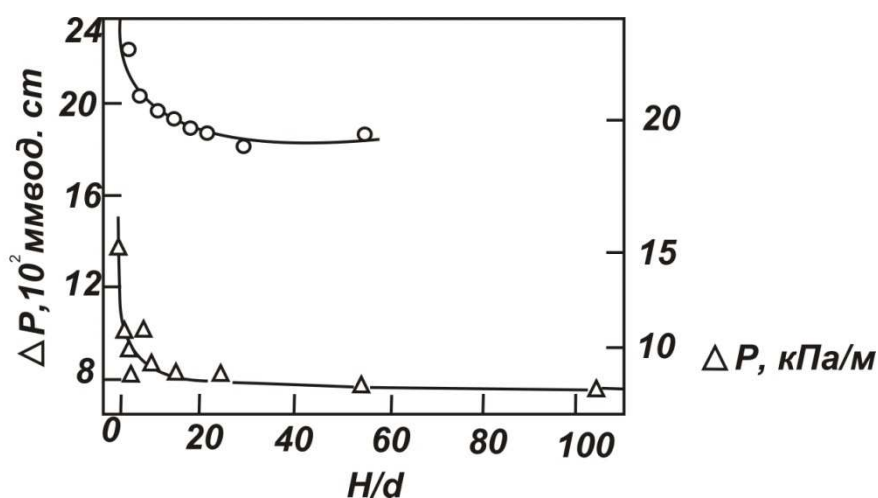


Рис. 4.32 Зависимость $\Delta P = f(H/d)$ по результатам опытов в аппарате $D=94$ мм: \circ – шары, $d=6$ мм. $\bar{w}=2,7$ м/с; Δ — шары, $d=4$ мм. $\bar{w}=1,0$ м/с.

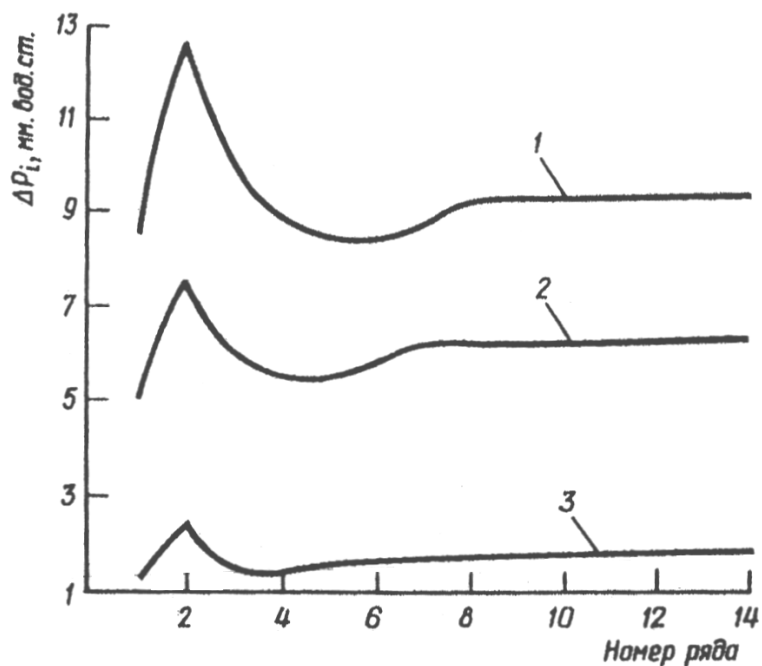


Рис. 4.33 Динамика изменения величины потери напора по рядам НЗС при различных значениях Re_3 : 1 – 2220; 2 – 1860; 3 – 920.

Стабилизация потери напора в насадочном слое изучалась в [397,398]. Результаты представлены на рис. 4.32. А также в [399]. В этой работе измерялась потеря напора по отдельным рядам насадочного слоя – ΔP_i . Было установлено (рис. 4.33), что максимум ΔP_i соответствует второму ряду насадочных элементов для диапазона $Re_3 = 920 \div 2200$. Далее наблюдается минимум в 4÷5 ряду. После 20 ряда значения ΔP_i остаются приблизительно постоянными.

Таким образом, участки стабилизации структуры насадочного слоя, профиля скоростей и потери напора практически совпадают и находятся в пределах $H/d=20 \div 30$.

На входном участке газа в насадочный слой одновременно с гидродинамической имеет место и тепловая стабилизация, т.е. стабилизация эффективности теплопереноса. Как в пустом канале, так и в насадочном слое, независимо от гидродинамического режима, интенсивность теплоотдачи на входном участке всегда значительно выше, чем на остальной части аппарата. Объясняется это тем, что вход в аппарат сопровождается обычно изменением

сечения канала и направления движения, местными завихрениями и другими факторами, способствующими дополнительной турбулизации потока. По мере его гидродинамической стабилизации значения коэффициентов теплоотдачи постепенно снижаются и достигают постоянного уровня, зависящего только от физических свойств и режима течения.

Исследования этого процесса весьма ограничены и большей частью проведены в аппаратах небольшого диаметра с насадочными телами шаровой формы при малых отношениях D/d [399,411,414,433,442]. На рис. 4.34 представлены зависимости значений коэффициентов теплоотдачи α от отношений высоты насадочного слоя к диаметру насадочного элемента [134]. Как и в случае пустого аппарата, значения α с ростом высоты слоя падают, причем, длина участка тепловой стабилизации в небольшой степени определяется гидравлическим режимом, т.е. значением числа Рейнольдса (рис. 4.34). Резкое изменение α наблюдается в пределах $L/d=4-10$. Установленный рост коэффициентов теплоотдачи с уменьшением L/d в присутствии насадки более значителен, чем в пустой трубе, что можно объяснить дополнительной турбулизацией потока и разрушением пограничного слоя.

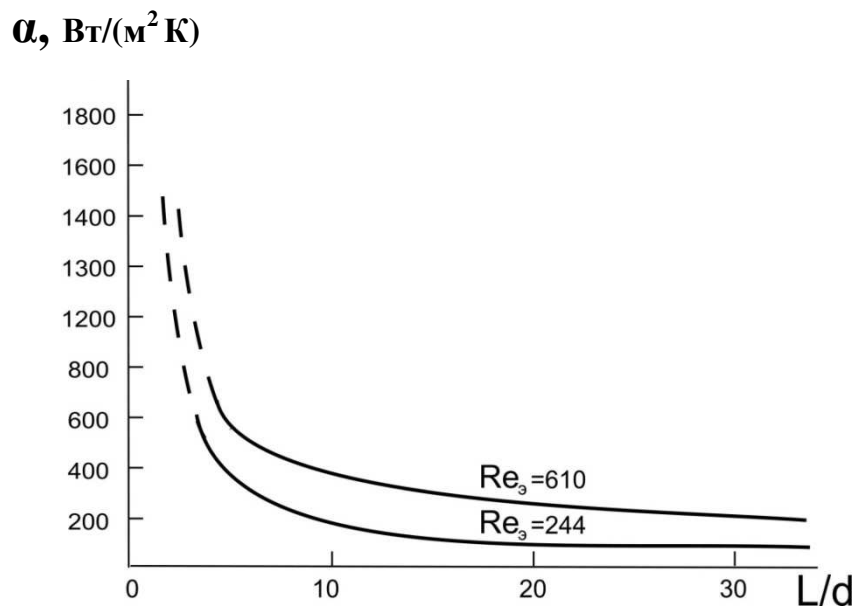


Рис. 4.34 Влияние отношения L/d на величину коэффициента теплоотдачи α при $Re_3 = \text{const}$ и $D/d = 6,6$.

Так, например, при $Re_3 = 610$ (см. рис. 4.34) в интервале $L/d=5-20$ среднее значение α составляет $\alpha \approx 450$. В то же время при $L/d > 20$ $\alpha \cong 250 = \text{const}$. То есть на участке стабилизации значения α в 1,8 раза выше. При $Re_3 = 450$ α на участке стабилизации в 2,5 раза выше.

Стабилизация конвективного переноса тепла при $Re_3 < 200$ наступает на участке с соотношением $L/d \approx 30$, а в случае $Re_3 > 200$ при $L/d \approx 20-25$ [134], что хорошо согласуется с результатами обработки [433] экспериментальных данных [442].

Характерно, что как установлено в [134], при $Re = \text{const}$, отношения D/d практически не влияют на конечную длину участка тепловой стабилизации.

Сказанное выше свидетельствует о том, что в насадочных аппаратах участки гидродинамической и тепловой стабилизации весьма близки. Это представляется закономерным. Поскольку на них воздействуют одни и те же факторы.

4.2.6. Масштабный фактор в насадочных слоях

До последнего времени изучение и разработка нового технологического процесса обычно начиналось в лабораторных аппаратах уменьшенного масштаба, в которых гидродинамические условия почти всегда отличаются от реальных особенностей гидродинамики в аппаратах промышленного масштаба. Следовательно, возникала проблема переноса опытных данных, полученных на стадии лабораторных исследований, на промышленные аппараты. По этой причине ранее исследователи были вынуждены проводить работы в несколько последовательных стадий, включающих технологические испытания на [197,396]:

- лабораторной установке;
- пилотной установке;
- опытно-промышленной установке;
- промышленной установке.

Описанный путь решения проблемы масштабного перехода был связан с большими затратами времени и материальных средств.

Иной путь решения проблемы масштабирования аппаратов с зернистым слоем позволяет ограничиться исследованием лишь аэродинамики аппаратов различного размера. Основой нового альтернативного подхода являются теоретические положения, разработанные в [369,376] об определяющем влиянии аэродинамических особенностей аппаратов с зернистым слоем на основные технологические параметры процессов, осуществляемых в указанных аппаратах. Важное место при этом принадлежит изучению структуры зернистого слоя, которая собственно и определяет отмеченные особенности газораспределения в поперечном сечении этих аппаратов.

Для преодоления негативного явления, связанного с изменением масштаба при создании промышленных колонн, должны быть решены две главные задачи.

Первая и наиболее очевидная из них - сохранение в промышленных колоннах исходных условий для движения потоков жидкости и газа, имеющих место на опытной установке. Для этого требуется соблюдение, по крайней мере, следующих основных правил [369]:

* используемая модель должна представлять собой часть промышленного аппарата с сохранением размеров основных элементов, поскольку теория подобия при увеличении масштаба насадочных аппаратов «не работает» [369];

* критерий Re_T в модели и аппарате должен быть одинаковым;

* плотность орошения и распределение орошающей жидкости должны быть одинаковыми;

* распределение газа должно быть одинаково;

* размеры модели должны быть таковыми, чтобы исключить заметное влияние стенок аппарата, а также концевых эффектов (участков у входа и выхода жидкости и газа).

Эти положения сводят испытания на модели по существу к необходимости испытания элемента промышленного аппарата, а сама крупномасштабная промышленная колонна должна рассматриваться, как мультиколонна, состоящая из ячеек, сравнимых по масштабу с опытной колонной. В каждой из этих ячеек будет воспроизводиться характер движения потоков и их перемешивание, наблюдаемое на модели.

Решение второй задачи связано с возникающим при переходе от опытных и, тем более, лабораторных установок, к промышленным аппаратам масштабным эффектом, который носит гидродинамический характер. Он заключается в увеличении неравномерности потоков жидкости и газа и соотношения фаз по сечению аппарата, а также в возникновении других гидродинамических неоднородностей и, в первую очередь, в усилении продольного перемешивания при увеличении размеров аппарата, определяющих масштаб турбулентности или возникающих циркуляционных контуров [367,369].

Решения этой задачи, а также сведение к минимуму других гидродинамических факторов, негативно влияющих на эффективность массопереноса, можно достигнуть, обеспечив путем конструктивных мер уменьшение гидродинамических неоднородностей. Для этого, исходя из приближенной теории масштабного эффекта при осуществлении гидродинамического моделирования [369], необходимо использовать следующие практические рекомендации:

1. Выравнивание поля скоростей на входе в аппарат с помощью распределителей фаз: использование диффузоров и других устройств, обеспечивающих равномерное распределение потоков.
2. Поскольку распределяющая способность насадки невелика [378], многоточечные распределители жидкости необходимы уже при умеренном диаметре аппаратов.
3. Конструкция распределительных устройств должна исключать контакты жидкости и газа в над и подслоном пространстве.

4. Насадка должна быть разделена на отдельные слои с разрывом между ними для снижения масштаба турбулентности, обуславливающего интенсивность продольного перемешивания.
5. Работа на интенсивных режимах, при которых возрастающее поперечное перемешивание снижает негативное влияние продольного перемешивания на эффективность.
6. Разбивка насадки на слои с целью ограничения возможной длины каналов для байпасов. В разрыве между слоями насадки сплошная фаза перемешивается, и вредное влияние байпаса нейтрализуется. Для ректификационных колонн, как оптимальная, рекомендуется высота слоя $3 \div 4$ [378].
7. Для улучшения полноты перемешивания байпасирующей части потока с основным в разрыве между слоями можно применять перераспределитель — тарелки, создающие вращательное движение потоков. Использование подобных тарелок является одним из способов усиления полезного поперечного перемешивания.
8. С целью улучшения распределения жидкости по высоте насадочного слоя необходимо ее перераспределение. Конструктивно перераспределительные устройства могут быть совмещены с опорными решетками.
9. Для уменьшения возможности образования байпасных каналов в насадке при загрузке нерегулярной насадки должна быть обеспечена равномерность ее упаковки.
10. Для предотвращения возможности образования байпасных каналов при разрыхлении насадки необходимо фиксирование слоя прижимными решетками.
11. Необходима оптимизация интенсифицирующего массоперенос движения потоков, обеспечивающего минимальное значение VEP/w_m .
12. Наконец, в том случае, если найти причину отрицательного воздействия масштабного эффекта не удастся, может быть

рекомендовано применение полного продольного секционирования, когда противоточный аппарат выполняется в виде системы параллельно работающих высокоэффективных колонн малого диаметра. По такому принципу работает, например, колонна Куна с мелкой насадкой для разделения изотопов [369]. Однако такие устройства эффективны лишь при условии равномерного распределения фаз в каждую ячейку. Конструкция колонны при этом соответствующим образом усложняется.

Таким образом, только сохранение в промышленной колонне структуры насадочного слоя, газораспределения в нем, распределения и перемешивания потоков, имеющих место на опытной установке, могут обеспечить приближение и, в лучшем случае, сохранение эффективности достигнутой в результате экспериментов.

Теоретический подход к решению проблемы масштабного перехода рассмотрен в работах [197-199] и назван сопряженным физическим и математическим моделированием.

4.3. Массообменные процессы

4.3.1. Процесс переноса вещества

Процесс массообмена – это переход одного или нескольких компонентов смеси из одной фазы в другую. При этом смесь может быть бинарной или многокомпонентной. В процессах, где используются насадочные контактные устройства, имеют место переходы из газовой (паровой) фазы в жидкую – абсорбция, ректификация (обогащение жидкости тяжелолетучим компонентом), из жидкой в паровую (газовую) – десорбция, ректификация (обогащение паров легколетучим компонентом). Вариант массообмена, характерный для абсорбции, когда в процессе массообмена осуществляется переход только из одной фазы в другую, носит название

«одностороннего». Как это видно, для ректификации характерен «двухсторонний» вариант массообмена, когда существует встречный переход вещества из одной фазы в другую.

Процесс переноса вещества из одной фазы в другую схематично можно представить себе следующим образом (см. рис. 4.35).

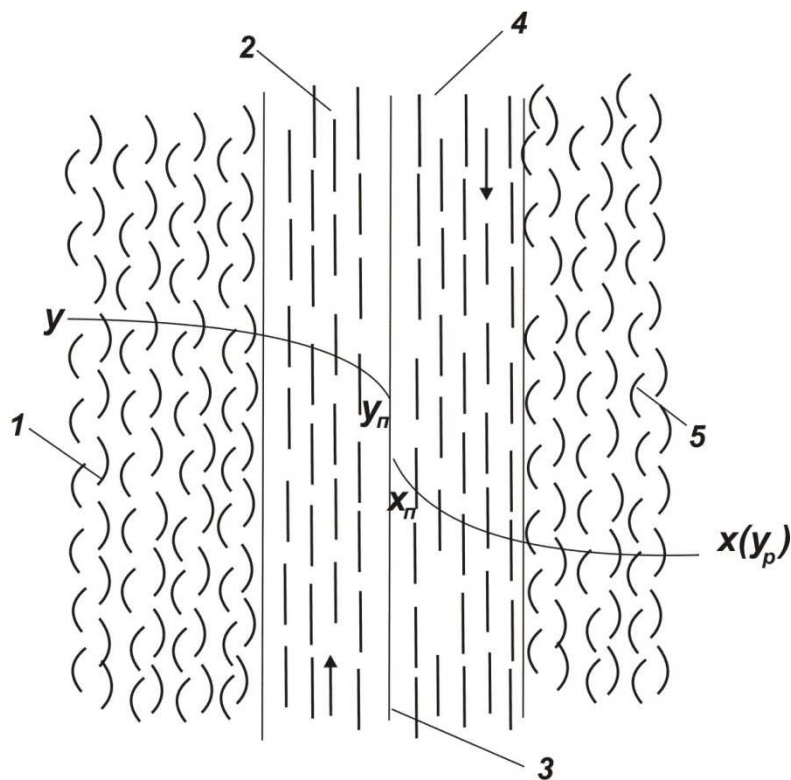


Рис. 4.35 Схема массообмена между газом и жидкостью:

- 1 – ядро газового потока; 2 – пограничный слой газового потока;
- 3 – поверхность раздела фаз;
- 4 – пограничный слой потока жидкости; 5 – ядро потока жидкости.

Концентрация распределяемого вещества в фазе G (газе) выше равновесной и вещество переходит из фазы G в фазу L (жидкость). В фазе G вещество переносится к поверхности раздела с изменением концентрации от y до y_n . В фазе L концентрация меняется от x_n до x . При установившемся процессе на границе раздела фаз наблюдается равновесие, т.е. концентрации y_n и x_n являются равновесными, поскольку считают, что сопротивление переходу вещества на границе раздела фаз отсутствует.

Перенос вещества в обеих фазах осуществляется путем молекулярной и турбулентной диффузии. В основной массе фазы (ядре) происходит

интенсивное перемешивание, и перенос осуществляется, главным образом, путем турбулентной диффузии, а поэтому более интенсивно. Вследствие этого концентрация распределяемого вещества в ядре изменяется незначительно. В пограничном слое влияние турбулентной диффузии затухает, возрастает роль молекулярной диффузии, интенсивность массопереноса ослабевает и, как следствие, резко изменяется концентрация вещества.

Молекулярная диффузия является переносом вещества вследствие беспорядочного движения молекул. Ее интенсивность в газе практически не зависит от концентрации газа и увеличивается с повышением температуры и понижением давления. Коэффициенты диффузии газа в жидкости по порядку величин в 10000 раз меньше, чем коэффициенты диффузии в газе. Они также увеличиваются с ростом температуры, зависят от вязкости растворителя и концентрации растворенного газа. Величина коэффициента диффузии является индивидуальным свойством каждого вещества. Она не поддается точному теоретическому расчету и определяется опытным путем. Коэффициенты диффузии могут быть вычислены по эмпирическим формулам [443,127,129,189].

При турбулентной диффузии перенос вещества в направлении перпендикулярном основному потоку происходит в основном за счет перемещения макроскопических элементов жидкости (вихрей) – турбулентных пульсаций. Более подробно о переносе вещества диффузией и моделях механизма переноса см. в [129,126,178,263,392].

Движущей силой процесса переноса массы является разность концентраций переходящего вещества между его рабочей концентрацией в одной из фаз и его равновесной концентрацией. В данном случае (рис. 4.35) – это $\Delta u = u - u_p$. Если эта разность положительна, вещество передается из фазы G к границе раздела фаз, а если она отрицательна, то в обратном направлении. В отсутствие сопротивления у поверхности раздела фаз общее сопротивление

процессу складывается из сопротивлений каждой из фаз, т.е. существует аддитивность фазовых сопротивлений.

Очевидно, что величина Δu зависит от физико-химических свойств веществ, участвующих в массообмене, от параметров процесса – температуры и давления, а также от схемы относительного движения потоков (противоток, прямоток, перекрестный ток и т.д.).

4.3.2. Массообменные характеристики

Непосредственное измерение толщины пленок по обеим сторонам межфазной поверхности – δ_{Γ} и – $\delta_{жс}$ до сих пор не возможно и не поддаются измерению равновесные концентрации y_{II} и x_{II} у поверхности раздела фаз, поэтому для нахождения скорости перехода вещества из одной фазы к межфазной поверхности и от последней в другую фазу прибегают к эксперименту, базируясь при обобщении опытных данных по аналогии с конвективным теплообменом на уравнении:

$$M = \beta_{\Gamma}(y - y_{II})F = \beta_{жс}(x_{II} - x)F. \quad (4.31)$$

По уравнению (4.31) количество переходящего вещества M в пределах каждой фазы в единицу времени пропорционально величине межфазной поверхности F и разности концентраций на этой поверхности и в основной массе данной фазы. Коэффициенты β_{Γ} и $\beta_{жс}$, выражающие количество вещества, переходящего из одной фазы в другую в единицу времени через 1 м² межфазной поверхности при движущей силе равной единице ($y - y_{II} = 1$ или $x_{II} - x = 1$) называются коэффициентами массоотдачи. Их размерность зависит от выбранных единиц. Для упомянутых выше размерностей y и x – кг/кг, размерность β_{Γ} и $\beta_{жс}$ – кг/м²·час (или сек).

Уравнение материального баланса с учетом аддитивности диффузионных сопротивлений:

$$M = K_{\Gamma}(y - y_P)F. \quad (4.32)$$

Здесь K_G – коэффициент массопередачи, отнесенный к газовой фазе, имеющий ту же размерность, что и коэффициенты массоотдачи, но характеризующий кинетику массообмена не в пределах одной фазы, а во всей рабочей системе.

Коэффициенты K_G , β_G и $\beta_{жс}$ связаны между собой уравнением аддитивности:

$$\frac{1}{K_G} = \frac{1}{\beta_G} + \frac{m}{\beta_{ж}}, \quad (4.33)$$

где m – среднее значение константы фазового равновесия.

Если коэффициент β_G велик, то $K_G \approx \beta_{жс} / m$ и сопротивлением в газе можно пренебречь. Если коэффициент $\beta_{жс}$ имеет большое значение, $K_G \approx \beta_G$ и можно пренебречь сопротивлением в жидкости.

В промышленных насадочных массообменных аппаратах между газами (парами) и жидкостями, особенно, когда одна из фаз находится в дисперсном состоянии, межфазная поверхность практически не поддается непосредственному измерению. В таких случаях часто пользуются объемными коэффициентами массоотдачи и массопередачи, выражающими количество вещества, переходящего за единицу времени в 1 м³ рабочего объема аппарата, при движущей силе процесса равной единице. Обозначив эти коэффициенты через K_{GV} , β_{GV} и $\beta_{жсV}$ и рабочий объем аппарата через $V_{сл}$ получим следующие уравнения массопередачи:

$$M = \beta_{GV}(y - y_{II}) V_{сл} = \beta_{жсV}(x_{II} - x) V_{сл} = K_{GV}(y - y_P) V_{сл}. \quad (4.34)$$

Движущая сила массопереноса – разность концентраций $y - y_P$ – непрерывно изменяется вдоль межфазной поверхности (рис. 3.9), поскольку непрерывно и постоянно изменяются сами концентрации y и x . Для анализа и расчета процессов массообмена необходимо знать среднюю движущую силу или среднюю разность концентраций $\Delta u_{ср}$. Она может быть рассчитана по уравнению:

$$\Delta y_{cd} = \frac{\Delta y_1 - \Delta y_2}{2,31g \frac{\Delta y_1}{\Delta y_2}} = \frac{(y_1 - y_{1p}) - (y_2 - y_{2p})}{2,31g \frac{y_1 - y_{1p}}{y_2 - y_{2p}}}. \quad (4.35)$$

Это уравнение аналогично уравнению для средней разности температур в процессах теплообмена и пригодно для противоточного и прямоточного движения фаз. Здесь Δy_1 – разность концентраций, y_1 и y_{1p} – концентрации переходящего компонента на входе в аппарат; Δy_2 , y_2 и y_{2p} – то же на выходе из аппарата.

Важной характеристикой эффективности массопереноса в насадочном слое является высота единицы переноса или ВЕП. По своему физическому смыслу ВЕП представляет собой высоту участка слоя насадки, соответствующего одной единице переноса:

$$h_E = \frac{G}{KSf}, \quad (4.36)$$

где f – удельная поверхность соприкосновения фаз, $\text{м}^2/\text{м}^3$, остальные обозначения прежние (G , $\text{кг}/\text{с}$; K , $\text{кг}/\text{м}^2 \cdot \text{с}$; S , м^2).

Единица переноса – участок по высоте слоя, на котором изменение рабочих концентраций ($y' - y''$) равно средней движущей силе на этом участке – $(y' - y'')_{0,5} - y_p$ (см. рис. 4.37).

Если известно число единиц переноса, представляющих собой число изменений рабочих концентраций, приходящихся на единицу движущей силы:

$$N_E = \frac{y_1 - y_2}{\Delta y_{cd}} \quad (4.37)$$

то рабочая высота насадочного слоя:

$$H = N_E h_E. \quad (4.38)$$

На коэффициенты массоотдачи, массопередачи и ВЕП оказывают влияние различные факторы: гидродинамические, геометрические и физико-химические. Особенно велико влияние гидродинамических факторов. В зависимости от типа аппарата и гидродинамического режима значения K и β пропорциональны скорости потока в степени от 0,3 до 1,0. Геометрические

факторы, такие, как размер насадки, оказывают меньшее, но достаточно существенное влияние.

В соответствии с представлениями о механизме переноса вещества направление массопереноса (из фазы к границе раздела или в обратном направлении) не влияет на коэффициент массоотдачи. Поэтому можно ожидать, что значения K для процессов абсорбции и десорбции будут одинаковыми.

Как известно, в процессе ректификации поднимающиеся пары контактируют с менее нагретой жидкостью, конденсируются, вызывая частичное испарение жидкости за счет выделившегося тепла конденсации. В идеальном случае температура жидкости и пара при их контакте на каждой ступени выравниваются, составы обеих фаз становятся равновесными, низкокипящий компонент (более летучий) диффундирует из жидкости в пар, а высококипящий из пара в жидкость. Такой однократный контакт жидкости и пара, завершающийся достижением фазового равновесия называется равновесной ступенью или теоретической тарелкой. Достижимое при этом обогащение пара низкокипящим компонентом является максимально возможным и равно u_P -у (рис. 4.36).

В реальных аппаратах вследствие кратковременного и несовершенного контакта пара и жидкости фазовое равновесие на тарелке не достигается, поэтому действительное обогащение u_d -у всегда меньше теоретического, т.е. u_d -у < u_P -у. Следовательно, для достижения заданной степени разделения смеси действительное число тарелок – N должно быть больше теоретического числа тарелок – N_T . Их отношение N_T/N является коэффициентом полезного действия КПД ректификационной колонны с контактными элементами данной конструкции. Знание КПД дает возможность определить необходимое для разделения число тарелок.

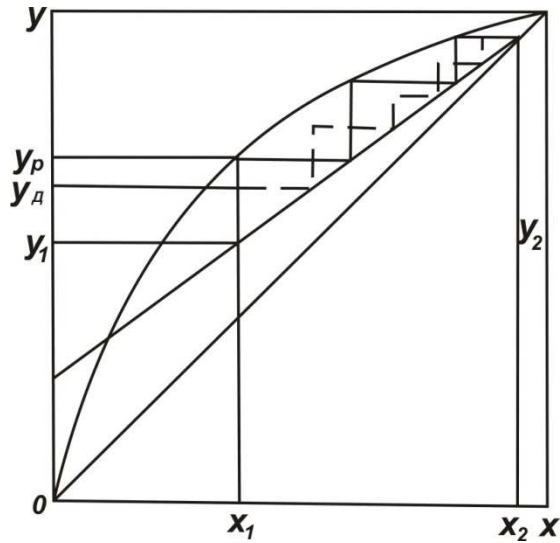


Рис. 4.36 К расчету действительного числа ректификационных тарелок:
Графическое определение числа теоретических (сплошные линии) и
действительных (пунктирные линии) тарелок.

Эффективность насадочных контактных устройств в процессе ректификации характеризуется высотой слоя насадки, эквивалентной одной теоретической тарелке или $VЭТТ = H/N_T$. ВЭТТ по своему физическому смыслу совпадает с высотой эквивалентной теоретической ступени ВЭТС. Знание ВЭТТ или ВЭТС необходимо для расчета высоты слоя насадки в насадочной ректификационной колонне.

ГЛАВА 5

ВЛИЯНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК НАСАДКИ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПЕРЕНОСА И ПОТЕРЮ НАПОРА

5.1. Перепад давления

Все уравнения, приведенные в литературе, для определения перепада давления по газовой фазе в насадочных абсорбционных и ректификационных колоннах являются эмпирическими или полуэмпирическими.

Сопrotивление сухого насадочного слоя $\Delta P_{\text{сух}}$ высотой 1 метр равно [129,393]:

$$\Delta P_{\text{сух}} = \xi_{\text{сух}} \frac{1}{d_{\text{экв}}} \frac{\rho_{\text{г}} \left(\frac{W}{\epsilon_{\text{св}}} \right)^2}{2}, \quad (5.1)$$

где $\xi_{\text{сух}}$ – коэффициент гидравлического сопротивления; $d_{\text{экв}}$ – эквивалентный диаметр насадки, рассчитываемый по выражению $d_{\text{экв}} = \frac{4\epsilon_{\text{св}}}{a_{\text{v}}}$; W – скорость газа, отнесенная ко всему сечению колонны, м/с.

Коэффициент гидравлического сопротивления насадки определяется в зависимости от режима движения газа в насадочном слое:

$$\text{при } Re_{\text{г}} < 40, \quad \xi_{\text{сух}} = \frac{140}{Re_{\text{г}}}, \quad (5.2)$$

$$\text{при } Re_{\text{г}} > 40, \quad \xi_{\text{сух}} = \frac{16}{Re_{\text{г}}^{0,2}}, \quad (5.3)$$

где Re_{Γ} – критерий Рейнольдса, рассчитываемый по формуле $Re_{\Gamma} = \frac{4W\rho_{\Gamma}}{a_{\nu}\mu_{\Gamma}}$.

Выражения (5.2), (5.3) получены для беспорядочных кольцевых насадок.

Сопротивление орошаемого насадочного слоя высотой 1 метр [393]:

$$\Delta P_{ор} = \Delta P_{сух} 10^{bq}, \quad (5.4)$$

где b – эмпирический коэффициент, значения которого для различных типов насадок приведены в табл. 1.1.

Таблица 5.1

Зависимость коэффициента b от типа насадки

Тип насадки	Кольца Рашига 25 мм	Кольца Рашига 50 мм	Кольца Палля 50 мм	Седла Инталлокс 25 мм	Седла Инталлокс 50 мм	Седла Берля 25 мм
b	184	169	126	33	28	30

На рис. 5.1, 5.2 даны зависимости перепада давления от режимных параметров для колонн с различными типами насадок [293,294].

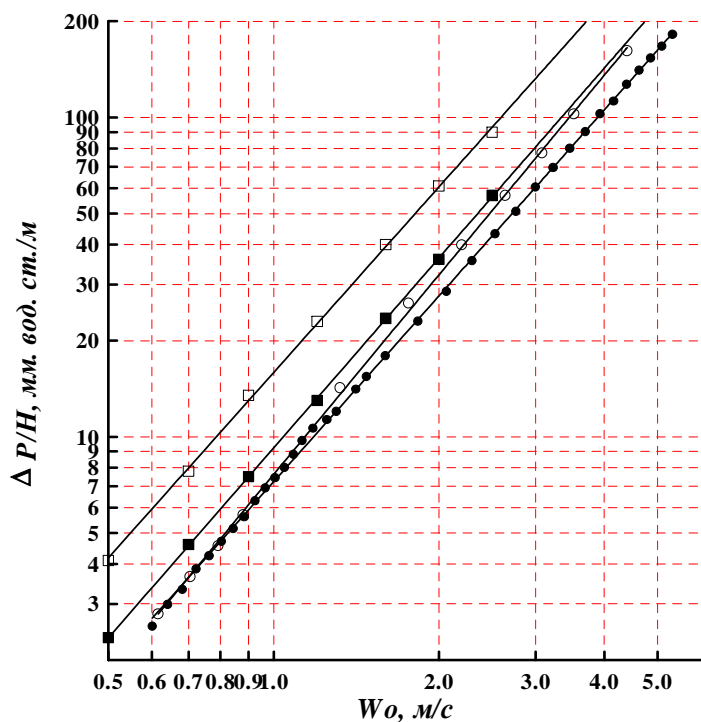


Рис. 5.1 Гидравлическое сопротивление слоя сухой насадки в зависимости от фактической скорости газа:
 ● – насадка «Инжехим-2000»,
 ○ – кольца Палля металлические 50×50 мм,
 ■ – кольца Палля полипропиленовые 50×50 мм,
 □ – металлические кольца Рашига 50×50 мм.

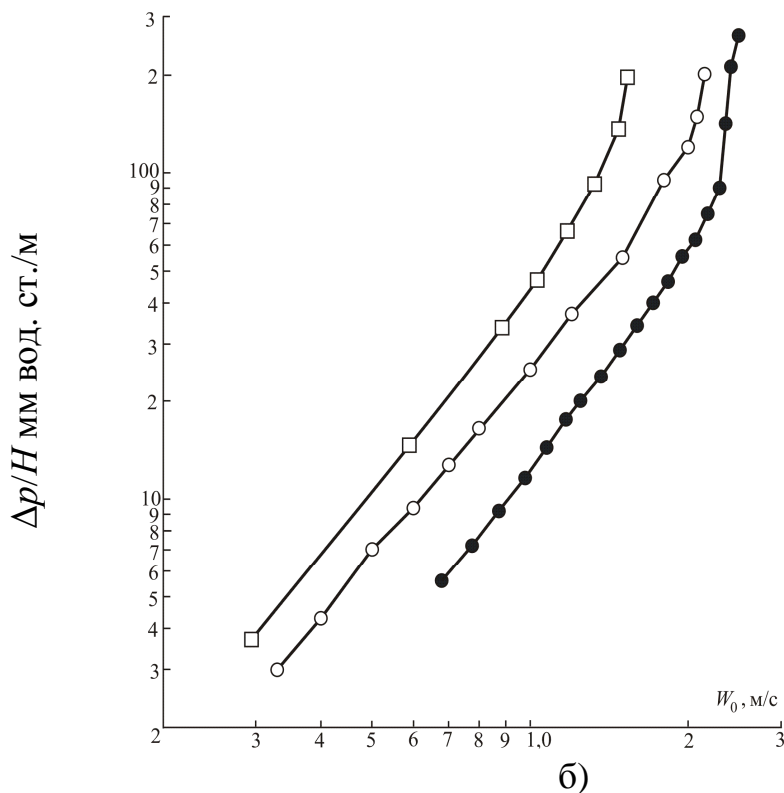
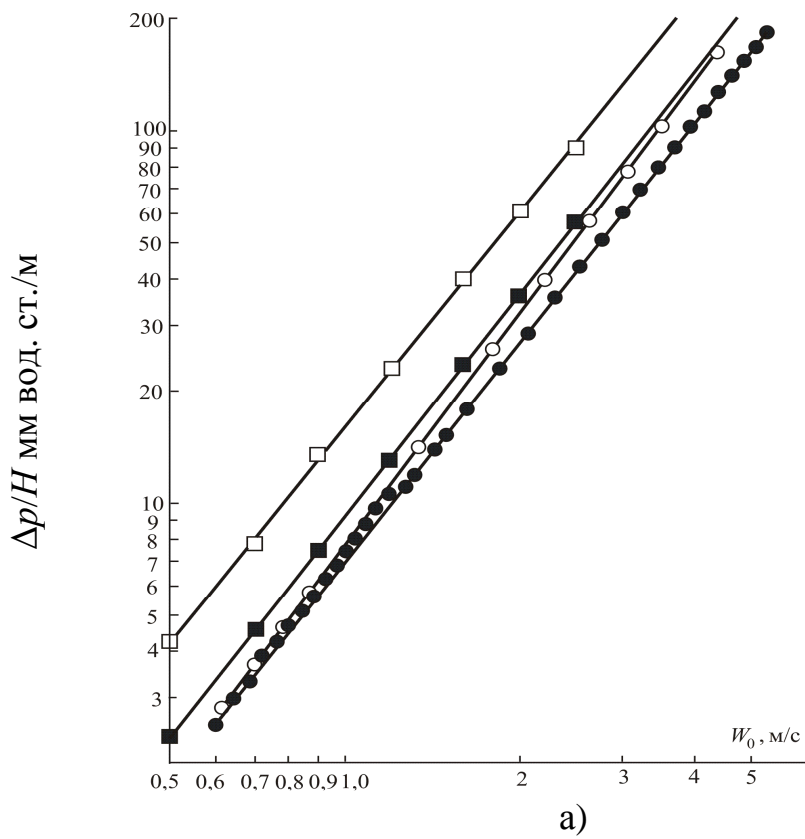


Рис. 5.2 Гидравлическое сопротивление слоя орошаемой насадки в зависимости от фиктивной скорости газа: а) плотность орошения $40 \text{ м}^3/\text{м}^2\cdot\text{ч}$; б) плотность орошения $80 \text{ м}^3/\text{м}^2\cdot\text{ч}$, ● – насадка «Инжехим-2000», ○ – кольца Bialecki металлические $50\times 50 \text{ мм}$, □ – кольца Рашига $50\times 50 \text{ мм}$.

Ниже даны формулы для расчета коэффициентов сопротивления сухих насадочных и зернистых слоев, состоящих из различных неупорядоченных элементов [138].

Элементы сферической формы с гладкой поверхностью ($Re < 2000$):

$$\xi = 4 \left(\frac{36,3}{Re} + 0,45 \right),$$

$$\xi = 4 \left(\frac{35,6}{Re} + \frac{1,03}{Re^{0,1}} \right),$$

$$\xi = 4 \left(\frac{40}{Re} + \frac{2,28}{Re^{0,5}} + 0,46 \right),$$

$$\xi = 4 \left(\frac{34}{Re} + \frac{3,65}{Re^{0,7}} + 0,385 \right)$$

При $Re > 2000$

$$\xi = 4 \left(\frac{1,09}{Re^{0,14}} \right).$$

Элементы из цилиндров (таблеток, гранул) и седлообразных насадок

$$\xi = 4 \left(\frac{37,6}{Re} + 0,585 \right).$$

Для колец рекомендуются зависимости (5.2), (5.3) и кроме этого формула [138] ($40 < Re < 4000$):

$$\xi = 4 \left(\frac{3,8}{Re^{0,2}} \right),$$

Для частиц нерегулярной формы

$$\xi = 4 \left(\frac{40}{Re} + 0,75 \right).$$

Как отмечается [138], приведенные выше расчетные формулы имеют невысокую точность ($\pm 20-35\%$).

5.2. Влияние размера насадочных элементов и их удельной поверхности

Удельная поверхность, во многом определяющая эффективность массопереноса, неотъемлемо связана с размером насадочных элементов.

На рис. 5.3 представлены данные $a = f(d)$ для металлических кольцевых насадок разной конструкции: колец Рашига, Палля и насадки ГИАП-НЗ. Как это видно, насадки одного размера имеют практически одинаковую удельную поверхность. Причем, кратность снижения величины a с ростом d близка. Так и при увеличении d от 20 мм до 40 мм величина a снижается в 1,8 раза. При увеличении d от 40 мм до 80 мм – в 2,0 раза.

На рис. 5.4 представлены зависимости гидравлического сопротивления упомянутых выше кольцевых насадок от их размера. Как это видно, хотя насадки разной конструкции одного размера имеют весьма близкие значения a (рис. 5.3), их величины ΔP сильно различаются между собой из-за различия в конструкции. Особенно высокое гидравлическое сопротивление имеют кольца Рашига, меньшие – кольца Палля и наименьшие – насадка ГИАП-НЗ. Из рис. 5.4 также следует вывод, что проследить какие-либо закономерности в зависимости $\Delta P = f(a)$ можно только по данным, полученным для насадки какой-либо одной конструкции.

Наиболее подробное исследование по влиянию размера насадки на ее технологические характеристики было выполнено применительно к насадке ГИАП-НЗ [3-6].

Представляется необходимым, прежде всего, кратко упомянуть о природе возникновения гидравлического сопротивления в насадочном слое.

Движение потока через зернистый или насадочный слой предпочтительно рассматривать, как движение между телами, заполняющими аппарат по множеству узких искривленных каналов переменного сечения и формы (внутренняя задача) [48].

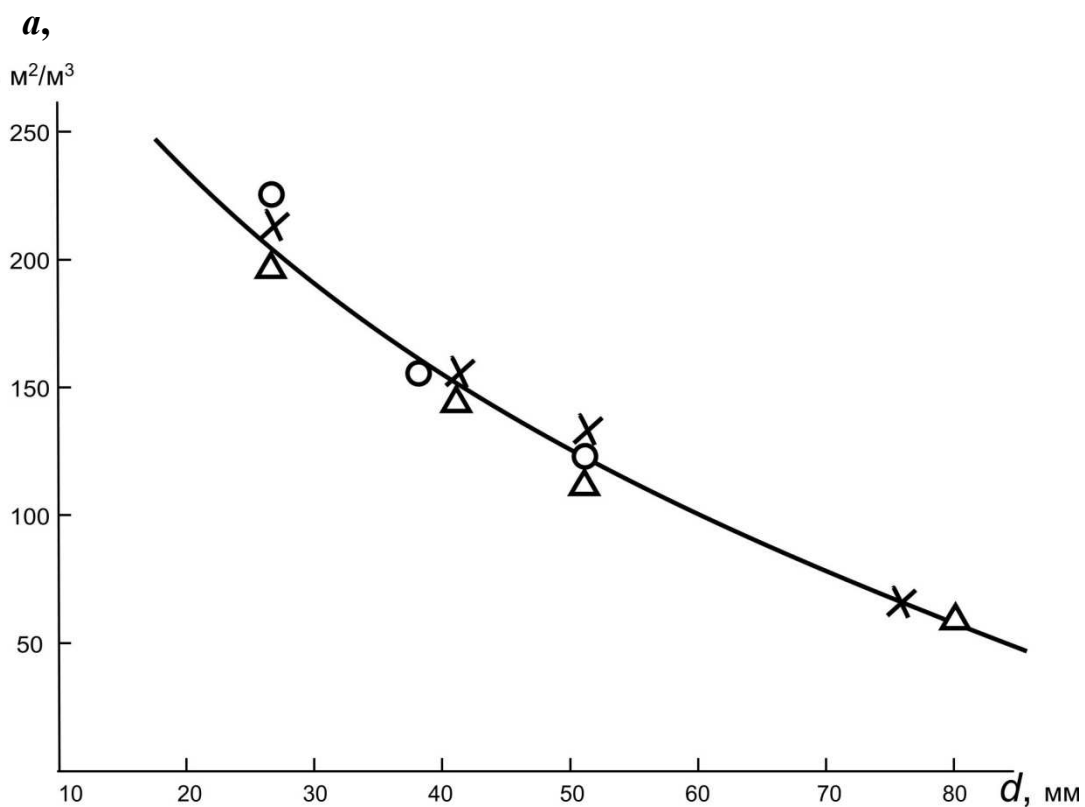


Рис. 5.3 Зависимость удельной поверхности от размера кольцевых насадок: Δ – насадка ГИАП-НЗ [1]; O – кольца Рашига; \times - кольца Палля [20].

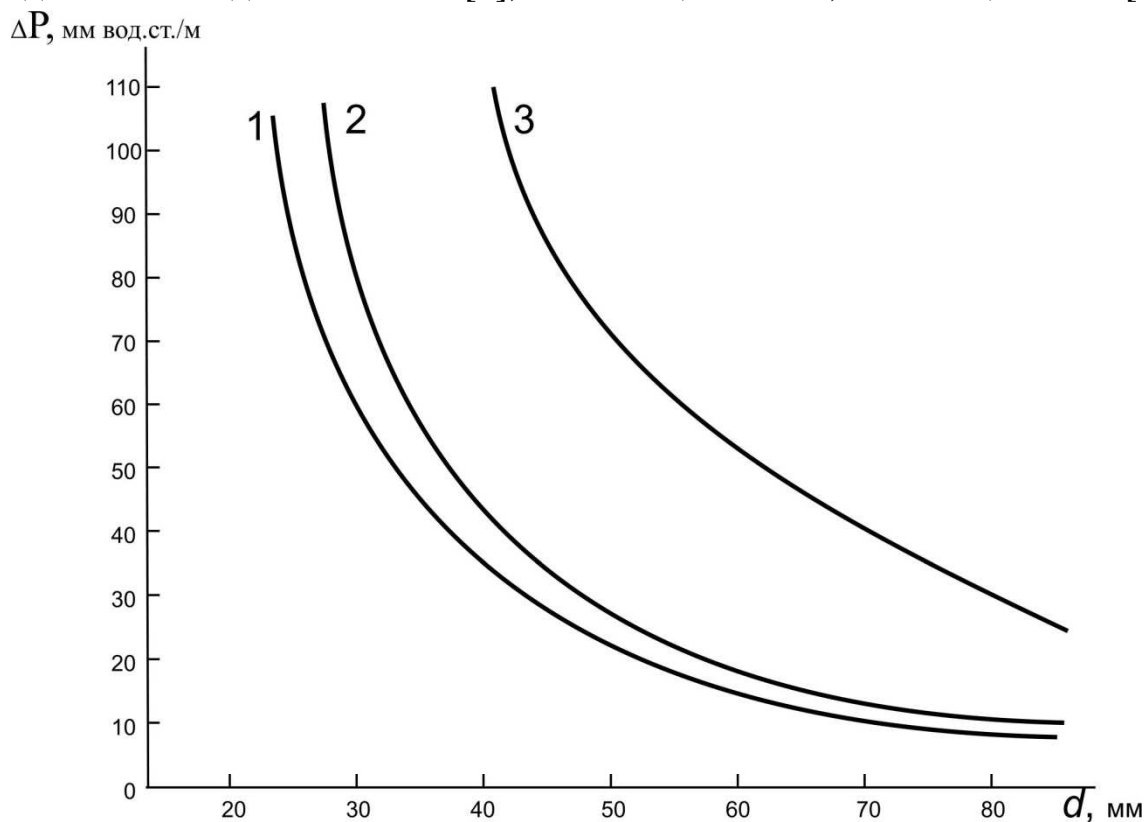


Рис. 5.4 Зависимость гидравлического сопротивления кольцевых насадок от их размера: 1 - насадка ГИАП-НЗ [6]; 2 - кольца Палля [20]; 3 - кольца Рашига [20]. $F_{\phi} = 1$, $L_{op} = 100 \text{ м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{час}$.

На основании экспериментальных исследований [74,83] было установлено, что верхней границей вязкостного течения в аппаратах, заполненных телами различной формы, является диапазон значений $Re_3 = 40 \div 60$, а нижней границей режима течения с преобладанием инерционных сил $Re_3 = 1200 \div 6000$.

Для аппаратов с насадочным слоем верхняя нагрузка по газу, как правило, не превышает значений $F=2.5$, чему соответствует $Re_3 = 2000$. Если в диапазоне значений $Re_3 < 60$ можно было ожидать прямо пропорциональной линейной зависимости $\Delta P = f(a)$, то за пределами $Re_3 = 60$ следует ожидать другой вид зависимости. Такого рода зависимость для насадки ГИАП-НЗ представлена на рис. 5.5.

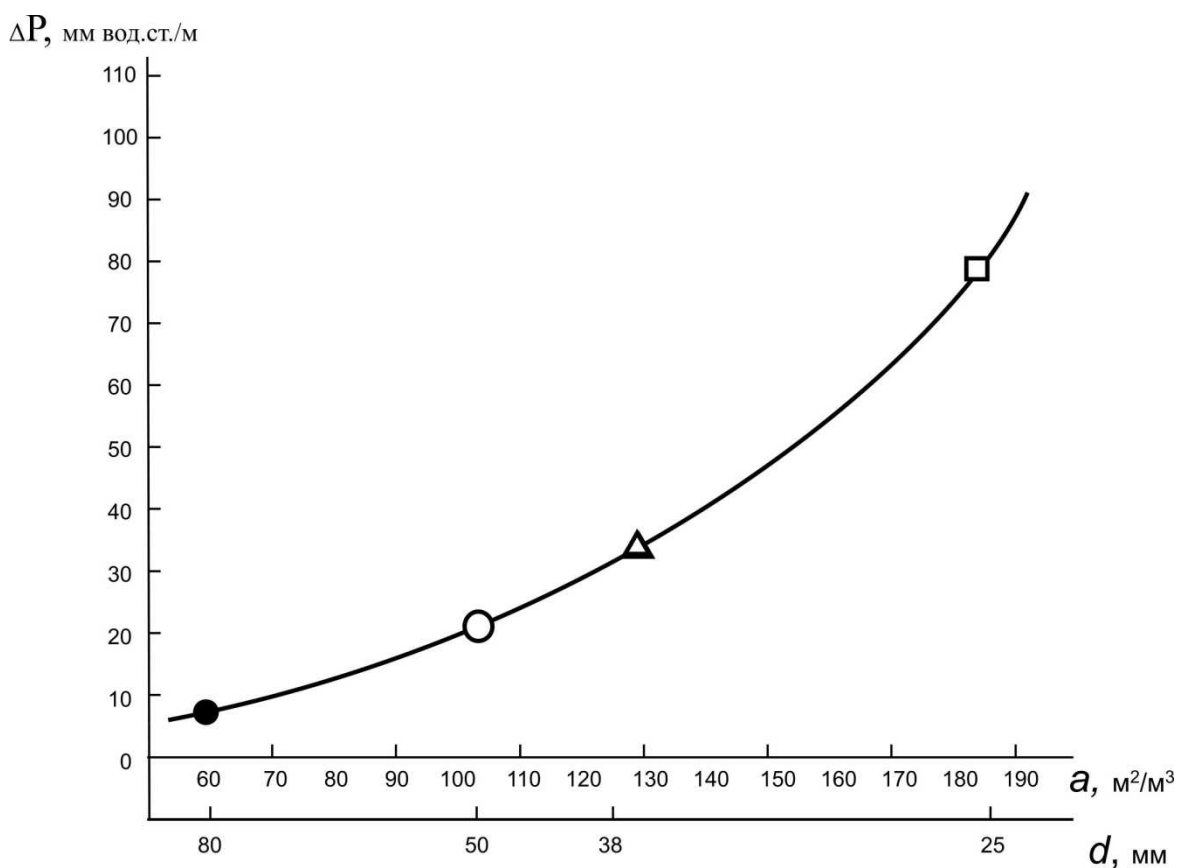


Рис. 5.5 Зависимость гидравлического сопротивления насадки ГИАП-НЗ от удельной поверхности при $F=1$, $L_{op} = 100 \text{ м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{час}$ [6]: ● – $d=80$ мм; ○ – $d=50$ мм; △ – $d=38$ мм; □ – $d=25$ мм.

Анализ этой кривой показывает, что при двукратном увеличении удельной поверхности от 60 до 120 м²/м³ ΔP увеличивается в 3,75 раза. В то же время двукратное увеличение *a* от 90 до 180 м²/м³ приводит к увеличению ΔP в 4,7 раза. Это свидетельствует о том, что со снижением размера насадки и увеличением ее удельной поверхности все в большей степени проявляется вклад инерционной составляющей. Одной из причин этому является все увеличивающееся число искривлений межнасадочных каналов, приходящееся на единицу высоты насадочного слоя.

Характеристики насадки ГИАП-НЗ, используемые нами для построения кривых на рис. 5.3 ÷ 5.5 приведены в таблице 5.1 [45].

Таблица 5.2

Характеристики насадки ГИАП-НЗ различного размера

Размер насадки, мм	Удельная поверхность, S _{уд.} , м ² /м ³	Доля свободного объема, ε, м ³ /м ³	Гидравлическое сопротивление в пленочном режиме, % (отн.)	Пропускная способность % (отн.)		Эффективность в пленочном режиме, β _{жа} , % (отн.)
				начало подвисяния W _п	начало захлебывания W _з	
25×25×0,5	185	0,96	600	61	52	201
38×38×0,8	127	0,96	322	79	69	159
50×50×1,0	101	0,96	188	89	79	136
80×80×1,5	60	0,96	100	100	100	100

В [10] используя зависимость $\epsilon u_m = f(Re_\epsilon)$, было получено уравнение для расчета $a = f(\Delta P)$ зернистых материалов неправильной формы

В [11] рассматривалась параллель между потерей напора и удельной поверхностью для насадок из полимерного материала.

Поскольку, как уже говорилось выше, в режиме течения, где преобладают вязкостные силы, ΔP определяется трением потока о

поверхность канала, нам представляется логичным установление зависимости $\Delta P = f(a)$ для насадок.

Для обобщения нами были использованы данные, взятые из [35,45,74,173,174,226,232,233,240,242]. В табл. 5.3 представлены опытные данные по потере напора сухих насадок с гладкой поверхностью кольцевой, полукольцевой и седловидной формы различной конструкции при нагрузке по газу $F_\phi = W_0 \sqrt{\rho_\Gamma} = 2,0$. Указанное значение F_ϕ было выбрано, поскольку оно практически является верхним пределом нагрузок по газу в насадочных аппаратах. Величине $F_\phi = 2,0$ соответствует $Re_3 \sim 2000$. Там же представлены некоторые характеристики насадок, в том числе значения доли свободного объема и удельной геометрической поверхности. Конструкции насадок см. в главе 3.

Опытные данные по ΔP сухой насадки для колец Палля и насадки ГИАП трех типоразмером получены нами [45,247,248] в ходе экспериментов с использованием воздуха в колоннах $D = 500$ мм при высоте насадочного слоя $H = 2400$ мм и $D = 900$ мм при $H = 3000$ мм. Одновременно производилось исследование и орошаемых насадок.

Результаты обобщения представлены на рис. 5.6. Были использованы не абсолютные, а относительные значения потери напора. Здесь на оси ординат: отношение гидравлического сопротивления насадки к гидравлическому сопротивлению металлических колец Палля - $\Delta P / \Delta P_{\text{Палля}}$, %. Таким образом, в качестве базисного для сравнения принято гидравлическое сопротивление наиболее распространенной в мировой промышленной практике – металлической насадки из колец Палля размером 50 мм. На оси абсцисс – удельная геометрическая поверхность насадок.

Таблица 5.3

Опытные и расчетные характеристики насадок кольцевой и седловидной формы различной конструкции с гладкой поверхностью [6,8-23]

Вид насадки	Материал	ε м ³ /м ³	S м ² /м ³	Опытные значения		Расчетные значения по уравнению (5.3)	
				ΔP , мм вод.ст. при $F_{\phi}=2,0$	$\Delta P/\Delta P_{кПалля}$ %	ΔP , мм вод.ст. при $F_{\phi}=2,0$	$\Delta P/\Delta P_{кПалля}$ %
Кольцевые							
Флексилинг 50 мм	металл	0,96	114,6	19,2	101	20,9	110
Белецкого 50 мм	металл	0,95	112,0	20,0	105,2	20,5	108
Палля 50 мм*)	металл	0,95	110,0	19,0	100	20,4	107
Рашига 50 мм	металл	0,95	110,0	19,5	103	20,4	107
Германия 50 мм	металл	0,97	106,0	20,0	105,2	18,8	99,0
Палля 50 мм	полимер	0,92	110,0	21,8	115	21,8	114,5
Ралу 50 мм	полимер	0,93	95,2	13,0	81,0	18,3	96,3
Хифлоу 50 мм	полимер	0,94	83,0	11,8	62,0	15,6	82,0
Полукольцевые							
ГИАП	металл	0,96	119	23,0	121,0	23,1	121

38мм*)							
ГИАП 50мм*)	металл	0,96	101	17,5	92,1	18,3	96,0
ГИАП 80мм*)	металл	0,96	60,0	11,0	57,9	10,8	67,0
Нуттер № 2	металл	0,98	95,0	12,7	67	16,5	86,8
Седлообразные							
Инталокс	полимер	0,89	126	34,2	180	26,2	138
Суперторус	полимер	0,94	114	26,6	137	21,6	114
Флексисайд Л	полимер	0,89	120	31,6	166	24,5	129
Хифлоу	полимер	0,94	86,4	13,0	71,0	16,2	85

*) Опытные данные авторов

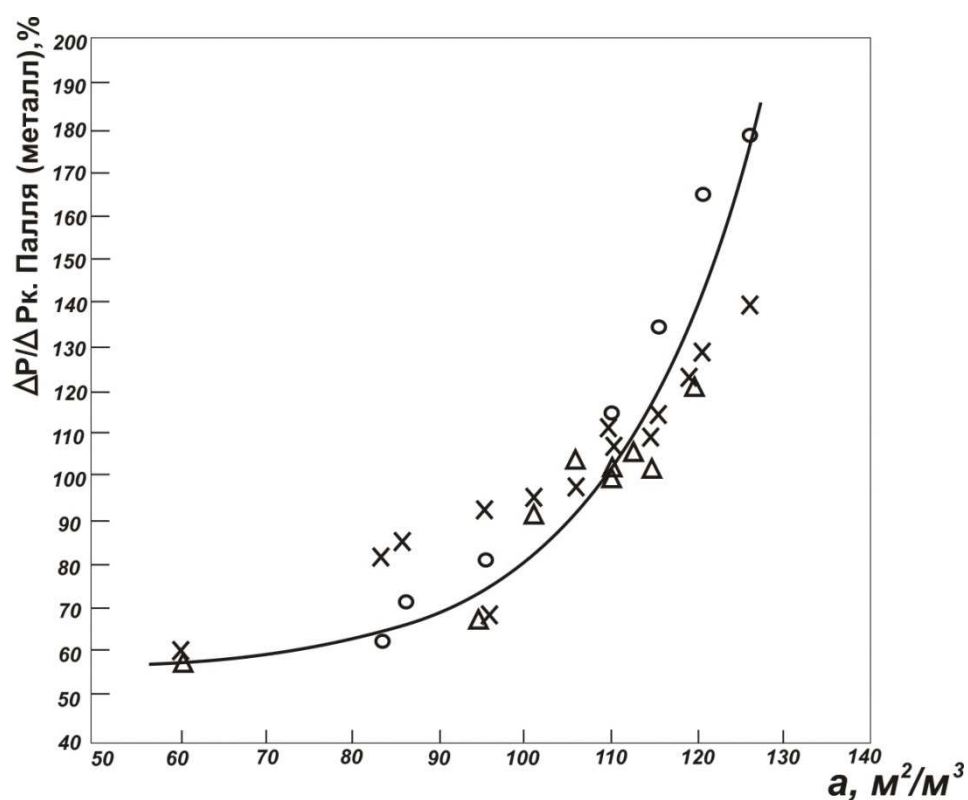


Рис. 5.6 Обобщенная зависимость насадок различной формы и размера:
 Δ – металлические насадки; O – насадки из полимерного материала.

Как это видно, большинство опытных точек обобщается кривой с отклонением не более $\pm 12\%$. Это свидетельствует о том, что при значениях Re_{ϕ} , соответствующих $F_{\phi} = 2,0$ еще в значительной степени преобладают вязкостные силы и влияние на ΔP формы насадок и их конструктивных особенностей, способствующих турбулизации потока, еще невелико.

Кривая на рис. 5.6 описывается уравнением:

$$\frac{\Delta P}{\Delta P_{к.Палля}} 100 = 0,009 a^{2,0}, \quad (5.4)$$

которое может быть использовано в диапазоне удельных поверхностей $S = 60 \div 125 \text{ м}^2/\text{м}^3$.

Как уже говорилось, для обобщения были использованы опытные данные, полученные при нагрузке $F_{\phi} = 2,0$. Однако расчеты показали, что если оперировать с относительными гидравлическими сопротивлениями, то кривая рис. 5.6 хорошо коррелирует опытные данные, полученные и при других нагрузках в диапазоне $F_{\phi} = 0,5 \div 2,0$, т.е. практически во всем диапазоне нагрузок по газу в промышленных насадочных колоннах. Поскольку она также коррелирует данные по насадкам различной формы и размера, можно констатировать, что она является своего рода универсальной.

Использование данной кривой, на наш взгляд, представляет практический интерес. Прежде всего для оценки ожидаемого ΔP насадок, для которых отсутствуют опытные данные. Это, в первую очередь, вновь создаваемые насадки, для которых известно только a . Используя знание их геометрической поверхности, по универсальной кривой можно получить сравнительную оценку с кольцами Палля, а при необходимости, используя затем кривую 1 на рис. 5.7 и численное значение ΔP сухой насадки.

Зависимость гидравлического сопротивления неорошаемой насадки из металлических колец Палля размером 50 мм $\Delta P = f(F_{\phi})$ описывается уравнением:

$$\Delta P = 4,9 \cdot F_{\phi}^{2,0}. \quad (5.6)$$

В [26] предлагается рассчитывать ΔP по упомянутому выше уравнению (2.13), предложенному в [10] для расчета удельной поверхности зернистых материалов по измеренному ΔP . После его преобразования относительно ΔP , применительно к насадочным слоям, оно принимает вид:

$$\Delta P = \frac{\left[\left(a + 18 \cdot 10^3 \frac{W_0}{v} \right)^2 - 324 \cdot 10^{-6} \frac{W_0^2}{v^2} \right] v H \gamma W_0}{0,09 g \epsilon^3}, \quad (5.7)$$

где ΔP , кг/м².

Результаты расчетов ΔP представлены в табл. 5.3, а также на рис. 5.6. Как это видно, расчетные значения ΔP преимущественно выше опытных. Их отклонения от кривой в основном находятся в пределах $\pm 20\%$.

Однако для некоторых насадок опытные и расчетные значения ΔP отличаются в большей степени. Это может быть следствием погрешностей в измерении их величин ϵ и особенно S , т.к. точное измерение удельной поверхности насадок хоть и правильной формы, но сложной конфигурации затруднительно. Это, например, седла Суперторус. Также это объясняется и тем, что гидродинамические исследования производились различными авторами с разной степенью погрешности измерений ΔP и других показателей.

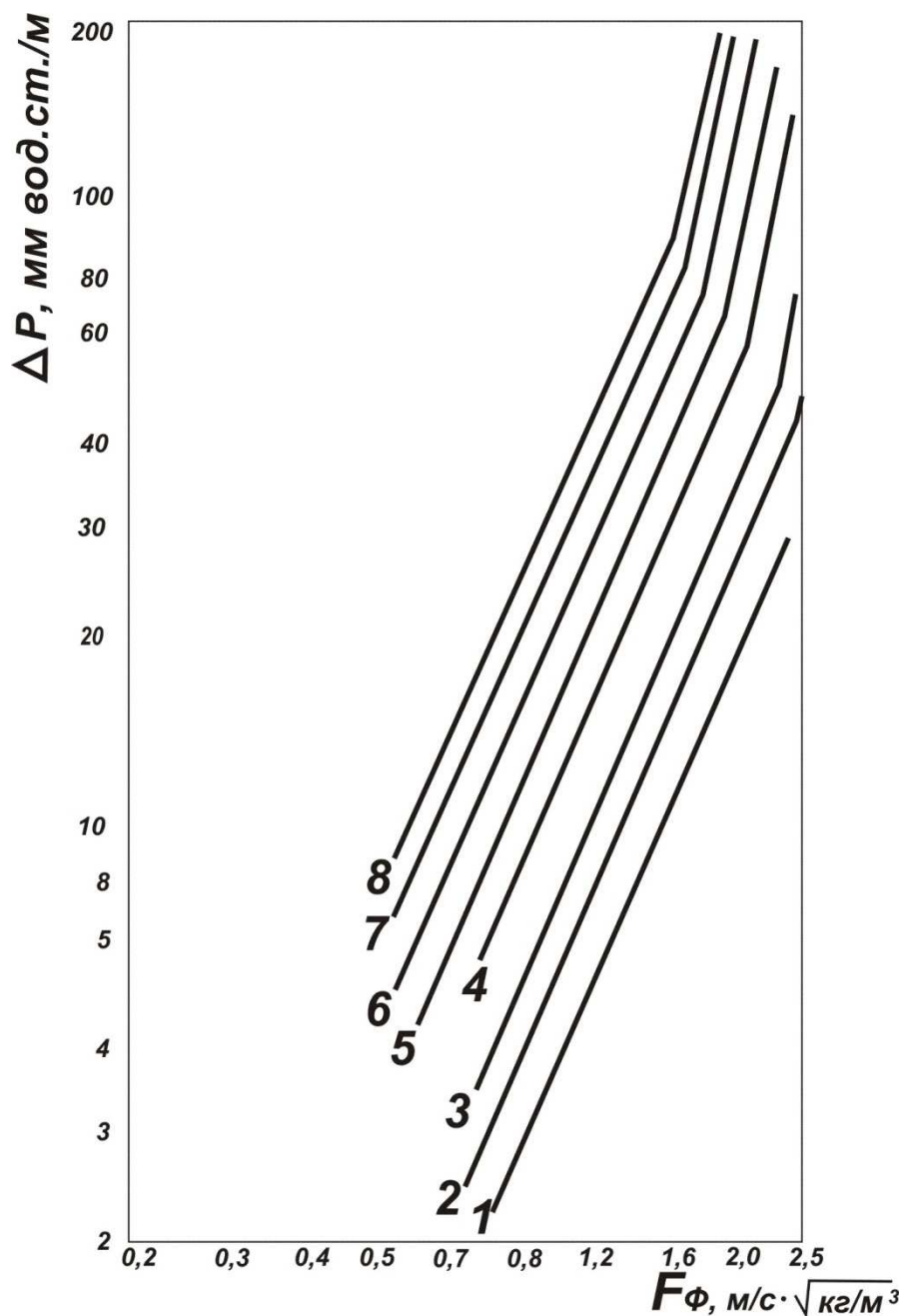


Рис. 5.7 Гидравлическое сопротивление колец Палля 50 мм, металл:
 1 – сухая насадка; 2 – $L_{оп} = 20 \text{ м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{час}$; 3 – $L_{оп} = 40$; 4 – $L_{оп} = 60$;
 5 – $L_{оп} = 80$; 6 – $L_{оп} = 100$; 7 – $L_{оп} = 120$; 8 – $L_{оп} = 135$.

Подставив $\Delta P_{к.Палля}$ из уравнения (5.6) в (5.5) и решая последнее относительно ΔP , получаем зависимость для расчета величины ΔP любой насадки, если известна ее удельная поверхность:

$$\Delta P = 4.4 \cdot 10^{-4} \cdot a^2 \cdot W_0^2 \cdot \gamma. \quad (5.8)$$

В уравнениях (5.5), (5.6) и (5.8) величина ΔP имеет размерность мм вод. ст.

Поскольку, как правило, чем выше сопротивление сухой насадки, тем выше и ΔP орошаемой насадки, для ориентировочной качественной оценки ΔP новой насадки при ее орошении, могут быть использованы кривые 2, 3 и т.д. рис. 5.7.

По кривым рис. 5.8, где представлены данные по эффективности металлических колец Палля размером 50 мм, можно также ориентировочно качественно оценить и возможности новой насадки по эффективности. На рис. 5.8 представлена зависимость объемного коэффициента массоотдачи $\beta_{жв} = f(F_\phi)$ при различных плотностях орошения.

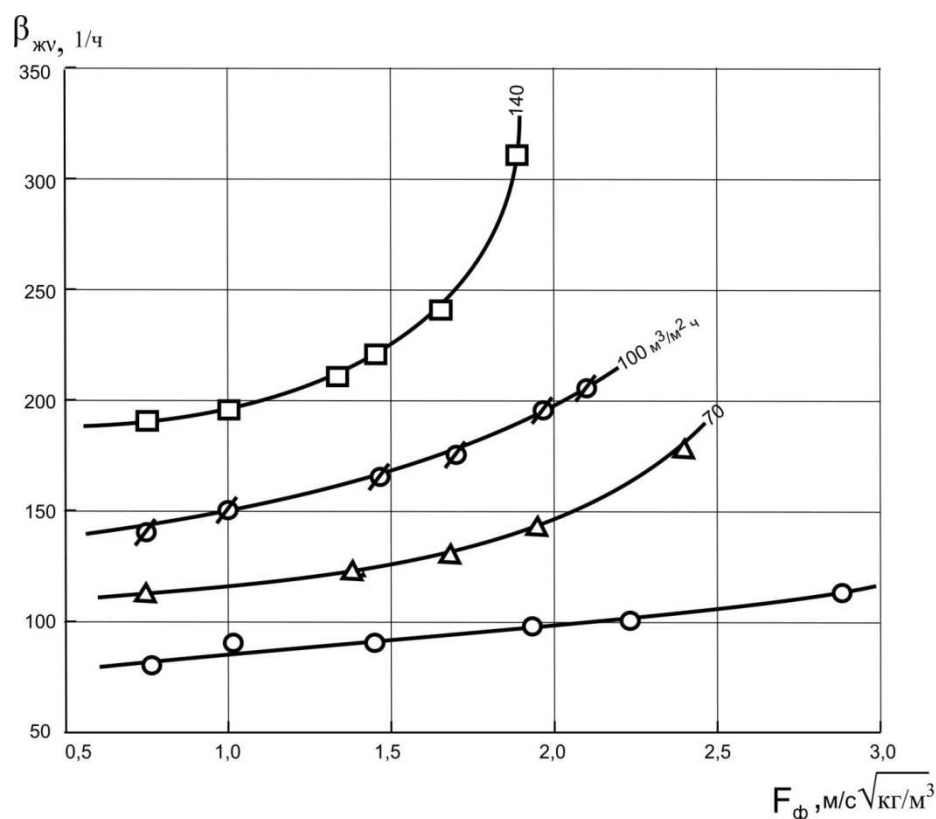


Рис. 5.8 Объемный коэффициент массоотдачи металлических колец Палля размером 50 мм при различных плотностях орошения.

Данная оценка правомерна, поскольку в пленочном режиме течения основное влияние на эффективность оказывает поверхность контакта фаз.

Указанные сравнительные оценки представляются также полезными, как первый шаг при выборе насадки для конкретного процесса разделения из ряда известных изученных насадок.

Таким образом, полученная универсальная кривая (см. рис. 5.6) позволяет производить сравнительную экспресс-оценку новых и известных насадок на основании знания их удельной поверхности без проведения каких-либо экспериментов и привлечения опытных данных, поиск которых порой весьма затруднен, а сами опытные данные, полученные на различных средах при отличающихся нагрузках, температурных режимах, давлениях и т.д., часто трудно сопоставимы.

Зависимость эффективности насадок от удельной поверхности насадок разного размера представлена на рис. 5.9. Анализ кривой $\beta = f(a)$ показывает, что существуют значительные отличия этой зависимости от зависимости $\Delta P = f(a)$, представленной кривой на рис. 5.5.

1. Кривая $\beta = f(a)$ носит иной характер.

2. Темп прироста эффективности с уменьшением размера насадки сохраняется постоянным во всем диапазоне изменения удельной поверхности (см. табл. 5.4).

Таблица 5.4

Темп увеличения гидравлического сопротивления и эффективности насадок с увеличением их удельной поверхности (снижением размера)

Темп увеличения показателей	Диапазон размеров удельных поверхностей, м ² /м ³	
	60-120	90-180
ΔP	в 3,5 раза	в 3,7 раза
β	в 1,5 раза	в 1,5 раза

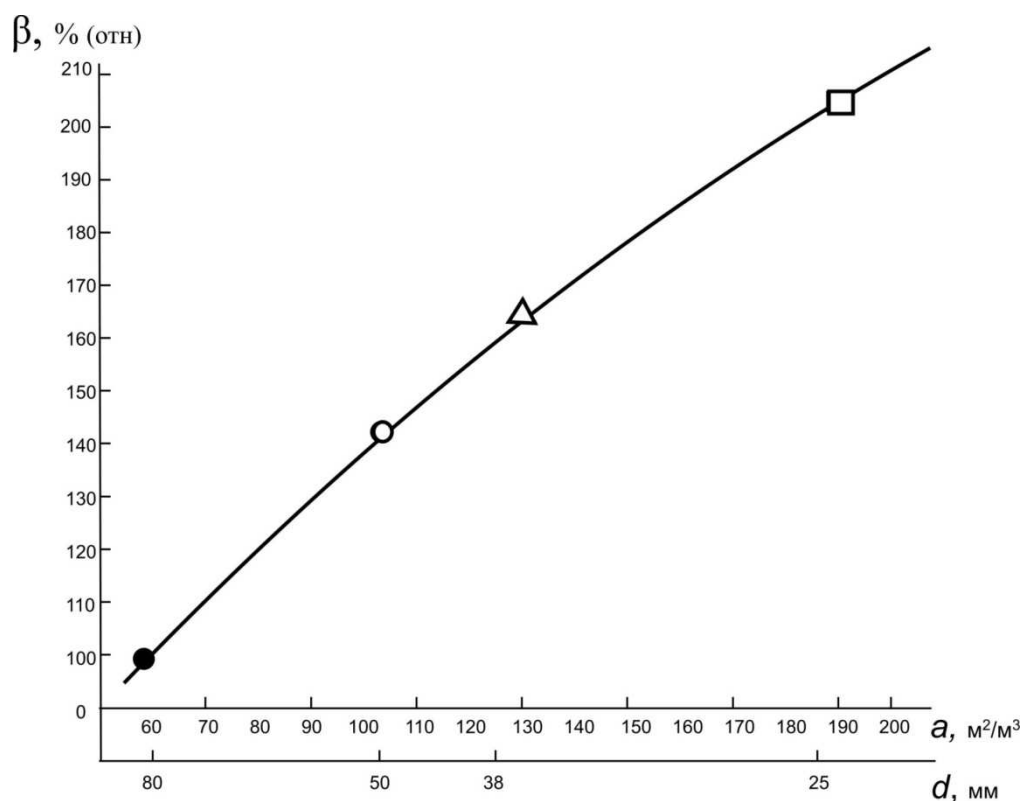


Рис. 5.9 Зависимость эффективности от удельной поверхности насадки ГИАП-НЗ разного размера:

● – $d=80$ мм; ○ – $d=50$ мм; △ – $d=38$ мм; □ – $d=25$ мм.

3. Имеет место значительно меньший прирост β против ΔP с увеличением удельной поверхности (в 1,5 по сравнению с ~ 3,5 раза). Это может быть объясняется различной природой возникновения гидравлической сопротивлению и массопереноса. Если в первом случае существенное значение имеет конвективная составляющая, то во втором случае в рассматриваемом пленочном режиме течения она не оказывает воздействия. Многочисленными экспериментами было установлено, что в пределах пленочного режима при увеличении скорости газа (первопричине роста конвективной составляющей) эффективность массопереноса примерно сохраняется постоянной.

4. Рост эффективности отстает от увеличения удельной поверхности: 1,5 раза против 2-х раз (см. табл. 5.4). Это, по всей видимости, объясняется тем, что не вся геометрическая поверхность насадки участвует в процессе

массопереноса. Более подробно об этом см. в главе 8. О связи массообменных и гидродинамических характеристик насадки см. в главе 6.

5.3. Влияние размера перфорации

Перфорация нерегулярных тепло- массообменных насадок широко используется, как инструмент улучшения их массообменных и гидродинамических характеристик. Это, в частности, обсуждается в работах [5,45].

В [340] рассматривается влияние площади перфорации – $S_{\text{отв}}$ на указанные характеристики насадки и подход к выбору рационального значения $S_{\text{отв}}$.

Однако, при определении необходимой перфорации, оценка наиболее рациональной площади перфорации не исчерпывает поставленной задачи. Требуется также знание рационального диаметра отверстий – d_0 , их числа – n , а также их места расположения на поверхности насадки. Число отверстий при известной величине $S_{\text{отв}}$ легко рассчитывается, если оптимальное значение d_0 определено. Место расположения отверстий представляется логичным определять из следующего соображения: желательно, чтобы на каждое из отверстий, по возможности, приходилась равная доля поверхности насадочного элемента.

Подход к оценке оптимального диаметра отверстий нам представляется логичным производить, основываясь на рассмотрение движения потоков газа и жидкости через одиночный насадочный элемент.

Прежде всего, остановимся на влиянии d_0 на потерю напора неорошаемой насадки – ΔP_c . Для упрощения анализа рассмотрим движение потоков в насадочном элементе кольцевой формы, имеющим горизонтальную ориентацию в слое насадки (рис. 5.10). Как при наличии орошения, так и без него, элемент практически полностью омывается газом (за исключением площади омертвленной в местах контакта элементов).

Влияние размера отверстий следует анализировать, сравнивая эффект этого влияния при различных значениях d_0 и постоянстве площади перфорации.

Рассмотрим вначале движение потоков газа в неперфорированном, неперфорированном элементе насадки (рис. 5.10а). Обозначим количество газа, входящего в элемент – $G_{вх}$. Количество газа, выходящего из элемента через его открытые торцевые отверстия - $G_{вых.торц}$. Для неперфорированной насадки, естественно, $G_{вх} = G_{вых.торц}$. Скорость газа, проходящего через элемент – w , соответствует количеству газа, поступающего в насадочный слой – G , м³/ч. Этой нагрузке соответствует также определенное гидравлическое сопротивление сухого насадочного слоя из неперфорированной насадки.

При нанесении перфорации какого-либо определенного размера с отверстиями, равными d_{01} при $G = const$ и $S_{отв} = const$ остается неизменным количество $G_{вх}$ и w . При этом часть газа, поступающего в элемент, проходит через отверстия и выходит через них – G_0 (рис. 5.10б). Поэтому $G_{вых.торц}$ снижается, сохраняя баланс: $G_{вх} = G_{вых.торц} + G_0$. Условия прохождения газа через насадочный слой облегчаются и потому потери напора в насадочном слое снижаются.

Какие изменения могут произойти, если отверстия перфорации будут более крупными – $d_{02} > d_{01}$ опять-таки при $G = const$ и $S_{отв} = const$. В этом случае должны сохранить свои значения $G_{вх}$ и w , измениться соотношение $G_{вых.торц}/G_{отв}$, а также ΔP насадочного слоя.

Чтобы понять, в каком направлении гидравлическое сопротивление должно измениться, представим движение газа через отверстия перфорации, как рассматриваемый в гидродинамике процесс истечения газа из отверстия (рис. 5.11). При истечении газа из отверстия диаметром d_0 и площадью поперечного сечения – F_1 , в отверстии происходит обжатие струи до диаметра – d_c , которому соответствует площадь узкого сечения струи трубы – F_c . По выходе из отверстия струя расширяется до площади сечения канала за отверстием – F_k .

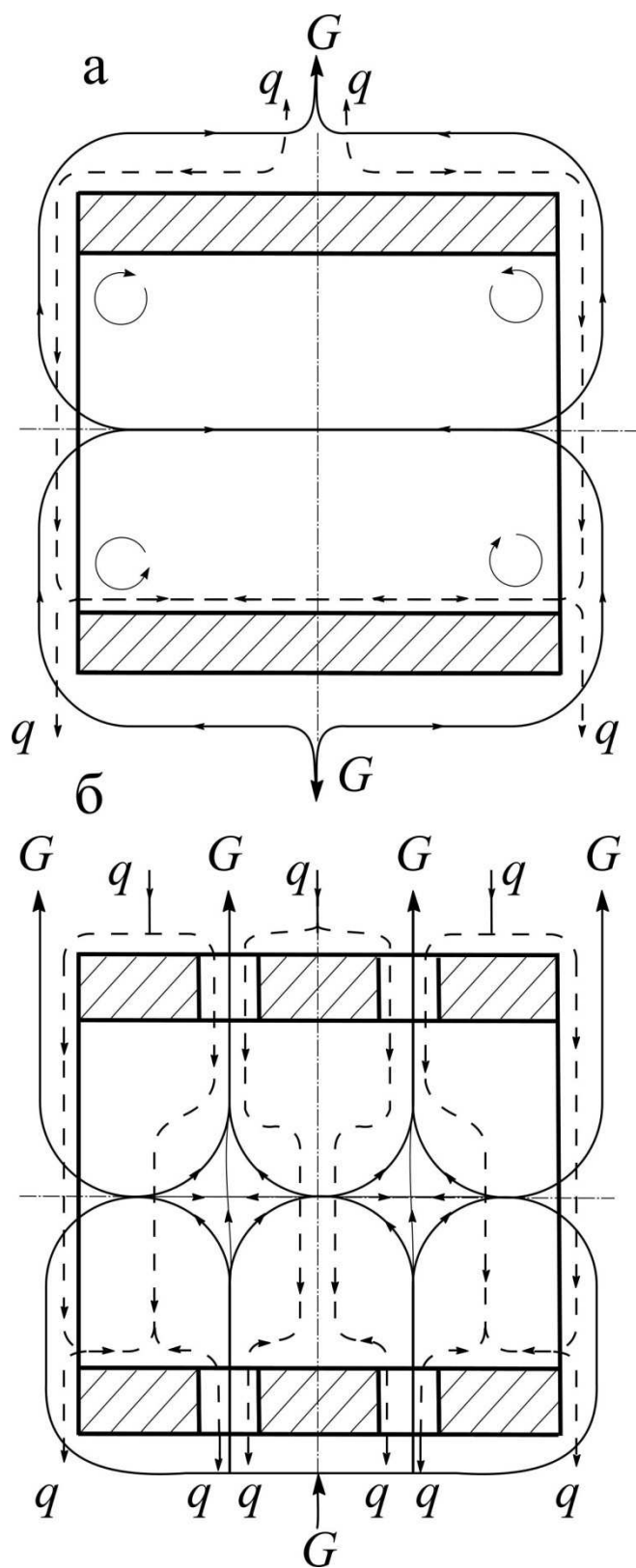


Рис. 5.10 Движение потоков газа и жидкости в одиночном насадочном элементе кольцевой формы: (а) – неперфорированный элемент; (б) – перфорированный элемент. G – газ; q – жидкость.

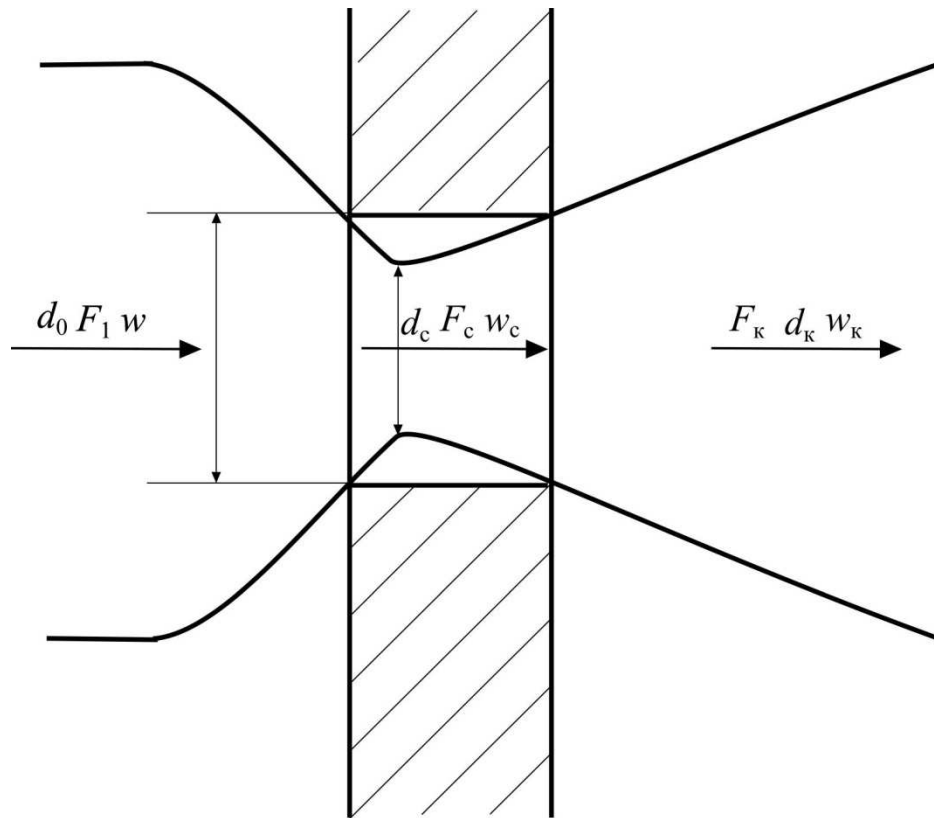


Рис. 5.11 Траектория потока при его истечении из отверстия: d_0 – диаметр отверстия, F_1 – площадь отверстия, w – скорость газа на входе в отверстие; d_c , F_c и w_c – то же в узком сечении струи; F_k – площадь поперечного сечения канала за отверстием, w_k – скорость газа в этом сечении.

Для расчета потери напора при истечении из отверстия в работе [29] предлагается использовать нижеследующее уравнение, базирующееся на неразрывности потока:

$$\Delta P = \left(\frac{F_1}{F_c} - \frac{F_1}{F_k} \right)^2 \frac{w^2 \gamma}{2g}. \quad (5.9)$$

Здесь: w – скорость газа на входе в отверстие, м/с; γ – удельный вес газа, Н/м³; g – ускорение силы тяжести, м/с².

С увеличением d_0 величины F_1 и F_c растут в разной степени, причем F_c в большей степени, поэтому их соотношение F_1/F_c снижается. F_k остается неизменным. Следовательно, с увеличением F_1 соотношение F_1/F_k увеличивается. В итоге, разность в скобках уравнения (5.9) уменьшается. Таким образом, с возрастанием диаметра отверстий потеря напора в

отверстиях при $G = \text{const}$ должна уменьшаться. Снижение этой составляющей потери напора в насадочном слое должно вести к снижению ΔP в нем.

Как вытекает из уравнения (5.9), наиболее резкого снижения потери напора следует ожидать при переходе от очень мелких отверстий к более крупным. При дальнейшем увеличении диаметра отверстий ΔP должно снижаться в меньшей степени. Качественный характер изменения потери напора в насадочном слое в зависимости от d_0 представлен на рис. 5.12. Многочисленными исследованиями гидродинамики насадочных слоев установлена квадратичная зависимость ΔP от скорости газа. Поэтому при увеличении G кривые ΔP на рис. 5.12 должны соответственно перемещаться вверх.

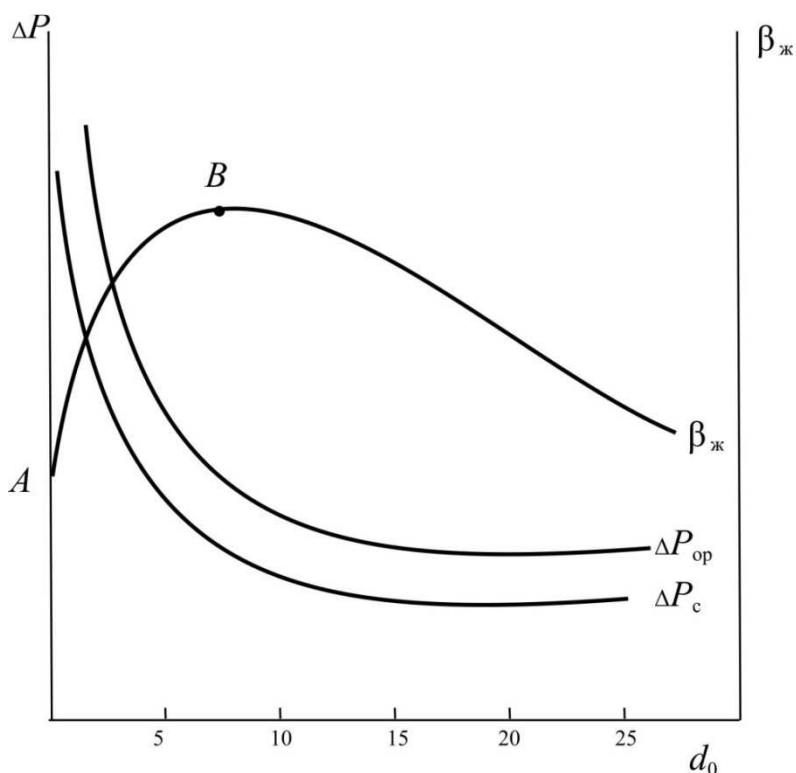


Рис. 5.12 Характер изменения потери напора и коэффициента массоотдачи в насадочном слое в зависимости от диаметра отверстий перфорации – d_0 при постоянной нагрузке по газу и постоянству площади перфорации – $S_0 = \text{const}$.

В случае орошения насадки, надо ожидать сохранения рассмотренных выше качественных закономерностей влияния d_0 на величину потери напора при G и нагрузках по жидкости - $q = \text{const}$. При увеличении нагрузок по

жидкости, как для перфорированных, так и неперфорированных насадок, как известно, потеря напора существенно растёт.

При орошении неперфорированной насадки (рис. 5.10а) значительная часть ее геометрической поверхности не омывается жидкостью из-за экранирования элементов и недоступности для жидкости части ее внутренней поверхности. Перфорация насадочных элементов существенно улучшает омывание внутренней поверхности (рис. 5.10б) и поэтому эффективность увеличивается.

Сравнивая эффективность колец Рашига, которые являются неперфорированной насадкой, и колец Палля, имеющих перфорацию, следует указать, что для колец Палля она на 25% выше. Нельзя не отметить, что увеличение эффективности в рассматриваемом случае связано не только с влиянием перфорации, но и повышением турбулизации и улучшением перемешивания потоков внутри элементов насадки.

При $S_0 = \text{const}$ количество отверстий перфорации на элементе насадки является функцией d_0 . Можно полагать, что в некотором определенном диапазоне размеров отверстий с уменьшением d_0 и увеличением числа отверстий, эффективность должна увеличиваться из-за увеличения точек контакта жидкости и газа, омывающих внутреннюю поверхность элемента насадки. Однако при этом, как обсуждалось выше, будет увеличиваться ΔP в отверстиях, снижая расход газа через них, что для массопереноса является негативным. На определенном этапе с уменьшением d_0 и ростом числа отверстий, возможно, преобладает позитивное воздействие. Однако, при достижении определенных ΔP в отверстиях, рост эффективности замедляется из-за возникающего преобладающего влияния негативного фактора. Предполагаемый характер влияния размера отверстий на эффективность представлен на рис. 5.12. Точка А на кривой эффективности должна соответствовать эффективности неперфорированной насадки, а точка В - равновесию негативного и позитивного воздействия.

Следует сказать, что на самом деле гидродинамическая обстановка в насадочном слое значительно сложнее рассмотренной и, в первую очередь, из-за того, что число насадок, имеющих горизонтальную ориентацию, не превышает ~50%. Однако, представляется, что ожидаемые качественные закономерности влияния диаметра отверстий на ΔP и эффективность в реальных условиях останутся в силе.

Несмотря на очевидную важность изучения влияния d_0 на гидравлическое сопротивление и эффективность, работы в этой области практически отсутствуют. Наиболее полно такого рода исследование было осуществлено в [45]. В этой работе изучалось влияние диаметра отверстий перфорации применительно к промышленной насадке ГИАП-НЗ, разработанной в 80-е годы в институте Азотной промышленности [348] для абсорбционной очистки газа в агрегатах большой единичной мощности.

Результаты этого исследования представлены на рис. 5.13 и рис. 5.14.

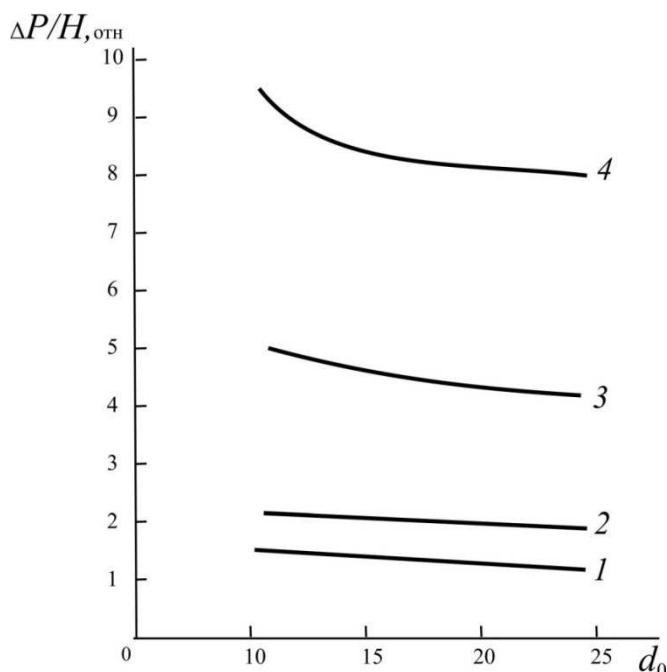


Рис. 5.13 Влияние диаметра отверстий перфорации на гидравлическое сопротивление насадки ГИАП-НЗ размером 50 мм с $S_{\text{отв}} = 12\% = \text{const}$:

$$1 - q = 100 \text{ м}^3/\text{ч}, w = 0.5 \text{ м/с};$$

$$2 - q = 130 \text{ м}^3/\text{ч}, w = 0.5 \text{ м/с};$$

$$3 - q = 100 \text{ м}^3/\text{ч}, w = 1 \text{ м/с};$$

$$4 - q = 100 \text{ м}^3/\text{ч}, w = 1.4 \text{ м/с}.$$

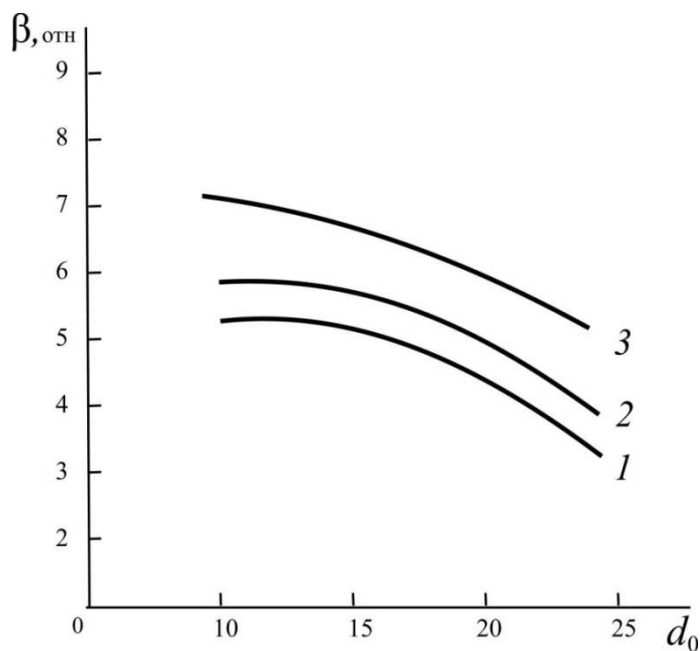


Рис. 5.14 Влияние диаметра отверстий перфорации на эффективность массопереноса насадки ГИАП-НЗ размером 50 мм с $S_{отв} = 12\% = \text{const}$:

$$1 - q = 100 \text{ м}^3/\text{ч}, w = 0.5 \text{ м/с};$$

$$2 - q = 100 \text{ м}^3/\text{ч}, w = 1.4 \text{ м/с};$$

$$3 - q = 140 \text{ м}^3/\text{ч}, w = 0.5 \text{ м/с}.$$

$\beta_{ж}$ - коэффициент массоотдачи в жидкой фазе.

Они показывают, что установленное опытным путем влияние d_0 , как на потерю напора, так и на эффективность, в основном соответствует изложенному выше анализу воздействия диаметра отверстий перфорации насадочных элементов на изменение гидродинамической обстановки в слое насадки, которая, в свою очередь, оказывает соответствующее влияние на эффективность.

Исследования проводились в диапазоне $d_0 = 11-23$ мм. Было установлено, что с увеличением d_0 , гидравлическое сопротивление снижается наиболее резко при небольших размерах отверстий и прекращает снижаться при $d_0 > 15$ мм при всех нагрузках по газу и жидкости.

Эффективность массопереноса снижается менее резко в интервале $d_0 = 11-15$ мм. При $d_0 > 15-16$ мм наблюдается резкое снижение эффективности. Если $d_0 = 11$ мм соответствует число отверстий, равное $n = 20$, то при $d_0 = 16$ мм, оно снижается вдвое - до $n = 10$. Диаметру отверстий в 23 мм соответствует $n \cong 5$. Понятно, что столь значительное снижение числа точек контакта газа и жидкости даже при стабилизировавшихся ΔP и, соответственно, скорости газа в отверстиях, должно вести к резкому снижению эффективности. Таким образом, при $d_0 \approx 15-16$ мм, как для ΔP , так

и $\beta_{ж}$ наблюдается перелом кривых (наиболее четкий для кривых $\beta_{ж} = f(d_0)$). Авторами насадки за оптимальный был принят $d_0 = 16.5$ мм, поскольку при $d_0 < 16.5$ мм не обеспечивается существенный рост эффективности и, в то же время, заметно увеличивается ΔP .

Все сказанное выше говорит о практической важности точной оценки оптимального диаметра отверстий перфорации. Механическое перенесение результатов, полученных в [45], на насадки другой формы невозможно, поскольку там будет складываться иная гидродинамическая обстановка. Однако полученные в [45] результаты могут служить в качестве ориентира.

Рассмотренные выше качественные закономерности, надо полагать, будут иметь силу для кольцевых насадок и иной формы.

5.4. Влияние площади перфорации

Наряду с рассмотренным выше влиянием размера отверстий перфорации и их числа, существенное значение имеет площадь перфорации насадочных элементов.

Увеличение площади перфорации увеличивает открытость внутренней полости насадочных элементов и должно вести к увеличению эффективности, но до определенного предела (точка «О» на рис. 5.15). В этой точке максимального приближения смоченной поверхности к удельной поверхности должно достигаться максимально значение эффективности – E . При дальнейшем увеличении площади перфорации E из-за снижения смоченной поверхности должна падать. Такого рода закономерность должна иметь место при различных нагрузках по газу и жидкости (см. рис. 5.16).

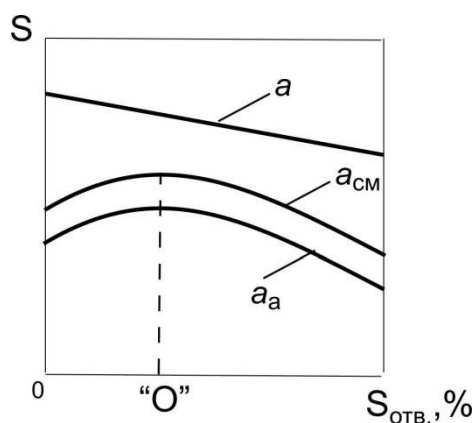


Рис. 5.15 Характер изменения удельной и смоченной поверхности в зависимости от изменения площади перфорации.

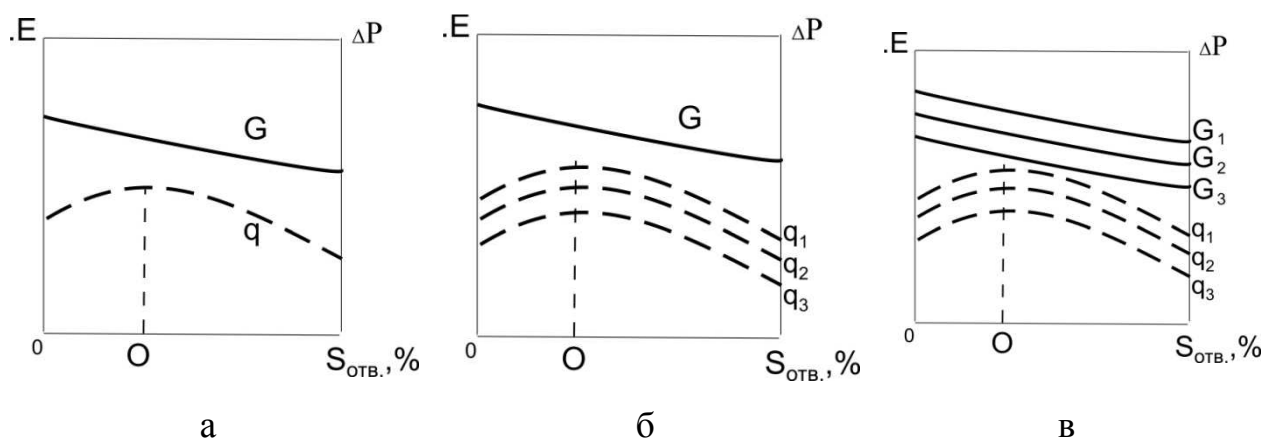


Рис. 5.16 Зависимость эффективности массопереноса и гидравлического сопротивления от площади перфорации нерегулярной насадки одной формы и размера в пленочном режиме:

а – при G и $q = \text{const}$; б – при $G = \text{const}$ и различных $q_1 > q_2 > q_3$; в- при различных $G_1 > G_2 > G_3$ и $q_1 > q_2 > q_3$.

Смоченная поверхность, при изменении нагрузок по жидкости в пределах пленочного режима, не может менять своей величины. Может лишь расти (или уменьшаться) толщина пленки жидкости, скорость ее движения, что приводит к соответствующему изменению эффективности массопереноса. Однако величина массопереноса для всех нагрузок по жидкости в точке «О» будет максимальной.

По поводу влияния перфорации на гидравлическое сопротивление насадки – ΔP . Из сравнения характеристик колец Рашига и Палля (последние можно рассматривать, как перфорированные кольца Рашига, сохранившие

удельную поверхность равной $S_{уд}$ колец Рашига за счет отогнутых во внутрь кольца лепестков) следует, что перфорация кольца, уменьшившая экранирование и обеспечившая ббольшую его открытость для протекания потоков газа и жидкости, приводит к значительному снижению потери напора. Для колец Палля ΔP на $\sim 40\%$ ниже, чем для колец Рашига.

Следует отметить, что исследования влияния площади перфорации, за исключением работы [6], практически отсутствуют. Результаты исследования применительно к насадке ГИАП-НЗ представлены на рис. 5.17 и 5.18.

Для авторов насадки эти исследования имели практический интерес, поскольку в результате ими, для изготовления насадки, была выбрана перфорация, равная 12%. Следует отметить, что выбранная $S_{отв.}$ была выше перфорации, которая обеспечивала достаточно высокую, но не максимальную эффективность (рис. 5.18). Это объясняется тем, что при $S_{отв.} < 12\%$ существенно возрастает ΔP (рис. 5.17).

Эти опытные данные согласуются с рассмотренными выше соображениями о том, что с увеличением $S_{отв.}$ эффективность вначале увеличивается, достигает максимальных значений, затем начинает падать.

При этом максимальные значения достигаются при одной и той же величине перфорации вне зависимости от нагрузки по жидкости. Для данной насадки величина оптимальной перфорации составляет $\sim 6-7\%$.

То, что максимальное значение эффективности достигается при столь невысоком значении $S_{отв.}$ и при этом увеличение эффективности по сравнению с неперфорированной насадкой невелико, свидетельствует о том, что данная насадка, будучи неперфорированной, является, весьма открытой для омывания ее потоками газа и жидкости. Поэтому перфорация позволяет лишь незначительно увеличить ее активную поверхность.

Сказанное выше о высокой степени открытости насадки ГИАП-НЗ, как бы вступает в противоречие с наблюдавшимся заметным снижением потери напора. Так, рост $S_{отв.}$ в два раза с 9 до 18% снижает ΔP в среднем на 20%, что как раз может свидетельствовать о том, что неперфорированная насадка

является не в полной мере открытой. Возможно, что указанное снижение ΔP связано в большей степени с уменьшением экранирования, обусловленным ростом $S_{отв.}$

Необходимо еще раз отметить, что влияние величины площади перфорации на показатели работы нерегулярных массообменных насадок до настоящего времени является малоизученным. Оно не обсуждается даже в наиболее капитальных монографиях [392]. Тем не менее, определение оптимальной площади перфорации является важной практической задачей при разработке новых конструкций перфорированных нерегулярных насадок. В [340] рассматривается возможность улучшения показателей работы насадок с увеличением $S_{отв.}$, но при сохранении $S_{уд.}$ за счет отогнутых козырьков, возникающих при просечках при нанесении перфорации. К сожалению, следует констатировать, что несмотря на понимание гидродинамической обстановки, складывающейся в насадочном слое и влияния на нее различных факторов, знание механизмов переноса и наличие представлений о качественных соотношениях между эффективностью и $S_{отв.}$ при ее изменениях, отсутствует возможность расчета количественных соотношений. Таковая возможность может возникнуть, если удастся оценивать активную поверхность, не прибегая к сложным экспериментам, что обсуждается в [412].

На сегодняшний день установление четкой количественной зависимости эффективности от величины площади перфорации возможно только опытным путем. Хотя эти эксперименты являются весьма трудоемкими и, в первую очередь, в связи с необходимостью изготовления, как минимум, четырех партий насадки с различной перфорацией и без нее, только они могут дать исчерпывающую информацию. Механический перенос результатов, полученных для какой-либо насадки на насадку иной формы невозможен, поскольку в этом случае в насадочном слое будет складываться иная гидродинамическая обстановка.

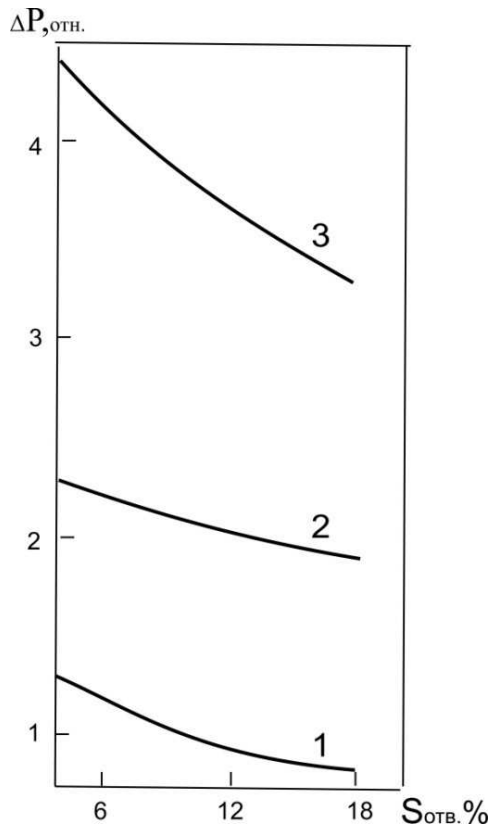


Рис. 5.17 Влияние площади перфорации на гидравлическое сопротивление насадки ГИАП-НЗ размером 50 мм в пленочном режиме ($d_{отв} = 16,5$ мм = const; $w=0.5$ м/с = const):

- 1 - $q=0$ м/ч;
- 2 - $q=100$ м/ч;
- 3 - $q=140$ м/ч.

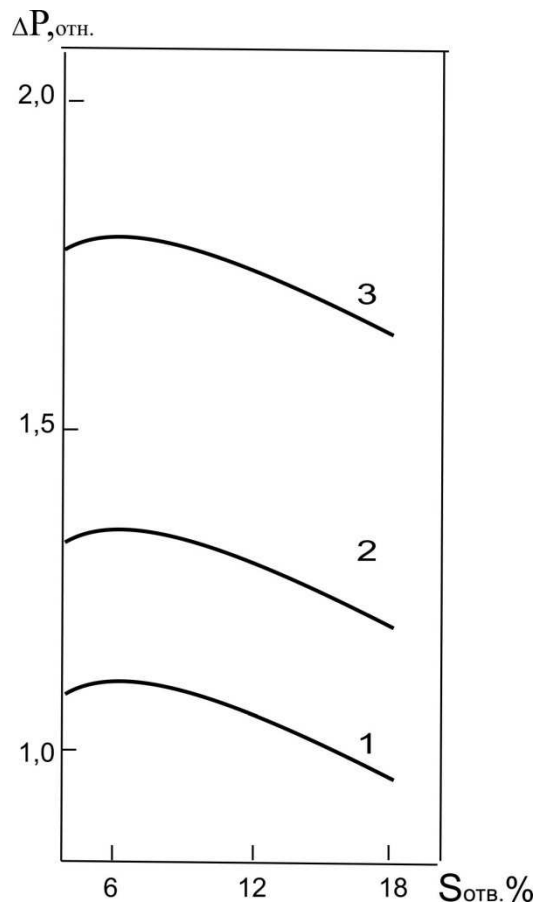


Рис. 5.18 Влияние площади перфорации на эффективность насадки ГИАП-НЗ размером 50 мм

($d_{отв} = 16,5$ мм; $w=0.5$ м/с) в пленочном режиме:

- 1 - $q=70$ м/ч;
- 2 - $q=100$ м/ч;
- 3 - $q=140$ м/ч.

ГЛАВА 6

СВЯЗЬ ЭФФЕКТИВНОСТИ С ГИДРАВЛИЧЕСКИМ СОПРОТИВЛЕНИЕМ НЕРЕГУЛЯРНЫХ ТЕПЛОМАССОБМЕННЫХ НАСАДОК

В свете рассмотренного выше влияния удельной поверхности нерегулярных насадок на их гидравлическое сопротивление и эффективность представляется целесообразным рассмотреть связь между собой этих важнейших технологических характеристик насадок.

6.1. Гидравлическое сопротивление и объемные коэффициенты

Многие исследователи с помощью экспериментальных и теоретических методов установили связь между коэффициентами массоотдачи и потерей давления в аппаратах, как для насадочных, так и барботажных [197,200,263,284].

На величину гидравлического сопротивления орошаемых нерегулярных насадок - ΔP , мм вод. ст./м, существенное влияние оказывают нагрузки по жидкости (плотность орошения) - q , м³/м²ч или м/ч [118]. Характер этого влияния для любой из насадок прослеживается из графиков типа, представленных на рисунке 6.1 зависимостей вида $\Delta P=f(w)$ или $F_{\phi} = w(\rho_r)^{1/2}$,

где w , м/с - скорость газового потока в расчете на полное сечение аппарата, заполненного насадкой (фиктивная скорость), F_{ϕ} - фактор скорости, $\rho_{г}$ - плотность газа, кг/м³.

С другой стороны, при прочих равных условиях плотность орошения оказывает решающее влияние на эффективность массопереноса в пленочном режиме, где эффективность практически не зависит от скорости газа.

Это влияние можно проследить на рисунках типа рисунка 6.2, где представлена зависимость $\beta_{вж} = f(w)$ при различных q . Здесь $\beta_{вж}$ - объемный коэффициент массоотдачи в жидкой фазе, 1/ч.

Таким образом, при прочих равных условиях имеет место зависимость $\Delta P = f(q)$ и $\beta_{вж} = f(q)$. Однако, учитывая происходящие в наладочном слое гидродинамические и массообменные процессы, следует рассматривать взаимосвязь эффективности и потери напора, не с экспериментально установленной величиной ΔP орошаемой насадки, а с ее долей ΔP_o , обусловленной величиной q . Для этого предлагается ввести понятие об этой доле:

$$\Delta P_o = \Delta P - \Delta P_c, \quad (6.1)$$

где ΔP_c - потери напора сухой насадки.

Таблица 6.1

Сравнительные характеристики кольцевых металлических нерегулярных насадок размером 50 мм [5, 6]

Наименование насадки	Доля свободного объема, ε м ³ /м ³	Удельная поверхность, а м ² /м ³	Потери напора отн., %	Пропускная способность, отн. %	Эффективность, отн. %
Кольца Рашига	0.95	110	100	100	100
Кольца Палля	0.96	110	63	120	125
Кольца Белецкого	0.96	110	85	100	125
Насадка ГИАП-НЗ	0.96	101	47	133	137

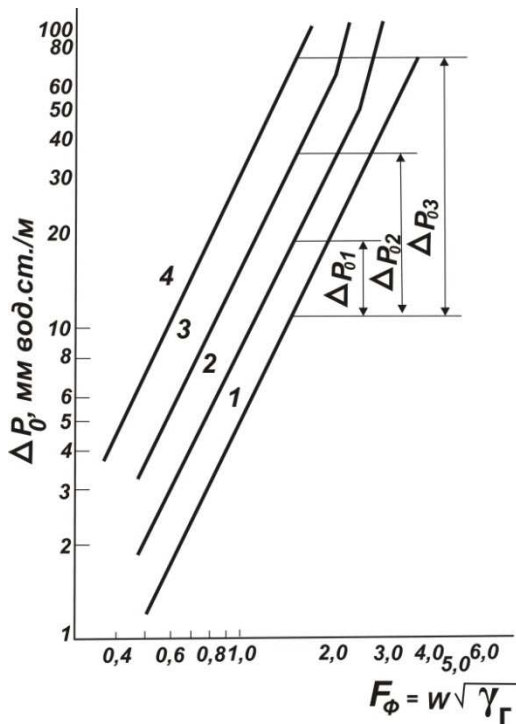


Рис. 6.1 Гидравлическое сопротивление сухой и орошаемой насадки ГИАП-НЗ размером 50 мм:

- 1 - сухая насадка;
 - 2 - плотность орошения $q= 40$ м/ч;
 - 3 - плотность орошения $q= 80$ м/ч;
 - 4 - плотность орошения $q= 120$ м/ч;
- ΔP_{o1} , ΔP_{o2} и ΔP_{o3} - прирост потери напора по отношению к ΔP_c соответственно при плотностях орошения $q = 40, 80$ и 120 м/ч.

То есть рассматривается зависимость $\beta_{вж} = f(\Delta P_o)$. Характер этой зависимости в данной статье исследуется на примере одной из лучших кольцевых промышленных насадок - насадки ГИАП-НЗ [2-4] (см. таблицу 6.1).

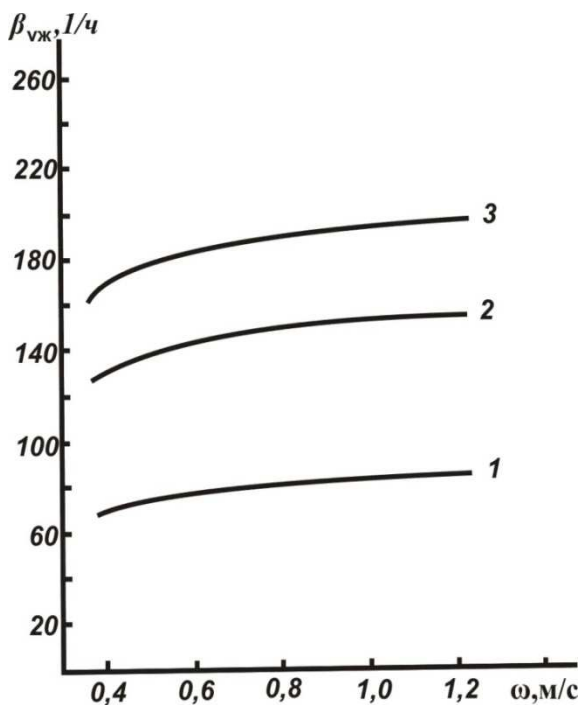


Рис. 6.2 Объемный коэффициент массоотдачи насадки ГИАП-НЗ размером 50 мм:

- 1 - плотность орошения $q = 40$ м/ч;
- 2 - плотность орошения $q = 80$ м/ч;
- 3 - плотность орошения $q = 120$ м/ч.

Для этой цели использованы результаты гидродинамических [235] и массообменных [8] исследований этой насадки в условиях одинаковых систематических погрешностей.

На рисунке 6.3 представлены полученные на основании опытных данных кривые зависимости $\Delta P_o = f(w)$, позволяющие с использованием зависимостей $\beta_{вж} = f(q)$ при $w = \text{const}$ (рис. 6.2) проследить взаимосвязь между $\beta_{вж}$ и ΔP_o .

Сопоставляемые показатели для насадки ГИАП-НЗ размером 50 мм для трех плотностей орошения $q = 40, 80$ и 120 м/ч и трех скоростей газа $w = 0.5; 1$ и 1.5 м/с, находящихся в пределах пленочного режима течения, представлены в таблице 2. За базовые (100%) приняты значения ΔP_o и $\beta_{вж}$ при $q = 40$ м/ч.

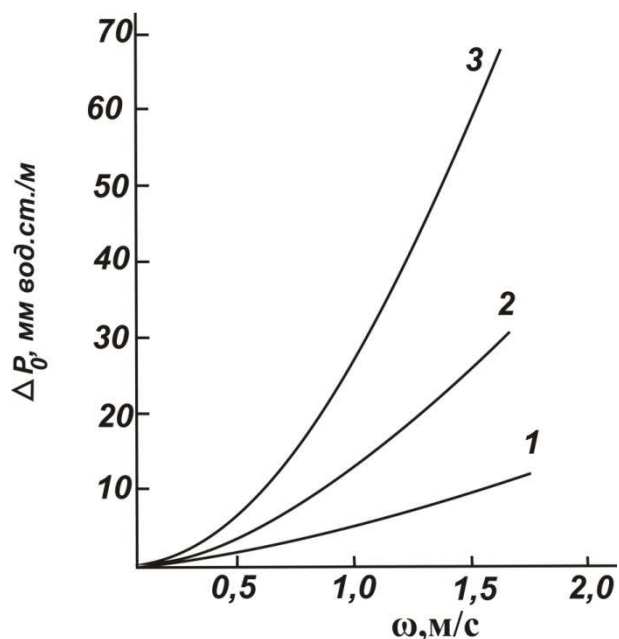


Рис. 6.3 Зависимость прироста потери напора - ΔP_o насадки ГИАП-НЗ размером 50 мм от скорости газа при различных плотностях орошения: 1 - плотность орошения $q = 40$ м/ч; 2 - плотность орошения $q = 80$ м/ч; 3 - плотность орошения $q = 120$ м/ч.

Таблица 6.2

Влияние плотности орошения на величину потери напора, обусловленного ею, и эффективность металлической насадки ГИАП размером 50 мм

$q = 80$ м/ч;					$q = 120$ м/ч				
Ско- рость начала подви- сания, $w_{п}$, м/с	β , 1/ч	ΔP_o , мм вод. ст./м	$\Delta P_o/\Delta P_o$ ($q = 40$ м/ч), %	$\beta_{вж}/\beta_{вж}$ ($q = 40$ м/ч), %	Ско- рость начала подви- сания, $w_{п}$, м/с	β , 1/ч	ΔP_o , мм вод. ст./м	$\Delta P_o/\Delta P_o$ ($q = 40$ м/ч), %	$\beta_{вж}/\beta_{вж}$ ($q = 40$ м/ч), %
1.9	140	2.5	277	187	1.6	177	5.95	238	126
	152	10.45	294	181		193	24.5	233	127
	157	24.5	288	180		210	59.5	243	133

Из данных таблицы 6.2 могут быть сделаны следующие выводы:

1. При кратном увеличении плотности орошения наблюдается одинаковая степень увеличения ΔP_o для всех трех рассматриваемых скоростей газа 0.5; 1.0 и 1.5 м/с. Так, при увеличении q с 40 до 80 м/ч темп роста ΔP_o для всех значений w составляет ~ 290%, а при увеличении q с 80 до 120 м/ч темп роста ΔP_o для всех значений w составляет ~ 240%.

2. Темп кратности увеличения ΔP_o с ростом q снижается ~ 290% при увеличении q с 40 до 80 м/ч и ~ 240% при увеличении q с 80 до 120 м/ч.

3. Аналогичная картина наблюдается в отношении зависимости эффективности от плотности орошения: для всех скоростей газа кратность роста $\beta_{вж}$ при увеличении q с 40 до 80 м/ч одинакова и равна ~ 180%, а при увеличении q с 80 до 120 м/ч ~ 130%, как и в случае $\Delta P_o = f(q)$, кратность нарастания эффективности по мере увеличения q снижается.

Однако с увеличением плотности орошения для эффективности характерно, как снижение кратности, так и прирост $\beta_{вж}$.

В то же время, как для ΔP_o при уменьшении кратности увеличения ΔP_o с ростом q , прирост потери напора увеличивается (см. рис. 6.4).

Для объяснения полученных закономерностей рассмотрим гидродинамическую обстановку, складывающуюся при упомянутых выше нагрузках по газу и жидкости.

Скорости газа $w = 0.5-1.5$ м/с для насадки ГИАП-НЗ лежат в области пленочного течения (см. рис. 6.1 и таблицу 6-2). Плотность орошения 40 м/ч и более высокие ее значения обеспечивают максимальное смачивание поверхности насадки и условия для формирования устойчиво текущей пленки жидкости [118]. В этих условиях ΔP_0 (дополнительное к величине ΔP_c) является следствием сужения межнасадочных каналов, а также трения, возникающего в процессе разнонаправленного течения жидкости и газа, турбулизирующего жидкость.

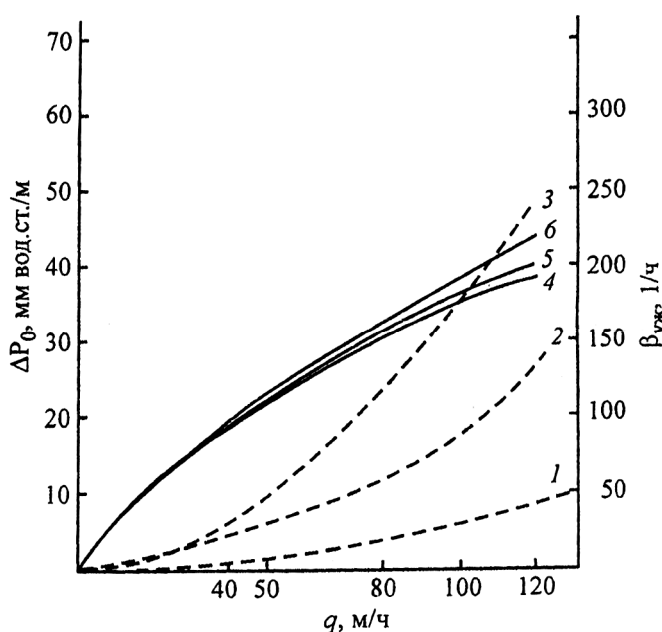


Рис. 6.4. Зависимость прироста потери напора - ΔP_0 и коэффициента $\beta_{вж}$ насадки ГИАП-НЗ от плотности орошения при различных скоростях газа. Эффективность:

1 - $w = 0.5$ м/с;

2 - $w = 1.0$ м/с;

3 - $w = 1.5$ м/с.

Потеря напора:

4 - $w = 0.5$ м/с;

5 - $w = 1.0$ м/с;

6 - $w = 1.5$ м/с.

6.2. Модель противоточного движения фаз и объемные коэффициенты

Рассмотрим процессы, происходящие при противоточном движении фаз в насадочном слое (например, в процессе абсорбции) с использованием модели (идеализированной по отношению к насадочному слою),

соответствующей противоточному движению фаз в канале, образованном параллельными вертикальными пластинами регулярной насадки. Пограничный слой жидкости в таком канале является классическим примером формирования пограничного слоя.

На рис. 6.5а представлено восходящее движение газа со скоростью w в неорошаемом канале. Истинная скорость газа – $w_{г} = w/\epsilon$, где ϵ , $\text{м}^3/\text{м}^3$ - доля свободного объема. Толщина пленки жидкости $\delta = 0$, также как и компонента потери напора, обусловленная наличием противоточно стекающей жидкости.

На рис. 6.5б насадка орошается с плотностью орошения q_1 . На стенках канала образуется пленка жидкости толщиной δ_1 , стекающая со скоростью $w_{ж1}$. Возникшая потеря напора ΔP_{o1} , обусловленная двумя факторами:

- уменьшением живого сечения для прохода газа (снизилась величина ϵ и стала равной ϵ_1) на величину $2\delta_1$, что привело к некоторому увеличению скорости до $w_{г1} > w$;

- трением, возникшим на поверхности раздела фаз.

При этом происходит массоперенос из газовой фазы в жидкую, интенсивность которого $\beta_{вж}$ обусловлена степенью турбулизации пленки жидкости и в первую очередь ее пограничного слоя.

На рис. 6.5в показано изменение ситуации при двукратном увеличении плотности орошения до q_2 (как это было в наших экспериментах). Толщина пленки жидкости увеличилась, но не двукратно - $\delta_2 < 2\delta_1$, т.к. увеличилась скорость стекающей жидкости $w_{ж2} < w_{ж1}$. Увеличилась потеря напора - ΔP_{o2} из-за уменьшения сечения для прохода газа на величину равную $2(\delta_2 - \delta_1)$ и как следствие увеличение скорости газа до $w_{г2}$, а также из-за увеличения трения, т.к. выросла разность скоростей разнонаправленных потоков газа и жидкости. В наших экспериментах ΔP_o выросло в 2.9 раза при увеличении q с 40 до 80 м/ч.

Выросла и интенсивность массопередачи за счет увеличения турбулизации пограничного слоя и таким образом снижения его

сопротивления массопереносу (в наших экспериментах при аналогичном увеличении q в ~ 1.8 раза).

На рис. 6.5г показано изменение ситуации при 1.5 увеличении плотности орошения до q_3 . Толщина пленки жидкости δ_3 увеличилась, но не в 1.5 раза, а несколько ниже опять-таки из-за увеличения скорости движения пленки жидкости $w_{ж3} > w_{ж2}$, и стала равной $\delta_3 < \delta_1 + \delta_2$. Произошло увеличение ΔP_o до величины ΔP_{o3} из-за уменьшения живого сечения для прохода газа на δ ($\delta_3 - \delta_2$) и соответствующего увеличения скорости до $w_{г3}$ и увеличении трения на границе раздела фаз (в наших экспериментах при увеличении q с 80 до 120 м/ч в ~ 2.4 раза).

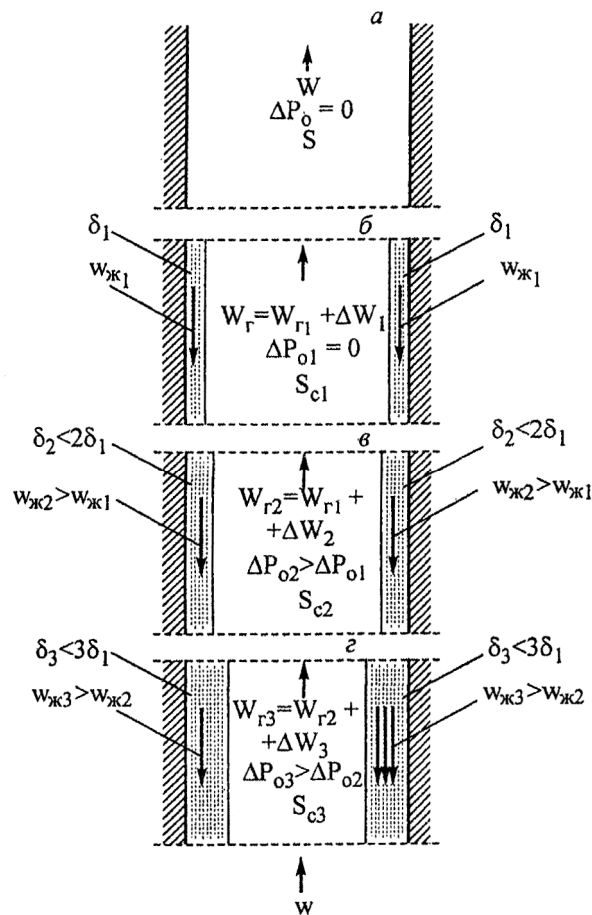


Рис. 6.5. Модель, характеризующая гидродинамическую обстановку в канале, образованном плоскими вертикальными параллельными пластинами:

S и S_c - площадь поперечного сечения канала и его свободное сечение;
 w и $w_г$ - скорость газа соответственно в пустом канале и его свободном сечении;
 δ - толщина пленки жидкости;
 $w_ж$ - скорость движения пленки жидкости.

Установленная одинаковая кратность увеличения ΔP_0 при переходе к возрастающей плотности орошения при всех трех значениях w , принимая во внимание рассмотренную выше модель, может быть объяснена тем, что при увеличении скорости газа толщина пленки жидкости при равных q меняется незначительно, а следовательно, при разных w и постоянном q живое сечение межзерновых каналов сохраняется практически постоянным. При этом увеличение ΔP_0 , обусловленное трением при возросшей w_r незначительно по сравнению с потерей напора, вызванной изменением скорости газа. В этих случаях величина ΔP_0 определяется только квадратичной зависимостью от скорости газа. Снижение кратности увеличения ΔP_0 при увеличении q и $w = \text{const}$, видимо, является следствием того, что толщина пленки жидкости, уменьшающей свободное сечение для прохода газа, увеличивается не пропорционально q из-за увеличения скорости движения жидкости. Потому указанное снижение свободного сечения отстает от роста q . Следовательно, истинная скорость газа возрастает не пропорционально увеличению q , а с некоторым отставанием. Увеличение $\beta_{\text{вж}}$ в тех же условиях отстает от темпа увеличения ΔP_0 , поскольку массоперенос обусловлен иными факторами и, в первую очередь, турбулизацией пограничного слоя. Однако этот темп тоже одинаков при изменении q для всех изученных значений w и объясняется в одинаковой степени возрастающей турбулизацией пленки жидкости и ее пограничного слоя.

Наблюдается аналогичное изменению ΔP_0 (но не столь интенсивное) замедление темпа роста $\beta_{\text{вж}}$ с увеличением q . Это, надо полагать, связано с увеличением толщины пленки жидкости, то есть увеличением массы жидкости в единице объема насадочного слоя. Из-за этого снижается концентрация поглощаемого компонента в единице объема жидкости. И это происходит несмотря на некоторое увеличение турбулизации жидкости, связанное с увеличением $w_{\text{ж}}$. Видимо, первый фактор преобладает.

Из всего сказанного выше следует, что первопричиной возникновения роста обоих рассматриваемых показателей как ΔP_0 , так и $\beta_{\text{вж}}$ является

наличие орошения, величина их определяется величиной q . Имеются общие закономерности изменения показателей ΔP_0 и $\beta_{вж}$ с изменением q . Отсюда вытекает возможность установления прямой связи этих показателей $\beta_{вж} = f(\Delta P_0)$.

На рисунке 6.6 представлены кривые этих зависимостей для разных значений w .

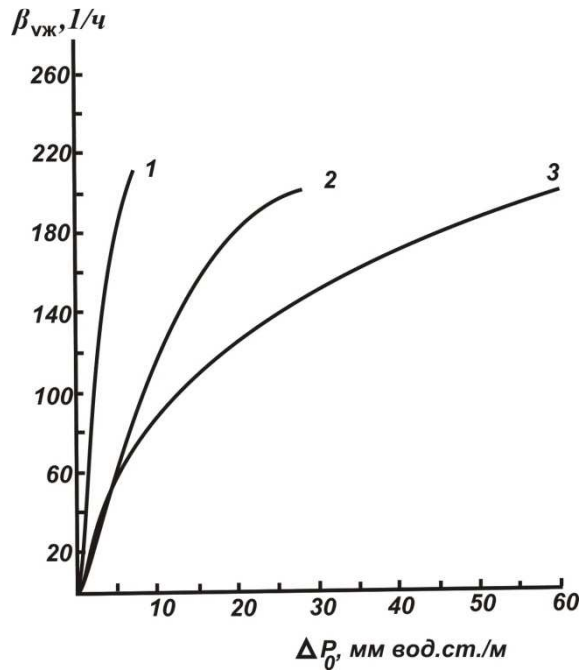


Рис. 6.6 Зависимость объемного коэффициента насадки ГИАП- НЗ размером 50 мм от прироста потери напора — ΔP_0 при различных скоростях газа: 1 - $w=0.5$ м/с; 2 - $w=1.0$ м/с; 3 - $w=1.5$ м/с.

Они описываются уравнением вида:

$$\beta_{вж}^2 = A \cdot \Delta P_0. \quad (6.2)$$

Значения A для исследованных скоростей газа приведены ниже:

$w, \text{ м/с}$	A
0.5	$7.05 \cdot 10^3$
1.0	$1.95 \cdot 10^3$
1.5	$9.2 \cdot 10^2$

В свою очередь зависимости $A = f(w)$ описываются уравнением вида $Aw = B$:

$$A = \frac{B}{w} = \frac{1,85 \cdot 10^2}{w}. \quad (6.3)$$

Подставим в уравнение (6.2) ΔP_0 из уравнения (6.1):

$$\beta_{v,ж} = [A(\Delta P - \Delta P_c)]^{1/2}, \quad (6.4)$$

а в уравнение (6.4) значение величины A из уравнения (6.3):

$$\beta_{v,ж} = \left[\frac{1,85 \cdot 10^2}{w} (\Delta P - \Delta P_c) \right]^{1/2}. \quad (6.5)$$

Перепад давления ΔP_c может быть рассчитано из зависимости:

$$\xi = \frac{\Delta P_c d_3 \varepsilon 2g}{w^2 \gamma_g}, \quad (6.6)$$

где $\xi=3.0$ - коэффициент гидравлического сопротивления для насадки ГИАП-НЗ, не зависящий от величины критерия Рейнольдса для газа -

$$Re_g = \frac{wd_3}{\varepsilon v_g}, \quad d_3=4\varepsilon/a - \text{эквивалентный диаметр насадки, } \gamma_g - \text{удельный вес газа,}$$

g - ускорение силы тяжести, v_g - коэффициент кинематической вязкости газа.

Зависимость потери напора орошаемой насадки ΔP от скорости газа и плотности орошения в [235] была обобщена аналогично в виде зависимости

критерия Эйлера для орошаемой насадки - $Eu_0 = \frac{\Delta P g \varepsilon^2}{W^2 \gamma_g}$ от числа Рейнольдса

для жидкости $Re_{ж} = \frac{4 \cdot q}{3600 \cdot a \cdot v_{ж}}$, где $v_{ж}$ - коэффициент кинематической

вязкости для жидкости, m^2/c .

Число Эйлера:

$$Eu_0 = Eu_g \cdot 10^{m \cdot Re_{ж}}, \quad (6.7)$$

где: $Eu_g = \frac{\Delta P g \varepsilon}{W^2 \gamma_g}$, а m - коэффициент, зависящий от типа и размера насадки.

Для насадки ГИАП-НЗ размером 50 мм $m = 0,653$.

Подставив в уравнение (6.5) значения ΔP_u и ΔP_c , соответственно, из уравнений (6.6) и (6.7), окончательно получим:

$$\beta_{v_{ж}} = \left[\frac{1,85 \cdot 10^2}{w} \cdot \left[\frac{0,375 W^2 \gamma_a}{\varepsilon^2 g} \cdot \left(10^{0,726 \cdot 10^{-6 \frac{L}{av_{ж}}}} - 1 \right) \right] \right]. \quad (6.8)$$

Таким образом, для насадки ГИАП-НЗ размером 50 мм имеется возможность рассчитывать ее эффективность в пределах пленочного режима и при любых значениях скорости газа и плотности орошения по результатам ее гидродинамических испытаний.

Это значит, что и для других нерегулярных насадок можно установить связь объемных коэффициентов с их гидравлическим сопротивлением. Уравнение связи параметров $\beta_{v_{ж}}$ и ΔP_o будут иметь вид:

$$\beta_{v_{ж}} = \left[\frac{b}{W} \left[\frac{c W^2 \gamma_a}{\varepsilon^2 g} \cdot \left(10^{d \frac{L}{av_{ж}}} - 1 \right) \right] \right], \quad (6.9)$$

где: b, c и d - коэффициенты, зависящие от формы и размера насадочных элементов.

Таким образом, использование компоненты потери напора, обусловленной величиной плотности орошения, является продуктивным для установления связи между двумя важнейшими характеристиками насадочного слоя [392].

ГЛАВА 7

АКТИВНАЯ ПОВЕРХНОСТЬ В НАСАДОЧНОМ СЛОЕ

7.1. Понятие об активной поверхности в насадочном слое

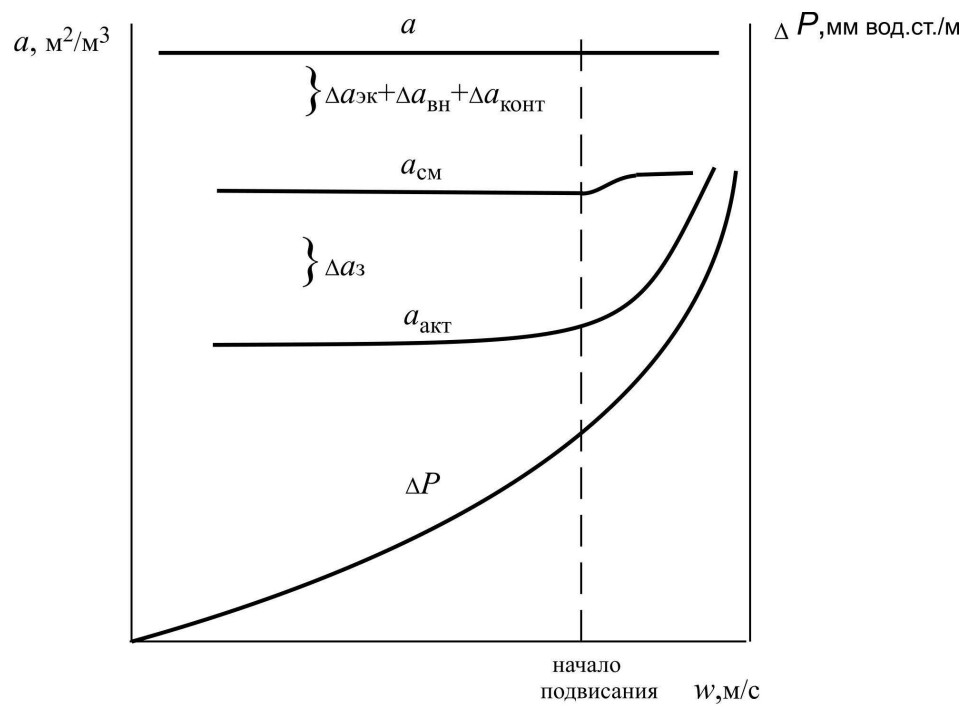
Одним из основных факторов, определяющих эффективность массопереноса в насадочном слое, является величина поверхности контакта фаз – активная поверхность.

В промышленных насадочных колоннах, работающих при режимах, не связанных с подписанием жидкости и барботажем газа через нее, для создания этой поверхности служит в основном поверхность насадочных тел. Однако обе эти поверхности не являются тождественными, так как, во-первых, во многих случаях не вся поверхность насадки смачивается орошающей жидкостью, во-вторых, не вся смоченная поверхность насадки является эффективной для массообмена и, в-третьих, эффективной может быть часть поверхности, не связанная с насадкой.

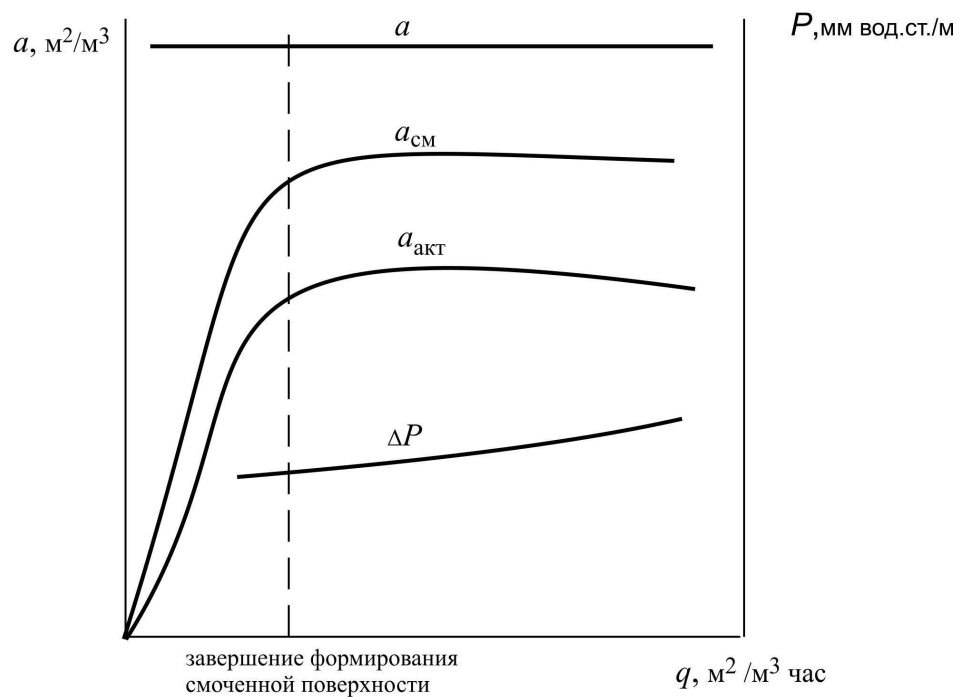
Суть активной поверхности может быть сформулирована следующим образом: активная поверхность – это часть смоченной поверхности насадки, на которой жидкость находится в состоянии движения. Важнейшая роль ее состоит в том, что на границе стекающей по ней жидкости с газом осуществляется массоперенос из одной фазы в другую. Величина активной

поверхности – $a_{\text{акт}}$. определяет эффективность этого процесса в расчете на единицу насадочного слоя в независимости от того перенос в какой фазе является лимитирующим.

В работающем насадочном слое, таким образом, существуют три разного рода поверхности. Одна из них – имеющая постоянную величину, зависящая от формы и размера насадочных элементов, точно измеренная – удельная поверхность – a . Вторая, являющаяся частью удельной поверхности, – смоченная поверхность – $a_{\text{см}}$. $a_{\text{см}}$ образуется при наличии орошения и всегда меньше a . Причины ее более низкой величины: омертвление части поверхности насадки в местах контакта насадочных элементов – $\Delta a_{\text{конт}}$; препятствие смачивания части поверхности вследствие экранирования вышележащими элементами нижележащих – $\Delta a_{\text{экр}}$; отсутствие смачивания части внутренней поверхности элементов – $\Delta a_{\text{вн}}$. Наконец, активная поверхность – $\Delta a_{\text{акт}}$, являющаяся частью смоченной поверхности в режиме пленочного течения и по величине меньше последней на величину части поверхности, занятой застойной жидкостью – Δa_3 . Застойные зоны образуются в местах контакта элементов, а также во внутреннем пространстве насадок кольцевой формы.



а)



б)

Рис. 7.1 Возможное влияние плотности орошения – q и скорости газа – w на величину активной и смоченной поверхности на основании анализа гидродинамической обстановки, складывающейся в насадочном слое:

а – влияние скорости газового потока – w (при $q = \text{const}$);

б – влияние плотности орошения – q (при $w = \text{const}$).

Если абсорбция сопровождается необратимой химической реакцией, часть застойных зон, доступных газу, участвует, в определенной степени, в процессе массообмена [42].

В области пленочного течения $a_{\text{акт.}}$ лишь незначительно растет по мере приближения к точке начала режима подвисяния. В области режима подвисяния $a_{\text{акт.}}$ существенно увеличивается за счет каплеобразования и брызг. Формируется дополнительная активная поверхность - $a_{\text{кан.}}$. Увеличивает $a_{\text{акт.}}$ также и волнообразование на поверхности и жидкости. При приближении к началу захлебывания увеличивающаяся $a_{\text{акт}}$ может превосходить $a_{\text{см}}$, а вблизи захлебывания даже удельную поверхность (см. рис. 7.1).

Однако, поскольку промышленные насадочные аппараты чаще всего работают в области пленочного течения, формирующаяся в них $a_{\text{акт}}$ меньше $a_{\text{см}}$. Соотношение поверхностей в них определяется следующим уравнением [79]:

$$a = a_{\text{см}} + \Delta a_{\text{конт.}} + \Delta a_{\text{экр.}} + \Delta a_{\text{вн.}} = a_{\text{акт}} + \Delta a_{\text{конт.}} + \Delta a_{\text{экр.}} + \Delta a_{\text{вн.}} + \Delta a_3, \quad (7.1)$$

Откуда:

$$a_{\text{акт}} = a - (\Delta a_{\text{конт.}} + \Delta a_{\text{экр.}} + \Delta a_{\text{вн.}} + \Delta a_3). \quad (7.2)$$

Следует подчеркнуть, что все слагаемые в уравнении (7.1), прежде всего, зависят от конструкции насадочных тел, от наличия перфорации и внутренних конструктивных элементов и т.д. Но также в существенной мере и от размера насадочных элементов. Так, например, при увеличении размера колец одной конструкции доля не смоченной поверхности внутри элементов увеличивается.

На величину $a_{\text{см}}$ для насадок одной формы и размера определенное влияние оказывает состояние поверхности элементов. Увеличение шероховатости поверхности имеет положительное воздействие на $a_{\text{см}}$.

7.2. Формирование активной поверхности

Говоря о формировании активной поверхности, следует вновь обратиться к гидродинамической обстановке, складывающейся в насадочном слое при противоточном движении фаз.

При движении газа по системе искривленных каналов переменного сечения в отсутствие жидкости возникает потеря напора ΔP_c вследствие трения потока газа о поверхность насадки. В пределах ламинарного режима течения ($Re_3 < 40-60$) преобладает влияние вязкостных сил. В переходной области ($Re_3 = 60-2000$) все в большей степени оказывают влияние инерционные силы. Турбулентность также увеличивается благодаря кривизне каналов. Для ΔP_c характерна квадратичная зависимость от скорости в любом ее диапазоне.

При подаче жидкости начинается смачивание поверхности элементов насадки. Потенциально возможной для смачивания является поверхность $a - a_{\text{конт.}}$. Однако фактически пределом смачивания является $a - (a_{\text{конт.}} + \Delta a_{\text{вн.}} + \Delta a_{\text{экр.}})$. При низких плотностях орошения не достигается и этот предел смачивания.

Одновременно происходит заполнение жидкостью застойных зон. Размеры их и количество, также как и $\Delta a_{\text{конт.}}$, зависят от конструкции насадки, а для одной конструкции насадки от размера насадочных элементов. В определенной мере это также зависит от поверхностного натяжения и вязкости жидкости.

С увеличением плотности орошения величина $a_{\text{см}}$ растет в степени $\sim 1/3-1/2$. При плотностях орошения $Q \sim 30 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{час})$ и выше в зависимости от размера насадки достигается предел смачивания, характерный для данной насадки. Устанавливается определенная степень смоченности $\psi_{\text{см}} = \frac{a_{\text{см}}}{a}$.

С увеличением q после достижения $a_{\text{см}} = \text{const}$ увеличивается скорость движения жидкости по поверхности насадки, растет толщина слоя

стекающей жидкости, суживая тем самым сечение межзерновых каналов. При подаче одного и того же количества газа увеличивается его истинная скорость, что ведет к повышению гидравлического сопротивления. Таким образом, каждой увеличившейся плотности орошения q соответствует свое увеличившееся ΔP . При этом сохраняется зависимость $\Delta P = f(w^2)$ вплоть до точки начала подвисяния. В пределах режима подвисяния ΔP зависит от скорости газа в ~ 4 степени. Такая картина характерна для всех нерегулярных насадок. Типичная взаимозависимость ΔP , q и w была показана на рис. 4.24.

Формирование активной поверхности начинается с момента начала формирования смоченной поверхности и завершается с завершением формирования последней. По своей величине она меньше смоченной на величину Δa_3 и численно равна $a_{\text{акт}} = a_{\text{см}} - \Delta a_3$. Доля активной поверхности составляет $\psi_a = \frac{a_{\text{акт}}}{a}$.

При постоянстве плотности орошения q величина $a_{\text{акт}}$ сохраняется практически постоянной в диапазоне нагрузок по жидкости, когда при нисходящем движении жидкость имеет гладкую поверхность. Лишь при приближении к скорости начала подвисяния на поверхности жидкости возникает сначала незначительное, затем увеличивающееся со скоростью газа волнообразование. В области подвисяния оно достигает значительной величины. Волнообразование увеличивает активную поверхность на величину $\Delta a_{\text{волн.}}$. Она становится равной $a_{\text{акт}}$ при отсутствии волн плюс $\Delta a_{\text{волн.}}$. Однако в пределах пленочного режима, в котором обычно осуществляются промышленные процессы, величина $\Delta a_{\text{волн.}}$ невелика. Также в пределах пленочного режима невелика величина активной поверхности, формирующаяся в объеме за счет капель и брызг - $\Delta a_{\text{кап.}}$. Таким образом, слагаемыми активной поверхности являются: часть смоченной поверхности - $a_{\text{см}} - \Delta a_3$ плюс прирост активной поверхности за счет волнообразования - $\Delta a_{\text{волн.}}$, плюс прирост активной поверхности,

сформировавшейся в объеме - $\Delta a_{\text{кап.}}$. В итоге для величины активной поверхности можно записать:

$$a_{\text{акт}} = a - (\Delta a_{\text{конт.}} + \Delta a_{\text{экр.}} + \Delta a_{\text{вн}} + \Delta a_{\text{з}}) + \Delta a_{\text{волн.}} + \Delta a_{\text{кап.}} \quad (7.3)$$

Если слагаемые уравнения (7.3), заключенные в скобках, можно считать независимыми от скорости газа и плотности орошения, то два последних слагаемых изменяются в зависимости от нагрузок. В то же время можно полагать, что величина $\Delta a_{\text{вн}}$ при больших нагрузках по жидкости может несколько уменьшаться. Однако этот вопрос остается неизученным.

7.3. Влияние различных факторов на величину активной поверхности

На величину активной поверхности в первую очередь влияют геометрические характеристики насадки, а также ее конструкция. Влияние геометрических характеристик рассматривается в [79].

С уменьшением размера насадочных элементов увеличивается их удельная поверхность (о связи удельной поверхности с размером насадки см. раздел 6.1). С увеличением a соответственно увеличивается и смоченная поверхность, а также и активная поверхность. При этом следует учесть, что с уменьшением размера элементов существенно увеличивается число контактов соседних элементов друг с другом, увеличивая тем самым величину $\Delta a_{\text{конт.}}$. Хотя при снижении размера элементов улучшается омывание их внутренней поверхности, из-за увеличения их числа увеличивается величина $\Delta a_{\text{вн}}$. Одновременно увеличивается и число застойных зон, вызывая увеличение $\Delta a_{\text{з}}$. И хотя суммарная абсолютная величина $\Delta a_{\text{конт.}} + \Delta a_{\text{вн}} + \Delta a_{\text{з}}$ растет, все же рост удельной поверхности превалирует, и потому активная поверхность в целом увеличивается. При этом a и $a_{\text{акт}}$ увеличиваются не прямо пропорционально. В то же время по мере снижения размера насадочных элементов ψ_a уменьшается.

По мере снижения размера насадки a увеличивается и, естественно, что одно и то же количество жидкости при $q = \text{const}$ покрывает на большей поверхности ее меньшую долю.

Сказанное выше иллюстрируется также кривыми на рисунке 7.2, где представлены зависимости $\varphi_a = f(d)$ при $q = \text{const}$. Как это видно, закономерность роста φ_a с увеличением d одинакова для всех нагрузок по жидкости (кривые практически симбатны), хотя изменение величины φ_a для насадок разных размеров при одинаковом увеличении q различаются из-за отличия в величинах a .

Так, например, сравнение значений φ_a для насадок размером $d = 15$ мм и 25 мм при $q = 10$ м/ч и 50 м/ч показывает, что для насадки $d = 15$ мм отличия в значениях φ_a для $q = 50$ м/ч и 10 м/ч составляют $\sim 90\%$, а для насадки $d = 25$ мм $\sim 33\%$. То же различие для насадки размером $d = 50$ мм составляет всего $\sim 18\%$.

Представленные на рисунке 7.3 кривые зависимости $\varphi_a = f(q)$ для насадок разного размера подтверждают сказанное выше о закономерности формирования активной поверхности с увеличением нагрузок по жидкости. Характер кривой для насадки размером $d = 15$ мм показывает, что для нее из-за большой удельной поверхности формирование $a_{\text{акт}}$ видимо, завершится при плотности орошения примерно ~ 80 м/ч или более.

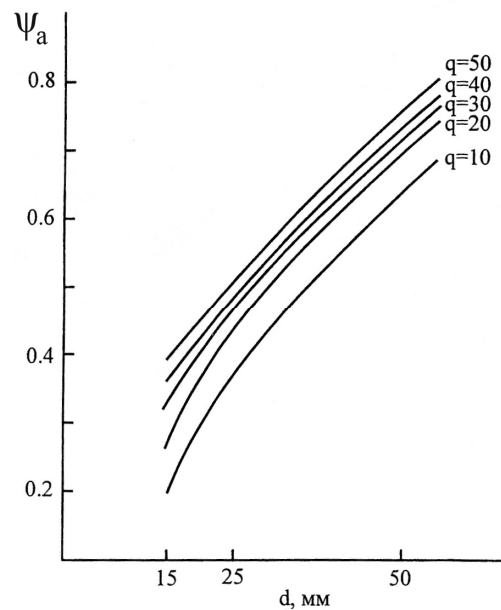


Рис. 7.2 Зависимость доли активной поверхности ψ_a колец Рашига от их размера d , мм при различных плотностях орошения q м/ч.

Существенно влияние на величину активной поверхности конструкции насадки. Если для двух насадок разной конструкции, но равной удельной поверхности, в одной из них существенно меньше экранирование, число точек контакта, лучше омывается внутренняя поверхность элементов, меньше число застойных зон, т.е. у нее сумма $\Delta a_{\text{конт.}} + \Delta a_{\text{экр}} + \Delta a_z + \Delta a_{\text{в}}$ заметно меньше, то у нее на величину разницы этих сумм активная поверхность больше.

В пределах пленочного режима при $q = \text{const}$ скорость газа практически не оказывает влияния на величину активной поверхности [127]. Как уже говорилось выше, лишь вблизи скорости начала подвисяния на поверхности жидкости возникают волны, увеличивающиеся с увеличением скорости. Возникновение волн, равно как формирование поверхности контакта фаз в объеме (капли, брызги), увеличивают активную поверхность. Но в пределах пленочного режима это увеличение незначительно.

Это косвенно подтверждается результатами многочисленных массообменных исследований насадок, в которых было установлено, что в пределах пленочного режима эффективность массопереноса не зависит от

скорости газа. В то же время на эффективность массопереноса существенное влияние оказывают нагрузки по жидкости, что подтверждает влияние q на величину активной поверхности.

Для более углубленного анализа этого влияния применительно к насадкам кольцевой формы, в [181] были проведены расчеты величин $a_{\text{акт}}$ колец Палля и Рашига (см. табл. 7.1).

Расчеты производились по формуле:

$$a_{\text{акт}} = \frac{q}{A + Bq}, \quad (7.4)$$

предложенной в [210] по результатам определения $a_{\text{акт}}$ [211] с использованием данных по абсорбции, полученных в [212]. Здесь A и B - коэффициенты, зависящие от формы и размера насадочных элементов.

Результаты расчетов представлены также на рис. 7.3 – 7.5. На рисунке 7.3 приведены кривые зависимости $\phi_a = f(q)$. Они показывают, что с увеличением плотности орошения доля активной поверхности возрастает. Это связано с процессом формирования на поверхности насадки устойчивой движущейся пленки жидкости. Такого рода формирование для насадок размером $d = 50$ мм практически заканчивается при плотности орошения $q \approx 30$ м/ч, для насадки размером $d = 25$ мм - при ~ 50 м/ч. Дальнейшее увеличение q уже больше не увеличивает достигшую предела активную поверхность, а лишь приводит к повышению скорости движения жидкости по насадке. Это снижает сопротивление ее пограничного слоя и тем самым обеспечивает, при сохранении постоянства $a_{\text{акт}}$ увеличение эффективности массопереноса. При этом прирост активной поверхности происходит более энергично при низких значениях q , а с их увеличением темп прироста активной поверхности снижается (рис. 7.4).

На долю активной поверхности оказывает большое влияние размер насадочных элементов (рис. 7.3).

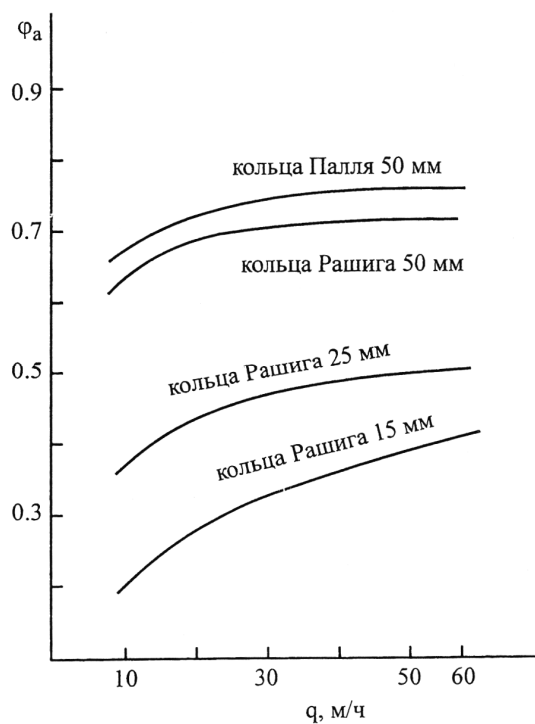


Рис. 7.3 Зависимость доли активной поверхности φ_a колец Палля и Рашига от плотности орошения q , м/ч.

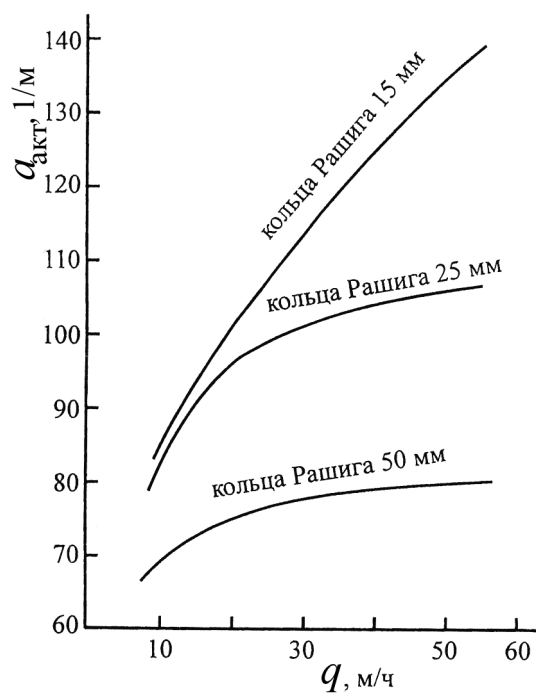


Рис. 7.4 Зависимость активной поверхности $a_{акт}$, 1/м колец Рашига различного размера от плотностях орошения q , м/ч.

Таблица 7.1

Величины активной поверхности насадок, рассчитанные по уравнению (7.4) для различных нагрузок по жидкости

Характеристики	Плотность орошения q , м/ч					Коэффициенты A и B в уравнении (7-4)	
	10	20	30	40	50	A	B
Кольца Палля $d= 50$ мм, $S_{уд} = 109$ 1/м							
$a_{акт}$, 1/м	73.0	79.0	81.3	82.4	83.2	0.021	0.0116
φ_a	0.724	0.745	0.756	0.763	0.724		
Кольца Палля $d= 50$ мм, $S_{уд} = 110$ 1/м							
$a_{акт}$, 1/м	69.0	75.8	78.1	79.4	80.1	0.024	0.012
φ_a	0.631	0.689	0.710	0.722	0.728		
Кольца Палля $d= 25$ мм, $S_{уд} = 220$ 1/м							
$a_{акт}$, 1/м	81.5	96.2	101.7	105	107.1	0.0367	0.0086
φ_a	0.37	0.44	0.46	0.48	0.49		
Кольца Палля $d= 15$ мм, $S_{уд} = 350$ 1/м							
$a_{акт}$, 1/м	70.0	96.3	113.8	126	136.5		
φ_a *)	0.20	0.275	0.325	0.36	0.39		

*) значения φ_a взяты по данным [8]. По ним рассчитывалась $a_{акт}$.

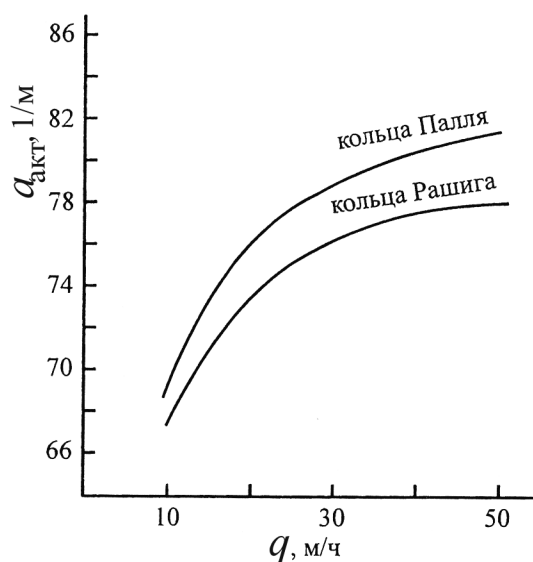


Рис. 7.5 Сравнение активных поверхностей $a_{акт}$, 1/м колец Палля и Рашига размером 50 мм при различных плотностях орошения q , м/ч.

Сравнение величин φ_a для колец Палля и Рашига одного размера 50 мм показывает, что при практически одинаковой удельной поверхности доля активной поверхности колец Палля не намного выше (рис. 7.3).

Соответственно, несколько более высока и активная поверхность (см. рис. 7.5). При $q = 50$ м/ч отличие в $a_{\text{акт}}$ составляет всего $\sim 4\%$. Тем не менее, эффективность колец Палля на $\sim 25\%$ выше [233], что, по-видимому, связано с турбулизирующим воздействием и лучшим перемешиванием жидкости, благодаря отогнутым вовнутрь колец Палля пластинам. Таким образом, получается, что увеличение эффективности колец Палля по сравнению с кольцами Рашига при одинаковых нагрузках на 4% обеспечивается за счет более высокой активной поверхности и на 21% за счет упомянутых выше гидродинамических факторов.

Можно полагать, что результаты приведенного выше анализа закономерности влияния плотности орошения на величину активной поверхности будут действительны и для других типов нерегулярных тепломассообменных насадок.

Полная смачиваемость геометрической поверхности насадок может быть достигнута только для регулярных плоскопараллельных насадок при обеспечении идеального распределения жидкости. В этом случае $a_{\text{акт}} = a_{\text{см}} = a$.

7.4. Определение активной поверхности

В качестве первого приближения решения задачи об определении эффективной межфазной поверхности могут рассматриваться работы по исследованию смоченной поверхности насадочных тел. Среди способов определения смоченной поверхности насадок наибольшее распространение получил прямой метод, связанный с измерением окрашенной поверхности насадочных элементов после орошения колонны раствором краски. Кроме того, использовались косвенные методы, связанные с расчетом смоченной поверхности: на основе сравнения количества жидкости, находящейся в насадке, при данных рабочих условиях и при условии полного смачивания на основе измерения электропроводности жидкости, находящейся при работе в насадочном слое, а также с определением смоченной поверхности

сравнением количеств возогнанного летучего вещества (нафталина), из которого изготавливались насадочные тела, в отсутствии орошения колонны жидкостью и при наличии его. В нескольких работах ограничивались визуальными наблюдениями за смачиванием поверхности насадок. Обзор этих работ приведен в [211].

В целом работы по исследованию смоченной поверхности позволяют в первом приближении оценить характер влияния различных факторов на величину поверхности контакта.

Установленное влияние согласуется с рассмотренным выше в разделе 7.3, несмотря на несогласованность результатов некоторых исследований.

Несмотря на определенные достоинства этих исследований, опытных данных указанных работ недостаточно для определения действительной активной поверхности в отношении протекающих в насадочных колоннах процессов массообмена. Поэтому наибольший интерес представляют работы, в которых непосредственно исследуется влияние различных факторов на поверхность контакта фаз, эффективную для массопередачи.

Методы, используемые для определения эффективной поверхности фазового контакта в насадочных колоннах, сводятся в основном к сравнению интенсивности массообмена для данной насадки при определенных рабочих условиях с его интенсивностью для этой же насадки или ее модели в таких условиях, когда дальнейшее увеличение плотности орошения практически мало сказывается на изменение величины эффективной поверхности или же в условиях с заведомо известной величиной этой поверхности. Используются также и некоторые другие, более косвенные методы, связанные со сравнением гидравлических сопротивлений, или времени пребывания (степеней перемешивания) газового потока в слоях сухой и орошаемой насадки.

В случае если в процессе абсорбции лимитирует перенос в газовой или в жидкой фазе, то для каждого из них требуется иной подход в экспериментах по оценке эффективной поверхности.

Так, при исследовании эффективной поверхности для случаев проведения в насадочных колоннах процессов, скорость которых определяется сопротивлением со стороны газовой фазы, необходимы данные по массоотдаче к однофазному газовому потоку с полной поверхности тел насадочного слоя

Определение эффективной поверхности для абсорбции плохо растворимых газов осложняется тем, что плотность орошения при этом влияет как на поверхность фазового контакта, так и на интенсивность массообмена на этой поверхности. Для определения эффективной поверхности в этом случае использованы методы, связанные со сравнением интенсивностей массоотдачи в жидкостной фазе при проведении абсорбции, с одной стороны, в насадочной колонне и с другой, - в условиях с известной поверхностью фазового контакта.

Из анализа данных различных работ видно, что характер влияния основных факторов (скорость газа, плотность орошения, физические свойства орошающей жидкости) на активную поверхность в основном тот же, что и для смоченной поверхности. Однако количественного совпадения между ними по перечисленным ранее причинам нет.

Расхождения между результатами отдельных работ по исследованию активной поверхности, имеющие место в ряде случаев, обусловлены главным образом отсутствием идентичности экспериментальных данных, полученных некоторыми исследователями в работах по абсорбции и испарению в орошаемых насадочных колоннах.

Наиболее полное исследование по определению активной поверхности в процессе абсорбции, когда лимитирует перенос в газовой фазе, выполнено в [251].

Активная поверхность насадок в различных рабочих условиях определялась методом сравнения интенсивностей массоотдачи в газовой фазе при абсорбции хорошо растворимых газов и при испарении летучего вещества (нафталина) с известной (полной) поверхности насадочных тел в однофазный поток газа.

Значения поверхности фазового контакта находились в виде частных от деления объемных коэффициентов массоотдачи в газовой фазе, вычисленных на основании опытов по абсорбции хорошо растворимого газа, на поверхностные коэффициенты массоотдачи в газовой фазе, найденные из опытов по возгонке нафталина в однофазный газовый поток, при введении корректива, связанного с различием коэффициентов диффузии абсорбируемого и возгоняемого компонентов. Коэффициенты массоотдачи брались для одних и тех же насадок и одинаковых действительных скоростей газового потока относительно поверхности раздела. Для расчета использовалось следующее уравнение:

$$a_{\text{акт}} = \frac{(k, a)_{\text{абс}}}{(k_r)_{\text{нафт}}} \left[\frac{(D_r)_{\text{нафт}}}{(D_r)_{\text{абс}}} \right]^{2/3}, \quad (7.5)$$

где: $a_{\text{акт}}$ - активная поверхность, отнесенная к единице объема насадки, выраженная в $\text{м}^2/\text{м}^3$, $(k_r)_{\text{нафт}}$ — поверхностный коэффициент массоотдачи при возгонке нафталина в $\text{кг} \cdot \text{моль}/\text{м}^2 \cdot \text{час} \cdot \text{мм. рт. ст.}$; $(k, a)_{\text{абс}}$ - объемный коэффициент массоотдачи в газовой фазе при абсорбции в $\text{кг} \cdot \text{моль}/\text{м}^3 \cdot \text{час} \cdot \text{мм. рт. ст.}$; $(D_r)_{\text{нафт}}$ и $(D_r)_{\text{абс}}$ - коэффициенты диффузии нафталина и абсорбируемого компонента в воздухе, выраженные в $\text{м}^2/\text{час}$.

В качестве данных по абсорбции хорошо растворимых газов были использованы результаты по абсорбции аммиака водой из его смеси с воздухом были получены на той же установке (колонна диаметром $\sim 0,5$ м и высотой ~ 2 м) и для тех же типов и размеров насадок (кольцевых, трубчатых, блочных), на которых предпринято исследование [252,392] массоотдачи в однофазный воздушный поток для «испаряющейся» насадки. Это позволило при изучении эффективной поверхности исключить влияние

ряда побочных факторов, могущих отражаться на результатах сравнения данных различных работ.

Результаты исследования для колец Рашига и Палля представлены на рис. 7.6 и 7.7.

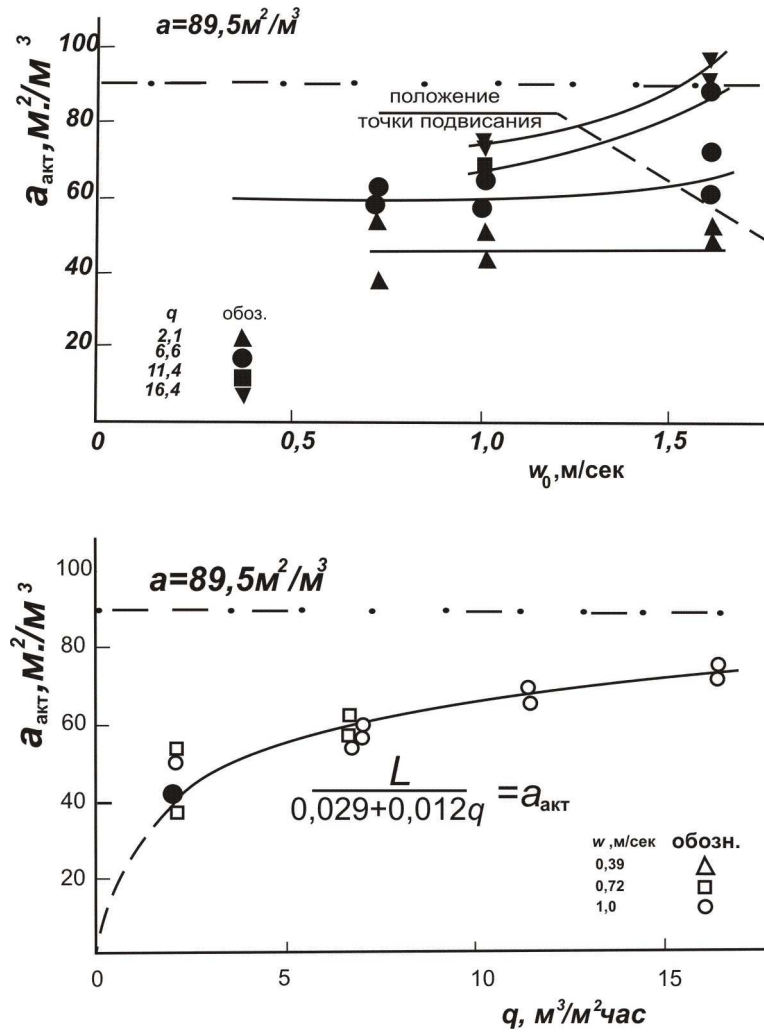


Рис. 7.6 Активная поверхность керамических колец Рашига размером 50 x 50 мм.

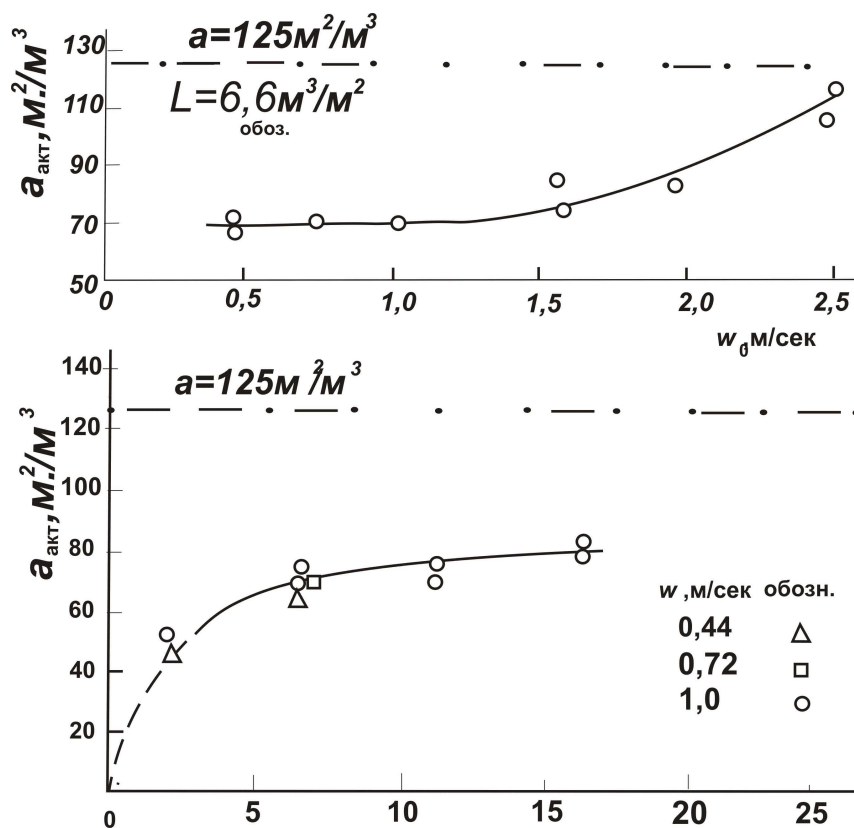


Рис. 7.7 Активная поверхность колец Палля размером 50 x 50 мм.

Увеличение плотности орошения, как видно из тех же рисунков, приводит к возрастанию эффективной поверхности, причем это возрастание носит затухающий характер. В исследованных пределах плотности орошения и при скоростях газа ниже точки подвисяния, полученные результаты удовлетворительно описываются следующими эмпирическими уравнениями:

для колец Рашига 50 x 50 мм, загруженных беспорядочно:

$$a_{акт} = \frac{1}{0.029 + 0.012q}, \quad (7.6)$$

для колец Палля:

$$a_{акт} = \frac{1}{0.021 + 0.016q}. \quad (7.7)$$

Более общая формула для расчета $a_{акт}$ см. уравнение (7.4), величины коэффициентов A и B , в котором представлены ниже:

Таблица 7.2

Величины коэффициентов A и B в уравнении (7.4) [79]

	Размер колец, мм	A	B
Кольца Рашига	25	0.0367	0.0086
	50	0.024	0.012
Кольца Палля	50	0.021	0.0116

Уравнение (7.7) действительно в пределах нагрузок по жидкости до 20 м³/м²·ч и скоростей газа до 1 м/с.

Активная поверхность при абсорбции плохо растворимых газов изучалась в [219]. Результаты были обобщены уравнением:

$$\psi_a = A w_{ж}^{0.455} \sigma^{-m} \quad (7.8)$$

Где $m = bd^{-p}$; $w_{ж}$ – весовая скорость жидкости, кг/м²·с; σ – поверхностное натяжение, мН/м; d – номинальный размер насадки. Значение A , b и p даны ниже:

	A	b	p
Кольца	2.26	0.83	0.48
Седла	0.767	0.495	0.98

В [393] полагают, что при абсорбции плохо растворимых газов ψ_a больше, чем при абсорбции хорошо растворимых. Однако этот вопрос еще недостаточно ясен.

В целом же из результатов изучения $a_{акт}$ следует, что установленное влияние на величину активной поверхности различных факторов согласуется с рассмотренным выше в разделах 7.2 и 7.3 влиянием скорости газа, плотности орошения и других факторов на формирование и величину активной поверхности.

Представляется более простым, хотя, возможно, менее точным, гидродинамический способ определения активной поверхности через измерение количества удерживаемой жидкости – КУЖ. Для этого первоначально в элементе канала прямоугольной формы

плоскопараллельной насадки определяют КУЖ. Стенки канала должны быть выполнены из гладкого материала одинаковой шероховатости с поверхностью насадочных элементов, а орошающая жидкость должна иметь те же показатели вязкости и поверхностного натяжения, что и у жидкости, используемой при орошении насадочного слоя.

Используя описанный выше метод отсечки, определяется динамический КУЖ при различных нагрузках по газу и жидкости. Зная КУЖ и поверхность канала – S_k , которая в плоскопараллельной насадке смачивается на 100%, рассчитывают толщину стекающей пленки жидкости: $\delta = \text{КУЖ}/S_k$.

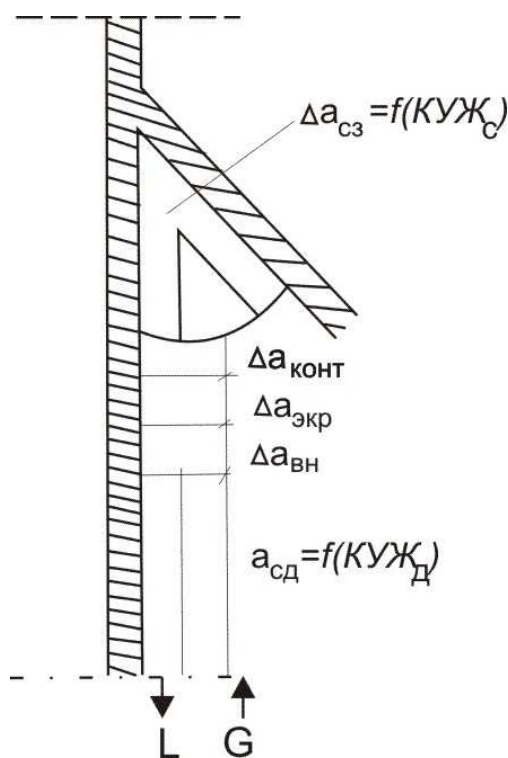


Рис. 7.8 К определению величины смоченной поверхности, омертвленной в застойных зонах жидкости.

Далее, используя метод отсечки, определяют динамический $\text{КУЖ}_{д}$ при тех же q и w в насадочном слое, поверхность которого $S_c = S_k$. Значение величины КУЖ и δ дает возможность рассчитать величину смоченной поверхности насадки, покрытой движущейся жидкостью - $a_{сд} = \text{КУЖ}_{д}/S$. $a_{сд}$ по своей сути равен по величине активной поверхности: $a_{сд} = a_{акт}$.

В данном случае допущением является равенство значений δ в вертикальном канале с непрерывной поверхностью с среднестатистическим значением δ в насадочном слое с искривленной и прерывистой поверхностью. Возможные отличия в величинах δ тем больше, чем выше нагрузки по газу и жидкости. Поэтому определение КУЖ_д в насадочном слое нужно производить при минимально возможных нагрузках по q и w , однако выше тех, что обеспечивают полное возможное смачивание данной насадки.

Возможна оценка и величины поверхности насадки, омертвленной в местах застоя жидкости - $a_{сз}$. Для этого измеряется статический КУЖ_{ст}. Деление величины КУЖ_{ст} на δ дает $a_{сз} = \text{КУЖ}_{ст}/\delta$. Однако это значение $a_{сз}$ будет несколько завышенным, поскольку для расчетов используется весь объем КУЖ_{ст}, а не его доля, приходящаяся на объем пленки жидкости в пределах всего объема КУЖ_{ст} (на рис. 7.8 объем КУЖ_{ст}, завышающий $a_{сз}$ не затемнен). Сумма $a_{сд} + a_{сз}$ дает величину смоченной поверхности $a_{см} = a_{сд} + a_{сз}$.

Значение $a_{см}$, а также величины омертвленной поверхности в местах контакта насадочных элементов - $a_{конт.}$, определенной описанным выше методом через измерение гидравлического сопротивления, делает возможным оценить величину несмоченной части насадки, равную $\Delta a_{экр} + \Delta a_{вн}$:

$$\Delta a_{экр} + \Delta a_{вн} = a - a_{см} = a - (a_{сд} + a_{сз}). \quad (7.9)$$

Как это видно, метод расчета $a_{акт}$ через КУЖ значительно проще упомянутых выше методов определения активной поверхности.

ГЛАВА 8

РОЛЬ АКТИВНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ МАССОПЕРЕНОСЕ

8.1. Определяющая роль активной поверхности в процессах массопереноса

Как отмечено выше, в процессах массообмена в насадочном слое участвует не вся геометрическая поверхность насадки, а лишь часть ее смоченной поверхности, по которой движется пленка стекающей жидкости – активная поверхность. В этом суть определяющей роли активной поверхности. Отсюда понятно и стремление разработчиков насадок обеспечить по возможности ее бóльшую долю в общей поверхности, $\psi_{акт} = a_{акт} / a$ поскольку часть общей поверхности $a - a_{акт}$ остается омертвленной.

Роль активной поверхности, образно говоря, можно сравнить с ролью площади отверстия, через которое происходит истечение жидкости из вертикально стоящего сосуда с постоянным уровнем жидкости по отношению к площади поперечного сечения самого сосуда.

Через поверхность стекающей жидкости на границе ее с газом происходит перенос вещества из одной фазы в другую [97,212,305,438]. Исходя из этого факта, используются модели пограничного слоя

[200,232,234,286,304]. Представляется интересным еще раз вернуться к аналогии между процессами массо- и теплопереноса. В теплообменном аппарате разграничивающая противоточно движущиеся потоки теплообменная поверхность является фиксированной величиной не зависящей от масштаба потоков, а ее термическое сопротивление остается всегда неизменным и зависящим только от теплопроводности материала стенки и ее толщины.

В насадочном слое активная поверхность формируется при наличии встречных потоков газа и жидкости. Ее величина определяется с одной стороны конструкцией насадки и ее удельной поверхностью. Эта часть $a_{\text{акт}}$ остается неизменной после завершения формирования смоченной поверхности. С другой стороны часть активной поверхности может формироваться за счет гидродинамических факторов – нагрузок по газу и жидкости. В этом принципиальное отличие теплообменного аппарата от насадочного.

В свою очередь эффективность массопереноса через активную поверхность насадочного слоя складывается из переноса, обусловленного площадью активной поверхности, и переноса обусловленного турбулизацией пленки стекающей жидкости, связанной со скоростью газа и величиной плотности орошения. Соотношение между этими вкладами не подлежит количественной оценке. Можно лишь говорить о том, что доля второго вклада увеличивается с увеличением нагрузок по газу и жидкости и, в пределах пленочного режима, становится максимальной при приближении к режиму подвисяния.

Необходимо обратить внимание на еще один момент, связанный с величиной активной поверхности, который ранее в литературе не обсуждался. Следует различать активную поверхность касания пленки жидкости с поверхностью насадочных элементов - $a_{\text{акт}}$ и активную поверхность на границе жидкости с газом, которую назовем реальной активной поверхностью - $a_{\text{акт.р.}}$. Значения $a_{\text{акт}}$ и $a_{\text{акт.р.}}$ могут быть близки при

течении жидкости, когда ее поверхность остается гладкой, что имеет место при плотностях орошения и скоростях газа, близких к нижней границе пленочного режима течения. Чем выше эти нагрузки, тем больше различия могут достигнуть вблизи режима начала подвисания.

Волнообразованию на поверхности насадки, увеличивающему различие в значениях $a_{\text{акт}}$ и $a_{\text{акт.р.}}$ также должны способствовать рифление поверхности насадки и нанесение на ее поверхность макрошероховатостей.

Реальную активную поверхность трудно оценить и потому во всех случаях оперируют с величиной $a_{\text{акт}}$ непосредственно на поверхности насадки.

Нельзя отметить, что существование реальной активной поверхности должно внести погрешности в измерение активной поверхности, осуществляемое экспериментально через испарение нафталина (см. раздел 7.4), поскольку в определении $K_{\text{вж}}$ участвует реальная активная поверхность, а в определении $K_{\text{сж}}$ при испарении нафталина действует активная поверхность на стенках насадки [138,212,245].

8.2. Соотношение геометрической и активной поверхности и коэффициента полезного использования насадки

Для более углубленного сравнительного анализа характеристик нерегулярных насадок разной формы или одной формы, разного размера представляется целесообразным использовать три критерия.

Первый из них – насколько геометрическая (удельная) поверхность насадки вовлечена в процессе массообмена. Таким показателем является степень использования или доля активной поверхности $\psi_{\text{акт}} = a_{\text{акт}} / a$. Зависимость $\psi_{\text{акт}}$ от размера насадки показана на рис. 7.2, а зависимость $\psi_{\text{акт}}$ от конструкций насадки на рис. 7.3. В разделе 7.3 обсуждается влияние на $\psi_{\text{акт}}$ различных факторов.

Вторым критерием является эффективность массопереноса сравниваемых насадок, приходящихся на единицу объема слоя. Речь идет не об экономичности насадки, которая характеризуется величиной потери напора, приходящейся на единицу переноса, а именно от эффективности процесса массопередачи, которая может оцениваться, например, объемным коэффициентом массоотдачи $\beta_{вж}$ (если лимитирует перенос в жидкой фазе).

Если при сравнении двух насадок, у одной из них величина удельной поверхности существенно выше $a' > a''$, то априори ясно, что первая насадка должна быть более эффективна. Если насадки имеют равную или близкую удельную поверхность, то более эффективна та, у которой $\beta'_{вж} > \beta''_{вж}$.

Из анализа механизмов формирования активной поверхности следует прямо пропорциональная зависимость величин $\beta_{вж}$ и $a_{акт}$, а значит, сравнительная оценка значений $\beta_{вж}$ различных насадок позволяет одновременно косвенно судить и об относительных величинах их активной поверхности.

Для более углубленной сравнительной оценки эффективности насадок предлагается ввести понятие о сравнительном показателе эффективности или коэффициенте полезного использования объема насадки - $KПИ_v = \beta_{вж} / \beta_{вжр}$, где $\beta_{вжр}$ - объемный коэффициент массоотдачи реперной насадки (насадки, принятой за базовую для сравнения) [9].

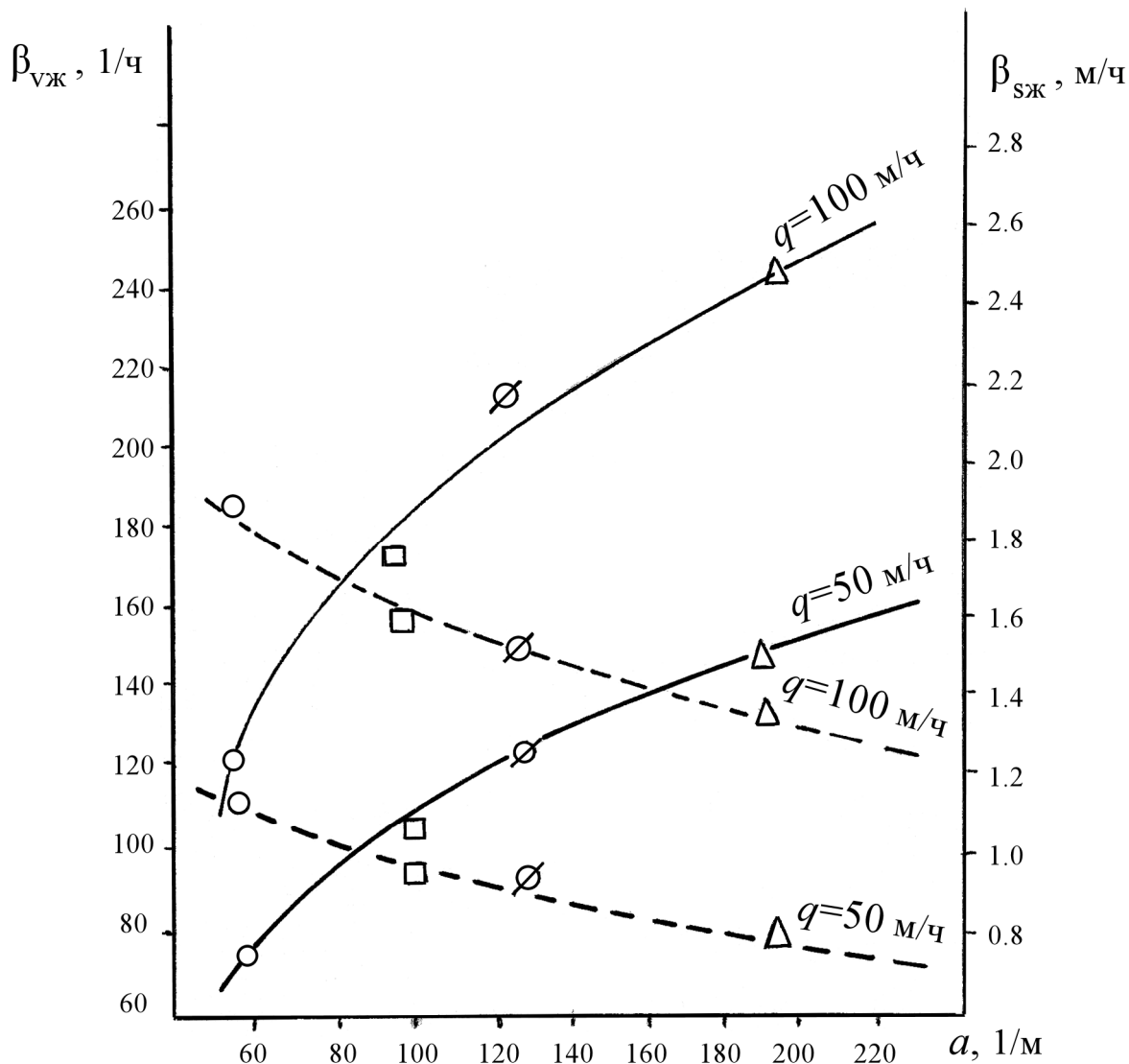


Рис. 8.1 Влияние на коэффициенты массоотдачи насадки ГИАП-НЗ ее удельной поверхности и размера:

— на величину объемного коэффициента массоотдачи - $\beta_{v.ж}$; на величину коэффициента массоотдачи, отнесенного к единице удельной поверхности - $\beta_{с.ж}$. Размер насадки: 80 мм - O, 50 мм - □, 38 мм - ∅; 25 мм - Δ.

Таблица 8.1

Массообменные характеристики нерегулярных насадок, полученные в процессе десорбции CO₂.

Скорость газового потока $w = 1$ м/с. Плотность орошения $q = 100$ и 50 м/ч

Насадка	a , 1/м	$\frac{a}{a_{к.Рашига}}$, %	$\beta_{v,ж}$, 1/ч		$KПИ_v = \beta_{v,ж} / \beta_{v,ж к.Рашига}$, %		$\beta_{s,ж}$, м/ч		$KПИ_s = \beta_{s,ж} / \beta_{s,ж к.Рашига}$, %	
			q=100 м/ч	q=50 м/ч	q=100 м/ч	q=50 м/ч	q=100 м/ч	q=50 м/ч	q=100 м/ч	q=50 м/ч
Кольца Рашига 50 мм	110	100	94	58	100	100	0.85	0.52	100	100
Кольца Палля 50 мм	109	99.4	149	94	159	162	1.38	0.86	162	165
ГИАП-НЗ 80 мм	60	54.0	126	76	134	131	2.1	1.26	247	242
ГИАП-НЗ 50 мм	101	91.8	172	104	183	179	1.7	1.03	200	198
ГИАП-НЗ 38 мм	127	115.4	211	125	224	215	1.66	0.98	195	189
ГИАП-НЗ 25 мм	185	168.2	236	144	251	248	1.27	0.78	149	150
Седла Инталокс 50 мм	118	107	112	67	119	116	0.95	0.57	111	110

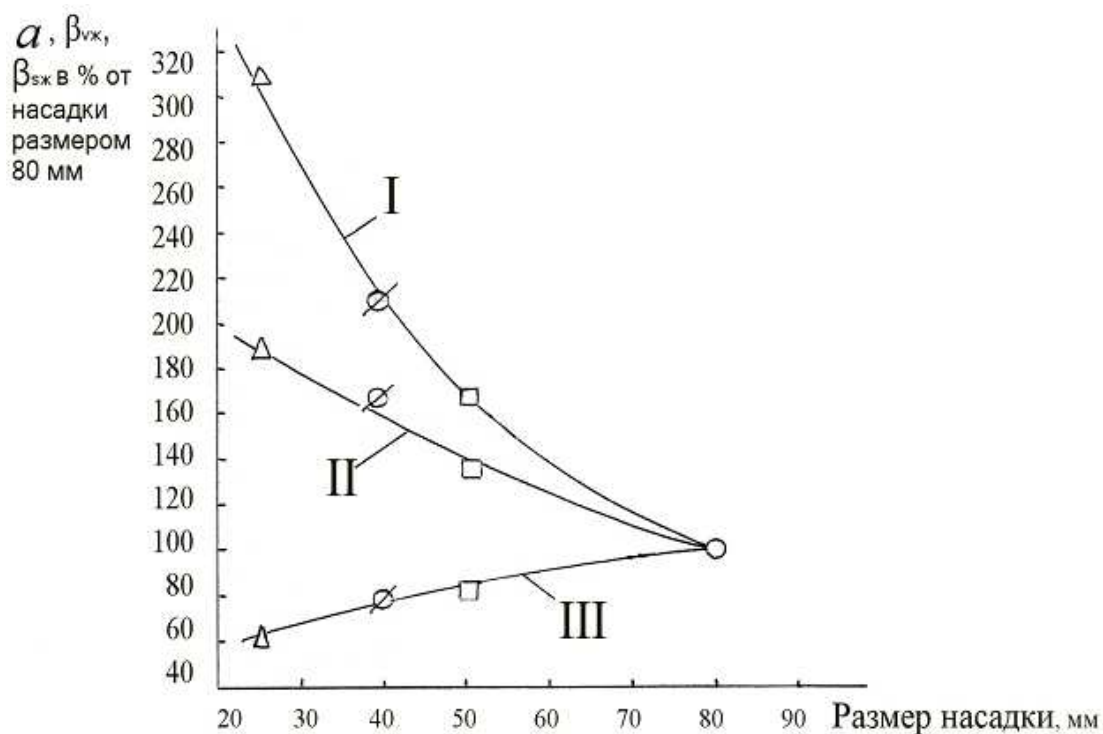


Рис. 8.2 Характер изменения удельной поверхности, а также коэффициентов массоотдачи, отнесенных к единице объема и к единице удельной поверхности при изменении размера элементов насадки ГИАП-НЗ: I – a , II – $\beta_{вк}$. Размер насадки: 80 мм – O, 50 мм – □, 38 мм – ∅; 25 мм – △.

В таблице 8.1 представлены опытные данные для металлических колец Рашига, Палля, насадки ГИАП-НЗ, а также седел Инталлокс, полученные в процессе десорбции CO_2 из воды воздухом в условиях одинаковых систематических погрешностей [7, 8], а также их сравнительные характеристики.

Здесь в качестве отправных для сравнения использованы характеристики колец Рашига, поскольку их поверхность задействована в наименьшей степени при осуществлении массообменных процессов.

Опытные данные представлены для двух нагрузок по жидкости $q = 100$ и 50 м/час и одной нагрузке по газу $w_0 = 1$ м/с. Эти нагрузки лежат в пределах пленочного режима течения жидкости. Для удобства анализа некоторые опытные данные представлены на рис. 8.1÷8.4 и в табл. 8-1÷8-5. Полученные данные позволяют проследить некоторые закономерности во влиянии формы

и размера насадок на эффективность массопереноса, а, следовательно, на формирование активной поверхности, которая ее определяет.

Таблица 8.2

Сравнение эффективности насадок ГИАП-НЗ различного размера

Размер насадки, мм	a , 1/м	a , %	$\beta_{v,ж}$, 1/ч		$\beta_{s,ж}$, м/ч	
			q=100 м/ч	q=50 м/ч	q=100 м/ч	q=50 м/ч
50	101	100	100	100	100	100
25	185	183	137	138	66.2	69.2
80	60	100	100	100	100	100
38	127	211	167	164	78	70

Таблица 8.3

Динамика изменения характеристик насадки ГИАП-НЗ разного размера $w = 1$ м/с; $q = 100$ м/ч

Размер насадки, мм	a , 1/м	a / a_{80} , %	$\beta_{v,ж}$, 1/ч	$\beta_{v,ж} / \beta_{v,ж80}$, %	$\beta_{s,ж}$, м/ч	$\beta_{s,ж} / \beta_{s,ж80}$, %
80	60	100	126	100	2.1	100
50	101	168	172	136	1.7	81
38	127	211	211	167	1.66	79
25	185	308	236	187	1.27	60.4

Третьим критерием назовем степень совершенства насадки. Для этого перейдем от объемных коэффициентов массопередачи $\beta_{v,ж}$ к коэффициентам массопередачи в расчете на единицу поверхности $\beta_{s,ж} = \beta_{v,ж} / a$, 1/ч·м³/м² или м/ч.

Если значения $\beta_{v,ж}$ необходимы для расчета массообменных аппаратов, то $\beta_{s,ж}$ - является показателем совершенства конструкции насадки, ибо эта

величина дает представление о величине переноса, приходящегося на единицу ее геометрической поверхности. Действительно, если для двух насадок различной конструкции значения $\beta_{v,ж}$ окажутся одинаковыми, то та насадка, у которой величина a меньше, является более совершенной. Она будет иметь более высокие значения $\beta_{s,ж}$. Насадка с меньшей a может быть более крупной, иметь меньшее гидравлическое сопротивление, иметь меньший насыпной вес, быть более легкой и дешевой в изготовлении и т.д.

Также введем понятие о сравнительном показателе совершенства насадки или коэффициенте полезного использования поверхности насадки $KПИ_s = \beta_{s,ж} / \beta_{сжр}$, где $\beta_{сжр}$ - коэффициент массопередачи в расчете на единицу поверхности насадки, принятой за базу для сравнения [263].

Значение $KПИ_s$ и $KПИ_v$ для исследованных в [247,251] насадок, представлены в табл. -1 и на рис. 8-4. Как это видно, для более совершенной насадки (кольцо Палля по сравнению с кольцами Рашига) оба эти коэффициента имеют более высокие значения. Для насадок одной формы (насадка ГИАП-НЗ) с уменьшением ее размера значения $KПИ_v$ закономерно увеличиваются с увеличением a , в то же время как значения $KПИ_s$ уменьшаются.

Точка пересечения кривых на рис. 8.4 соответствует оптимальному значению $a = 110 \frac{1}{м}$. Таким образом, значение коэффициентов полезного использования объема и поверхности насадки позволяют определять оптимальный размер насадки.

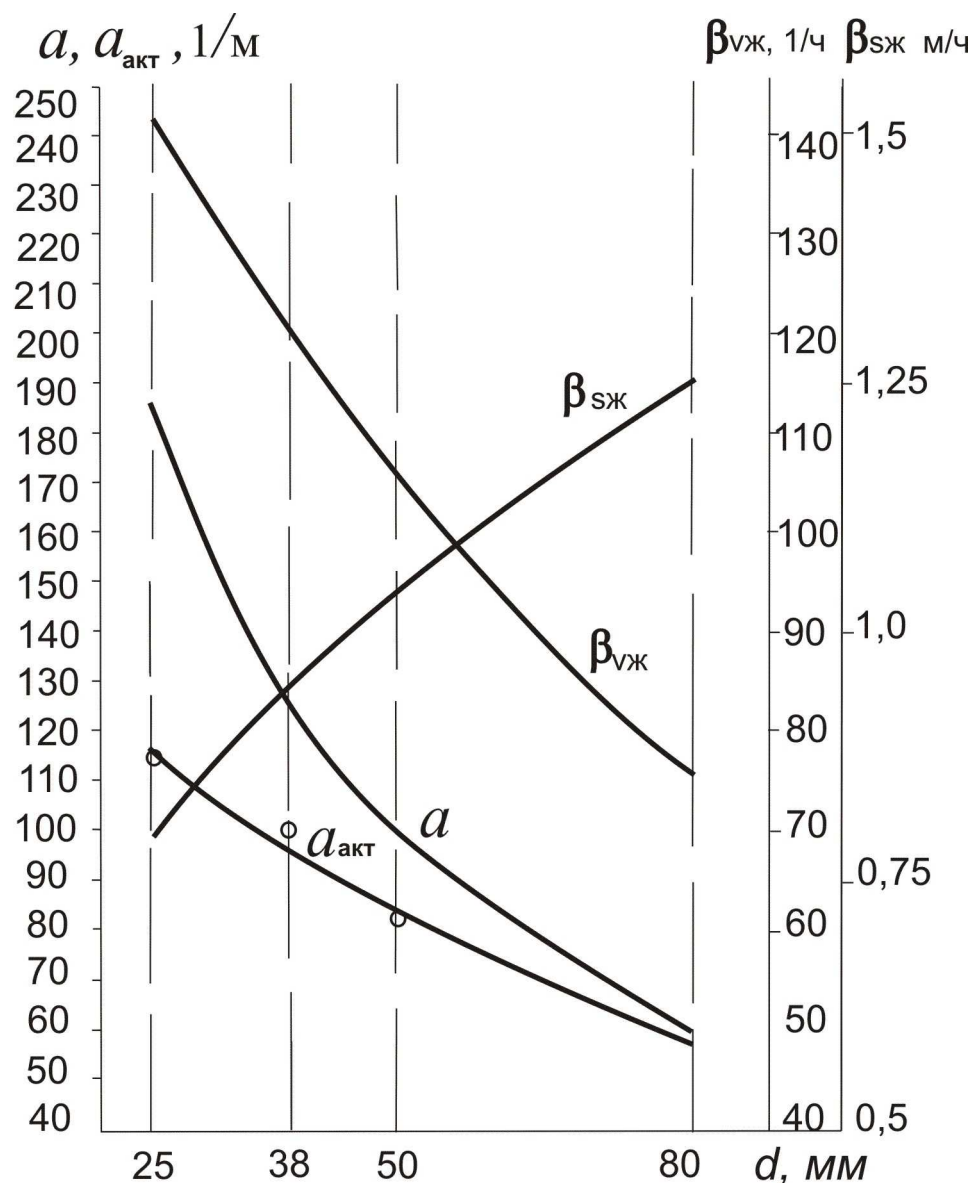


Рис. 8.3 Зависимость удельной – a и активной поверхности – $a_{акт}$, объемного коэффициента массоотдачи $\beta_{вж}$ и коэффициента массоотдачи, отнесенного к единице поверхности - $\beta_{сж}$, от размера насадки ГИАП-НЗ – d .

Установленные закономерности изменения показателей массопереноса и анализ причин этих изменений дают возможность проследить закономерность изменения активной поверхности. В пленочном режиме $a_{акт} < a$, и потому при $\beta_{вж} = const$ $\beta_{сж} < \beta_{сжа}$, где $\beta_{сжа} = \beta_{вж} / S_a$ - коэффициент массоотдачи, который характеризует количество перенесенного вещества, отнесенного к 1 м^2 активной поверхности, т.е. интенсивность переноса в пограничном слое. Эти показатели связаны зависимостью:

$$\beta_{v.эс} = a \cdot \beta_{s.эс} = a_{акт} \cdot \beta_{s.эсa} \quad (8.1)$$

На рис. 8.3 наряду с опытными данными a , $\beta_{v.эс}$, $\beta_{v.эс} = f(d)$, где d – размер насадки, представлен качественный характер закономерности $a_{акт} = f(d)$. Расчетные значения $a_{акт}$ см. в табл. 8.4.

Таблица 8.4

Сравнительные характеристики насадки ГИАП-НЗ

разного размера при $w = 1$ м/с; $q = 50$ м/ч

d , мм	a , 1/м	$\beta_{v.эс}$, 1/ч	$\beta_{s.эс}$, м/ч	$a_{акт}$, 1/м
80	60	76	1.26	59.3
50	101	104	1.03	83.2
38	127	125	0.98	100.0
25	185	144	0.78	115.0

Кривая $a_{акт} = f(d)$ на рис. 8.3 построена исходя из ряда допущений. Первое – отправная точка для построения – значение $a_{акт}$ для посадки ГИАП-НЗ размером 50 мм условно принять равным величине $a_{акт}$ для колец Палля такого же размера. Эта величина рассчитана по уравнению (7.4).

Значения $a_{акт}$ для насадок других размеров рассчитаны из допущения, что изменение эффективности переноса с изменением размера элементов насадки прямо пропорционально изменению величины активной поверхности и определяется только этим.

Сопоставление кривых $a = f(d)$ и $a_{акт} = f(d)$ на рис. 8.3 подтверждает сказанное выше о том, что при снижении размера насадки $\psi_{акт}$ по отношению к a снижается: кривые $a = f(d)$ и $a_{акт} = f(d)$, которая располагается ниже, по мере снижения d , все больше расходятся. Одновременно снижается эффективность в расчете на 1 м^2 геометрической

поверхности (см. кривую $\beta_{s.жс} = f(d)$). Однако $\beta_{v.жс}$ увеличивается (см. кривую $\beta_{v.жс} = f(d)$) из-за увеличения a и соответственно более высокому значению $\beta_{s.жса}$ по отношению к $\beta_{s.жс}$, сохраняя равенство в уравнении (5).

На рис. 8.4 приведены зависимости $KПИ_v$ и $KПИ_s$ от геометрической поверхности насадок ГИАП-НЗ разного размера. Как это видно $KПИ_v$ закономерно растет с увеличением a . Для зависимости $KПИ_s = f(a)$ наблюдается обратная картина.

Характеристики насадок одного размера – 50 мм, но разной формы: колец Рашига и Палля, насадки ГИАП-НЗ и седла Инталокс представлены в табл. 8.1 и 8.5. Форма насадки по-разному воздействует на отдельные факторы, определяющие эффективность массопереноса. Наихудшие показатели по причинам указанным выше, имеют кольца Рашига. За ними следуют седла Инталокс. Кольца Палля намного эффективнее колец Рашига благодаря перфорации, но при этом сохраняют величину удельной поверхности за счет отогнутых вовнутрь элементов лепестков. Это увеличивает как $a_{акт}$, так и турбулизацию пограничного слоя жидкости. По тем же причинам еще более эффективна насадка ГИАП-НЗ, элементы которой более открыты для омывания их внутренней поверхности.

Характерно еще следующее. Если для насадок одной конструкции при снижении ее размера и увеличении a , как говорилось выше, уменьшались значения $\beta_{s.жс}$, но росли значения $\beta_{v.жс}$. То в данном случае при снижении a насадок кольцевой формы увеличиваются как $\beta_{v.жс}$, так и $\beta_{s.жс}$. Это является следствием конструктивных особенностей данных насадок, благодаря которым хотя a снижается, но растет $a_{акт}$. Одновременно усиливается турбулизация пограничного слоя, обновление поверхности контакта фаз, что повышает эффективность переноса в расчете на 1 м² активной поверхности. Эти факторы превалируют над негативным для массопереноса снижением a - насадки.

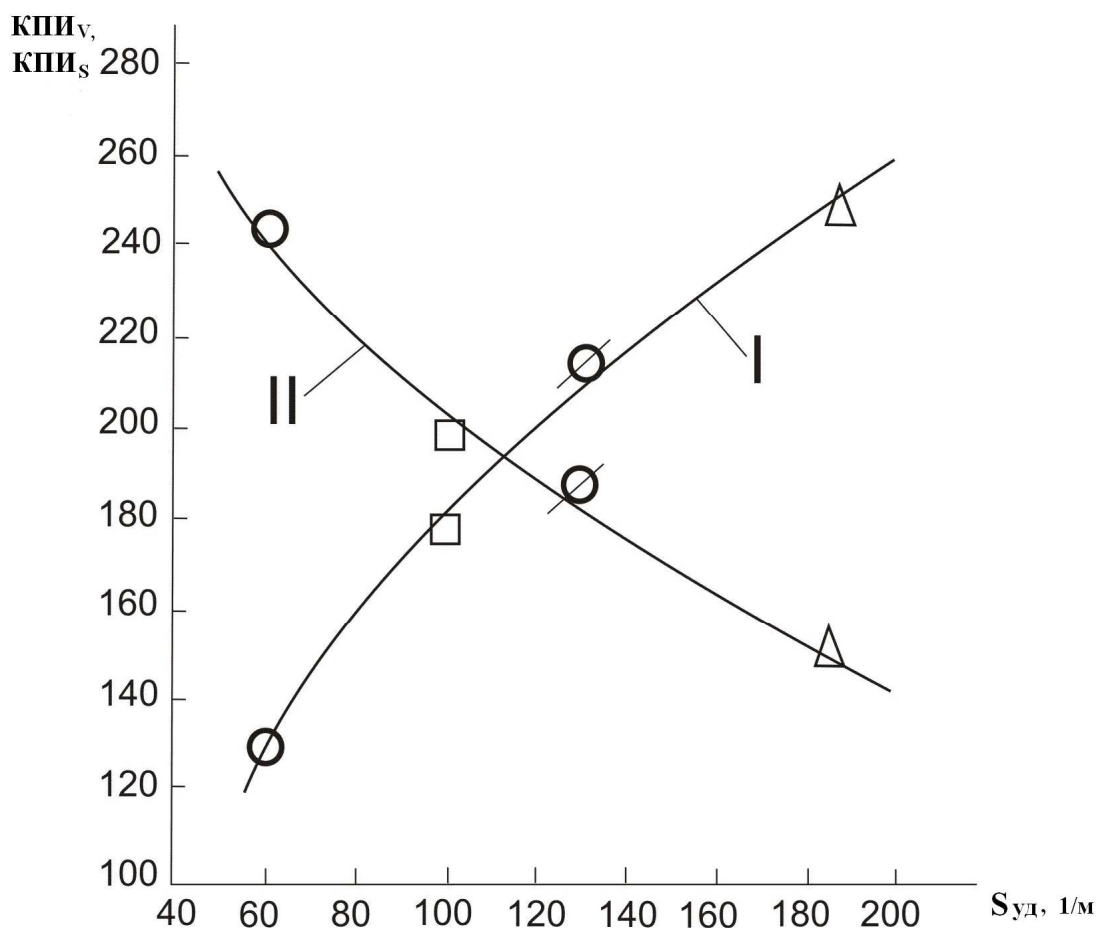


Рис. 8.4 Зависимость коэффициентов KPI_v и KPI_s от размера насадки ГИАП-НЗ. За 100% приняты показатели колец Рашига размером 50мм, $w = 1$ м/с, $q = 100$ м/ч: I – $KPI_v = f(a)$; II – $KPI_s = f(a)$. Размеры насадки: 80мм - ○, 50мм - □, 38мм - ◇, 25мм - △.

Анализ показывает, что из сравнимых насадок насадка ГИАП-НЗ является не только самой эффективной, но и самой совершенной, имея не только наивысшие значения KPI_v , но и KPI_s . Следует отметить, что она также имеет и наилучшие гидродинамические характеристики из числа рассматриваемых насадок. Она обладает наиболее низким гидравлическим сопротивлением и более высокими скоростями начала подвисяния и захлебывания [251].

Таблица 8.5

**Сравнительные характеристики насадок различной конструкции
размером 50 мм при $w = 1$ м/с; $q = 50$ м/ч**

Наименование насадки	a , 1/м	$\beta_{v.ж.}$, 1/ч	$\beta_{s.ж.}$, м/ч	$a_{акт}$, 1/м	$\psi_{акт} = \frac{a_{акт}}{a}$	$\beta_{s.ж.а}$, м/ч
Седла Инталокс	118	67	0.57	59.3	0.5	-
Кольца Рашига	110	58	0.52	80.5	0.73	0.72
Кольца Палля	109	94	0.86	83.2	0.76	1.13
ГИАП-НЗ	101	104	1.03	92.0	0.91	-

Значения $a_{акт}$, представленные в табл. 8.5 для колец Рашига и Палля, рассчитаны по уравнению (7.4). Для колец Рашига: $A = 0,024$, $B = 0,012$. Значения $a_{акт}$ для насадки ГИАП-НЗ и седел Инталокс рассчитывались, как это делалось выше, исходя из допущения, что эффективность массопереноса при w_0 и $q=const$ целиком определяется величиной $a_{акт}$. Для случая, когда рассматривалось влияние размера насадки, имеющей одну геометрическую форму, это было корректно, то для насадок отличающихся формой, это вносит погрешности. Отличия в форме насадки обуславливают не только различие в значениях a и $a_{акт}$, но вызывают различное турбулизирующее воздействие на пограничный слой жидкости, ее перемешивание и т.д. Поэтому сопоставление $a_{акт}$ насадок различной формы в табл. 8-5 носит качественный характер.

Как это видно из сравнимых насадок, доля омываемой поверхности наиболее высока для насадки ГИАП-НЗ, элементы которой, как уже говорилось, наиболее открыты для омывания обоими потоками. Этот же показатель наиболее низок для седел Инталокс, видимо, из-за высокой

степени экранирования. В то же время близость этого показателя для колец Рашига и Палля представляется сомнительной, так как кольца Палля намного более открыты, чем кольца Рашига. Возможно, близость показателей объясняется недостаточной точностью расчета активной поверхности по уравнению (7.4). В то же время значения $\beta_{с.жса}$ для этих насадок сильно различаются. Для колец Палля оно намного выше. Отсюда следует вывод, что форма колец Палля не намного увеличивая по сравнению с кольцами Рашига свою $a_{акт}$, одновременно значительно активизируют массоперенос через пограничный слой в расчете на 1 м² активной поверхности.

Сказанное выше об активной поверхности, ее соотношение с удельной поверхностью и о влиянии на это соотношение конструкции и размера насадочных элементов и другое позволяет осуществлять более углубленную сравнительную оценку нерегулярных насадок.

8.3. Возможности увеличения активной поверхности насадки

Возможности увеличения активной поверхности насадки вытекают из анализа рассмотренных выше факторов, влияющих на величину $a_{акт}$.

Таковые возможности рассмотрены в [286,392,393], а также ниже в главе 12. Их можно разделить на три группы.

К первой относится все, что связано с поверхностью насадочных элементов. Прежде всего, это нанесение на их поверхность микрошероховатостей, способствующих лучшему сцеплению поверхности со стекающей по ней жидкостью. Особенно это касается металлических и пластмассовых насадок с гладкой поверхностью. Такого рода мероприятия могут привести к увеличению смоченной поверхности и, следовательно, активной поверхности.

Второе – это формирование на поверхности насадок макрошероховатостей из комбинации выступов и впадин. Хотя при этом смоченная и активная поверхность могут увеличиваться незначительно,

увеличивается турбулизация пленки жидкости и эффективность массопереноса, особенно когда лимитирует перенос в жидкой фазе.

Третье – рифление поверхности насадочных элементов. Это увеличивает протяженность как смоченной, так и активной поверхности, одновременно увеличивая турбулизацию и эффективность массопереноса в жидкой фазе. Этот проем использован в конструкциях некоторых разновидностей колец Палля и миниколец, а также в седловидной насадке Инжехим 2002.

Ко второй группе относится улучшение или разработка новых конструкций насадок. Оно должно преследовать несколько целей:

1. Разработка конструкций, обеспечивающих сведение к минимуму точек контакта между соседними элементами, а также минимизация площади контактов. В идеале – это достижение точечных контактов между элементами.

Это существенно уменьшит омертвленную площадь поверхности насадки – $\Delta a_{\text{конт}}$. Одновременно уменьшится количество и объем застойных зон («карманов») вблизи мест контакта элементов. В конечном итоге снизится часть поверхности насадки, омертвленная застойной жидкостью – Δa_3 . В результате увеличиваются смоченная и активная поверхности. Примером могут служить улучшение этих показателей для колец Палля по сравнению с кольцами Рашига.

2. Разработка конструкций, обеспечивающих большую открытость внутренней полости насадочных элементов для увеличения смачивания внутренней поверхности. Это приведет к снижению площади $\Delta a_{\text{вн}}$ и, опять таки, в конечном итоге к увеличению $\Delta a_{\text{акт}}$. Примером использования такого приема может быть насадка ГИАП-НЗ по сравнению с кольцами Палля. В этом отношении особенно успешно решена эта проблема в конструкции миниколец и, в особенности, седловидных насадок и, в первую очередь, насадки Инжехим 2002.

3. Улучшение конструкции внутренних элементов насадки. В конструкциях насадок с отогнутыми вовнутрь лепестками, форма лепестков, их расположение и, в особенности, угол между лепестком и корпусом элемента (избежание острых углов) должны обеспечить минимум «карманов» с застойной жидкостью. Это снизит долю Δa_3 , приходящуюся на внутреннюю полость элементов.

4. Совершенствование перфорации. Обеспечение ее оптимальных размеров. Этому вопросу уделено особое внимание в [299,300,392,393].

Прежде всего, месторасположение перфорации должно обеспечить минимальное экранирование нижележащих элементов и максимальную доступность жидкости вовнутрь самих элементов. Последняя цель может быть достигнута при оптимальных: площади перфорации, размере отверстий перфорации и их числе. В результате должна снизиться величина $\Delta a_{вн}$ и увеличиться смоченная поверхность.

К третьей группе относятся мероприятия, способствующие увеличению $\Delta a_{акт}$ технологического характера. Это, во-первых, использование рабочей нагрузки по жидкости выше плотности орошения, обеспечивающей максимально возможное для данной насадки смачивание ее поверхности. Во-вторых, для достижения наибольшей эффективности рабочие нагрузки по обеим фазам, не выходя за пределы пленочного режима, должны приближаться к нагрузкам, соответствующим началу подвисания. Это обеспечит максимально возможную активную поверхность и эффективность массопереноса.

Таким образом, возможности увеличения активной поверхности во вновь разрабатываемых конструкциях насадок имеются.

Если известны определенные из опыта объемные коэффициенты массопередачи, то для расчета насадочных аппаратов знание поверхности контакта не требуется. Однако для более глубокого понимания процессов массообмена и более обоснованных методов расчета, а также при

моделировании насадочных аппаратов, знание истинной поверхности контактов необходимо.

ГЛАВА 9

СТРУКТУРНЫЕ МОДЕЛИ НАСАДОЧНЫХ АППАРАТОВ

9.1. Структурная модель движения газового потока в аппаратах с насыпной насадкой

Анализ результатов многочисленных опытов по изучению структуры укладки зерен и насыпных насадок различной формы и размеров, опубликованных в работах [4,11,15,16,30,38,40,41,44,54,59 и др.], а также данных по газораспределению в аппаратах с зернистым слоем и насадкой [76,85,86,90,99,100,104] позволяет предложить обоснованную концепцию структурной модели движения газового потока в колонных аппаратах с насыпной насадкой.

Для описания движения газового потока в слое насыпной насадки по аналогии с зернистым слоем может быть использован закон Дарси [153,169,170], который связывает градиент давления ΔP в слое и скорость фильтрации газа W в нем:

$$\Delta P = -\frac{\mu}{h} W (1 + \lambda |W|). \quad (9.1)$$

где: h – коэффициент проницаемости; λ – коэффициент гидравлического сопротивления; μ – вязкость газа, $Па \cdot с$.

Коэффициенты h и λ , соответственно, равны [170]:

$$h = \frac{d^2}{150} \cdot \frac{\varepsilon^3}{(1-\varepsilon)^2}, \quad (9.2)$$

$$\lambda = \frac{\rho d}{87,5\mu} \cdot \frac{1}{(1-\varepsilon)}. \quad (9.3)$$

где: d – характерный средний размер элементов насыпной насадки, м;
 ε – порозность слоя насадки; ρ – плотность газа, кг/м³.

Построенная на уравнениях 9.1 ÷ 9.3 гидравлическая модель химического реактора с неподвижным зернистым слоем в работе [169] и выполненный там анализ показывают, что неоднородности, возникающие в подобных аппаратах, имеют гидродинамическое происхождение, могут достигать заметной величины. При этом гидродинамическое влияние пристеночного слоя с повышенной порозностью сказывается не только в том, что определенная часть газового потока имеет меньшее время пребывания в слое насадки. Согласно расчетам работы [169], более высокая скорость газового потока в пристенной области оказывает подсосывающее (эффект эжекции) действие на довольно широкую область аппарата с насадкой, которая прилегает к пристенной области с повышенной рыхлостью укладки элементов насыпной насадки.

Таким образом, анализ известных расчетных зависимостей, используемых для определения ряда конструктивных и технологических параметров колонных аппаратов с насыпной насадкой, показывает важное значение структуры и особенностей гидродинамики указанных аппаратов на эффективность осуществляемых там тепло- и массообменных процессов.

В основе предлагаемой структурной модели колонных аппаратов с насыпной насадкой лежит схема, показанная на рис. 9.1. Согласно этой схеме выделяются две характерные области аппарата с насадкой – пристенная (pz) и центральная (cz). Каждая из этих условно выделенных областей слоя насадки имеет свои характерные параметры – порозность – ε_{pz} и ε_{cz} , эквивалентный диаметр канала – $d_{ост}$ и $d_{ост}$, коэффициент извилистости – k_{pz} и

k_{cz} , скорость газового потока – W_{pz} и W_{cz} , локальные числа Рейнольдса – Re_{depz} и Re_{decz} , потери напора – ΔP_{pz} и ΔP_{cz} (см. рис. 9.1 и рис. 9.2). Отсюда следуют и соответствующие технологические параметры по обоим характерным областям аппарата – время пребывания τ_{pz} и τ_{cz} , эффективность осаждения капель η_{pz} и η_{cz} , а также режим подвисяния.

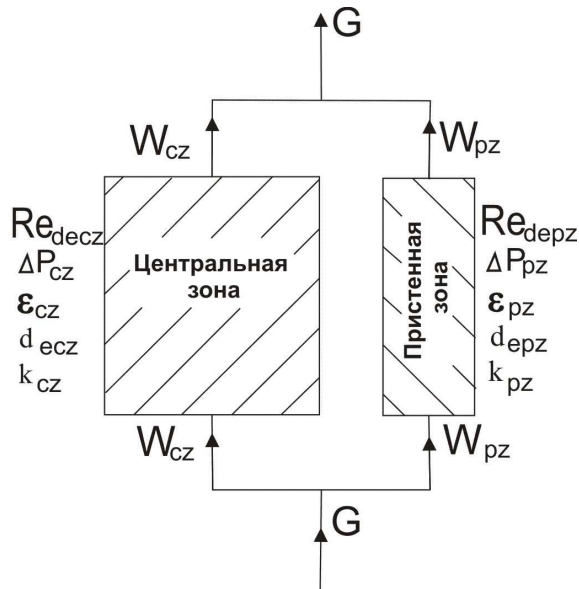


Рис. 9.1 Структурная модель аппарата с насыпной насадкой.

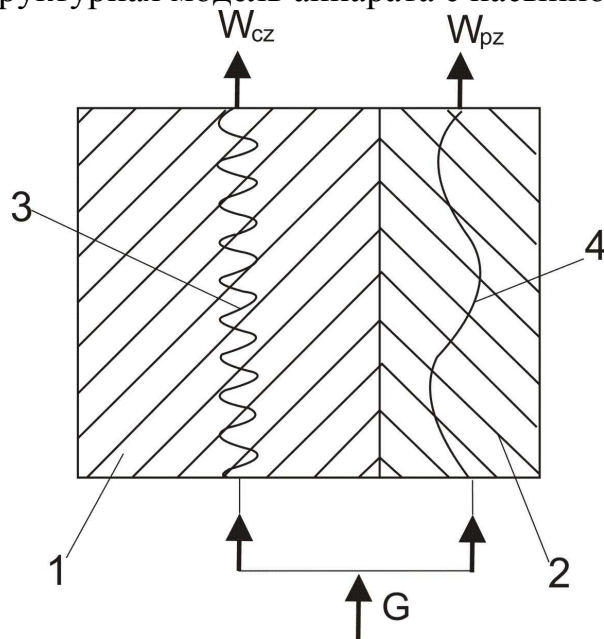


Рис. 9.2 Схема движения газового потока в различных зонах аппарата с насадкой:

1 – центральная зона; 2- пристенная зона; 3 – траектория движения газового потока в центральной зоне аппарата с насадкой; 4 – траектория движения газового потока в пристенной зоне аппарата с насадкой.

Учитывая особенности аэродинамики и структуры колонных аппаратов с насыпной насадкой, используя известное уравнение Эргана [153] для гидравлического сопротивления слоя насадки в предположении, что для обеих характерных областей аппарата с насадкой (пристенной и центральной) выполняется равенство:

$$\Delta P_0 = \Delta P_{cm} = \Delta P_u, \quad (9.4)$$

в работе [186] Ю.Б.Наумовым и др. было получено уравнение для скорости потока в каждой i -той зоне аппарата с насадкой:

$$\frac{W_i}{W_0} = \frac{-A + \sqrt{A^2 + 4 \cdot B \cdot (1 + C \cdot W_0) \cdot W_0}}{2 \cdot B \cdot W_0}, \quad (9.5)$$

где константы A , B , C определяются из следующих выражений:

$$A = \frac{\mu_i}{\mu_0} \cdot \left(\frac{1 - \varepsilon_i}{1 - \varepsilon_0} \right)^2 \cdot \left(\frac{\varepsilon_0}{\varepsilon_i} \right)^3, \quad (9.6)$$

$$C = 1,167 \cdot 10^{-2} \cdot \frac{\rho_0 \cdot d}{(1 - \varepsilon_0) \cdot \mu_0}, \quad (9.7)$$

$$B = C \cdot \frac{\rho_i}{\rho_0} \cdot \left(\frac{\varepsilon_0}{\varepsilon_i} \right)^3 \cdot \frac{1 - \varepsilon_i}{1 - \varepsilon_0}. \quad (9.8)$$

Для оценки средней порозности слоя может быть использовано уравнение [170]:

$$\varepsilon_0 = 0,390 + \frac{0,068}{D/d} + \frac{0,542}{(D/d)^2}. \quad (9.9)$$

Порозность слоя в пристенной зоне можно определить из уравнения:

$$\varepsilon_{cm} = \frac{4d/D}{1 - (1 - 4d/D)^2} \left\{ \frac{1}{2D/d} \left(\frac{D}{d} - \frac{1}{2} \right) \times \left[1 - \frac{2}{3} \cdot \frac{D/d - 5/8}{D/d - 1/2} \cdot (1 - \varepsilon_{min}) \right] + \left[\left(\frac{3}{2} + \frac{4,036}{D/d} \right) \cdot \varepsilon_\infty + \frac{0,286}{D/d} \cdot \varepsilon_{min} \right] \right\}. \quad (9.10)$$

которое получено интегрированием функции распределения порозности по радиусу аппарата. В уравнении (9.10): $\varepsilon_\infty = 0,390$ и $\varepsilon_{min} = 0,230$.

Порозность в центральной зоне можно найти из выражения:

$$\varepsilon_u = \frac{\varepsilon_0 - f_{cm} \varepsilon_{cm}}{1 - f_{cm}}, \quad (9.11)$$

где:

$$f_{cm} = 1 - (1 - 4d/D)^2. \quad (9.12)$$

Из уравнения (9.12) видно, что доля пристенной зоны в общем объеме колонного аппарата с насадкой уменьшается с ростом величины отношения диаметра аппарата – D к среднему размеру элемента насадки – d (D/d).

В работах [76,85,205] в результате статистического обобщения большого количества данных по экспериментальному измерению полей скоростей газового потока в слое шаровой насадки различных размеров был получен обобщенный статистически представительный профиль скорости. При этом процедуру нормировки профиля скорости производили через величину средней максимальной скорости вблизи стенки аппарата с насадкой в j -том измерительном кольце аппарата – W_{\max} . Обобщенный статистически представительный профиль скорости в виде зависимости $W_*/W_{\max}=f(y/d)$ показан на рис. 9.3.

Здесь – W_* – усредненная скорость газового потока в данном j -том измерительном кольце аппарата; y – расстояние от стенки аппарата; d – средний размер элемента насадки.

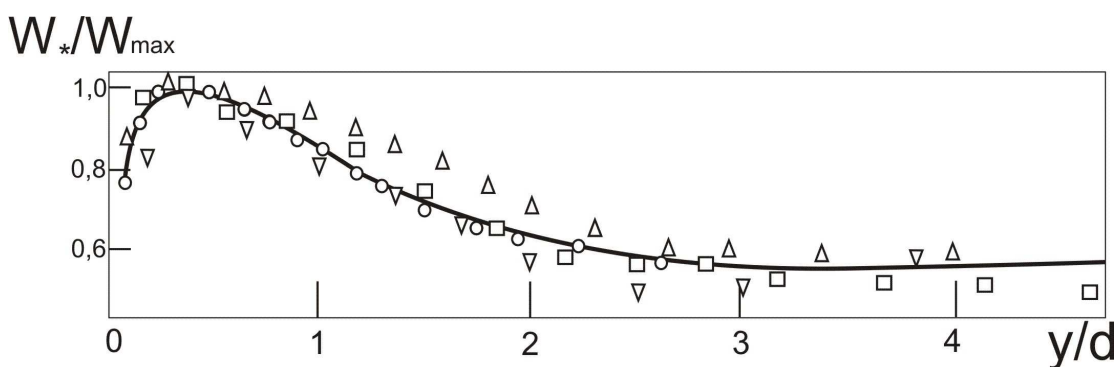


Рис. 9.3 Обобщенный статистически представительный профиль скорости $W_*/W_{\max} = f(y/d)$ по данным опытов работы [76]:

точки – опытные данные, кривая – расчет по уравнению (9.13).

Обобщенный представительный профиль скорости может быть описан уравнением следующего вида:

$$\frac{W_*}{W_{\max}} = \frac{y/d}{A + B \cdot \frac{y}{d} + C \left(\frac{y}{d}\right)^2 + N \left(\frac{y}{d}\right)^3 + E \left(\frac{y}{d}\right)^4 + F \left(\frac{y}{d}\right)^5}, \quad (9.13)$$

где $A=3,74 \cdot 10^{-2}$; $B=8,15 \cdot 10^{-1}$, $C=1,2 \cdot 10^{-1}$, $N=3,06 \cdot 10^{-1}$, $E=-1,16 \cdot 10^{-1}$ и $F=1,14 \cdot 10^{-2}$ определены из экспериментальных данных.

При $y/d \geq 5$ уравнение (9.13) имеет вид:

$$W_* / W_{\max} = 0,65. \quad (9.14)$$

В целом концепцию структурной модели колонного аппарата с насыпной насадкой схематично можно представить в виде эпюр распределения отдельных локальных параметров структуры аппарата и газового потока в двух выделенных характерных областях слоя насадки – пристенной (pz) и центральной (cz) (см. рис. 9.4).



Рис. 9.4 Структурная модель колонного аппарата с насыпной насадкой. Распределение локальных параметров по зонам: 1 – центральная область колонного аппарата с насадкой; 2 - пристенная область с повышенной порозностью; 3 – стенка аппарата; 4 – элементы насыпной насадки.

9.1.1. Геометрические и гидродинамические параметры структурной модели

Геометрические характеристики слоя насыпной насадки в колонном аппарате

Рассматривая течение газового потока в зернистом слое Жаворонков [208] и Аэров [170] вводят понятие об эквивалентном диаметре

$$d_s = d_e = 4\varepsilon/a_v. \quad (9.15)$$

В области насадочных колонных аппаратов применение эквивалентного диаметра канала является вполне оправданным при осуществлении гидравлического и других технологических расчетов указанных аппаратов.

Значительное число опубликованных к настоящему времени опытных данных по геометрическим характеристикам насадок различного типа и размеров позволяют выполнить их обобщение в виде зависимостей порозности – ε и удельной поверхности – a_v от такой важнейшей универсальной характеристики слоя насадки как эквивалентный диаметр канала - d_e . Результаты обобщения представлены на рис. 9.5 и рис. 9.6.

Как видно из графиков зависимости $d_e = f(\varepsilon)$ опытные данные по промышленным насыпным керамическим и металлическим насадкам кольцевой и седлообразной формы описываются двумя различными кривыми (см. рис. 9.5). При этом все керамические и металлические насадки в отдельности описываются разными кривыми. Кривая для насадок из тонкостенных металлических колец расположена существенно выше по сравнению с толстостенными керамическими насадками, что можно объяснить именно влиянием толщины стенки насадки на величину порозности. При значениях эквивалентного диаметра d_e в диапазоне $d_e = 2 \cdot 10^{-3} \div 20 \cdot 10^{-3}$ м, порозность керамических насадок во всех случаях оказалась на 19÷20 % ниже по сравнению с металлическими насадками. При значениях d_e

более $20 \cdot 10^{-3}$ м разница в значениях порозности – ε между керамическими и металлическими насадками уменьшается.

Влияние эквивалентного диаметра насадки - d_e на важнейший геометрический параметр насадки – удельной поверхности – a_v , по результатам обобщения литературных данных представлено на рис.9.6. Из приведенного графика видно, что снижение величины удельной поверхности от $1700 \text{ м}^2/\text{м}^3$ до $350 \text{ м}^2/\text{м}^3$ (в пять раз) приводит к увеличению эквивалентного диаметра насадки от $d_e = 2 \cdot 10^{-3}$ м до $d_e = 10^{-2}$ м, то есть также примерно в 5 раз.

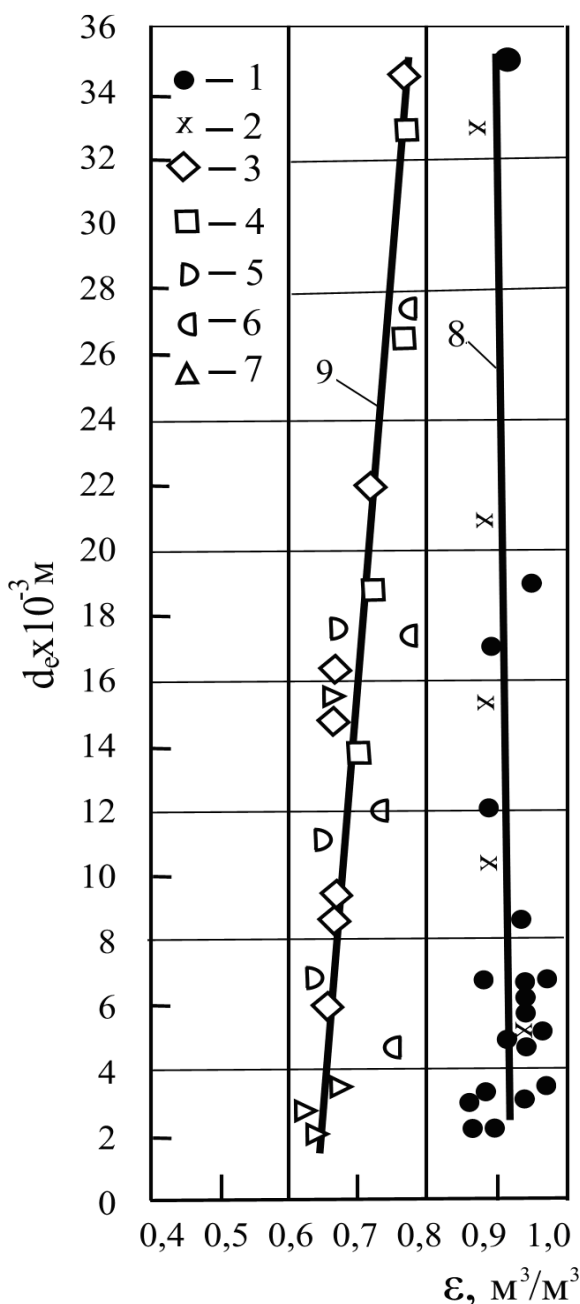


Рис. 9.5 Зависимость $d_e = f(\varepsilon)$ для насыпных металлических и керамических насадок:

- 1 – стальные кольца Рашига;
- 2 – стальные кольца Палля;
- 3 – керамические кольца Рашига;
- 4 – керамические кольца Палля;
- 5 – керамические седла Бёрля;
- 6 – керамические седла Инталокс;
- 7 – данные по керамическим насадкам;
- 8 – обобщающая кривая для металлических насыпных насадок;
- 9 – обобщающая кривая для керамических насыпных насадок.

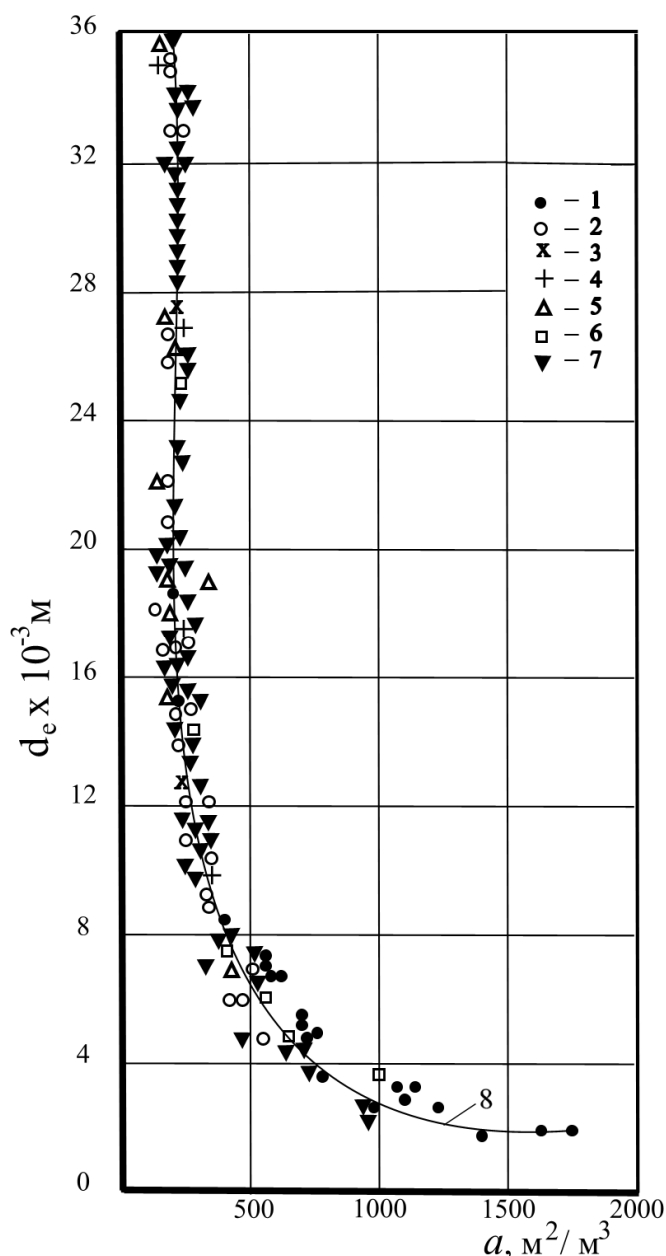


Рис. 9.6 Зависимость величины эквивалентного диаметра - d_e от удельной поверхности насыпных и регулярных насадок - a

1 - различные насыпные насадки по данным [208];
 2 - насыпные насадки по данным Ведерниковой и др. [216];
 3 - насыпные насадки по данным Колева и др. [104];
 4 - насыпная насадка «Инжехим - 2000» по данным [288,294];
 5 - регулярные насадки по данным [216,254];
 6 - насыпная насадка по данным [256];
 7 - насыпная насадка по данным [258];
 8 - расчет по уравнению (9.16).

Представленная на рис. 9.6 зависимость $d_e = f(a)$ для насадок различной формы, насыпных и регулярных, из керамики и металла оказалась универсальной. Зависимость $d_e = f(a)$ для всех промышленных насадок с отклонением, не превышающим $\pm 10\%$, описывается уравнением вида:

$$d_e = A \cdot (a)^n, \quad (9.16)$$

где: $A = 57319$; $n = -1,3985$.

Обобщение опытных данных по геометрическим характеристикам слоя насадок, как насыпных, так и регулярных, позволило установить

универсальный характер зависимости эквивалентного диаметра канала слоя насадка от удельной поверхности для насадок различной формы и размеров. Предложенное в результате обобщения опытных данных уравнение (9.16) позволяет оценить величину эквивалентного диаметра канала слоя насадки по заданному значению ее удельной поверхности.

На рис. 9.7 представлены результаты обобщения опубликованных в литературе [188,272,273,275,288] опытных данных по геометрическим характеристикам миникольцевых металлических насадок

Как видно из приведенных данных зависимости $a = f(\epsilon)$ результаты для различных насадок различных типоразмеров с отклонением, не превышающим + 10 % обобщаются кривой, уравнение которой имеет вид [381]:

$$a = 348,5 \cdot \epsilon^{-0,5}, \quad (9.17)$$

где a , — удельная поверхность насадки, $\text{м}^2/\text{м}^3$; ϵ — порозность $\text{м}^3/\text{м}^3$.

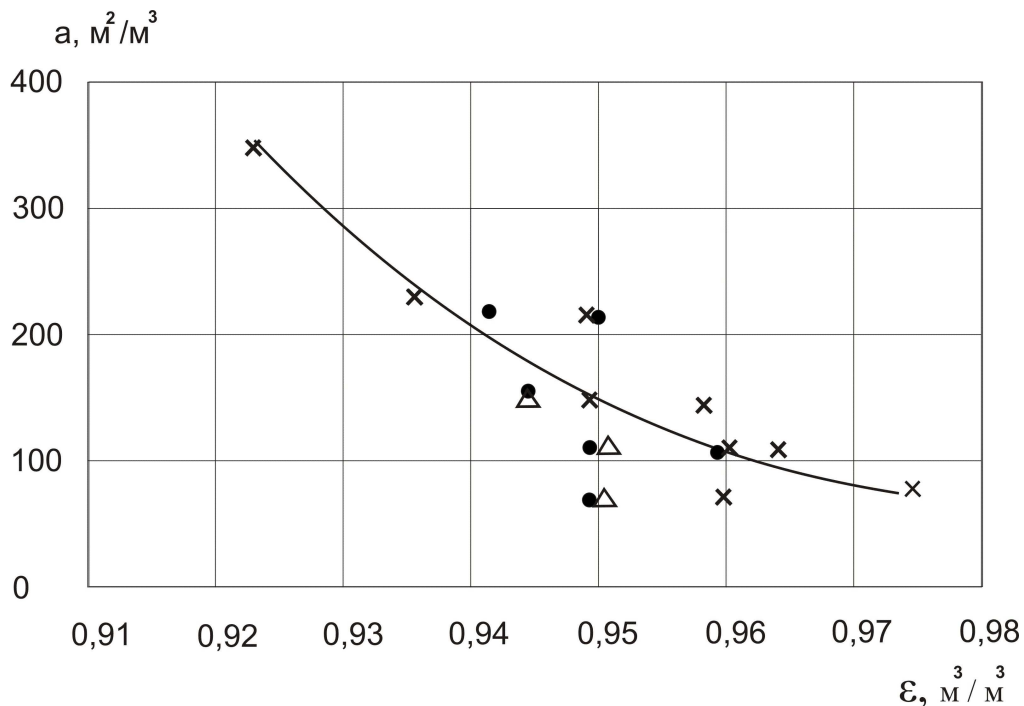


Рис. 9.7 Зависимость удельной поверхности от порозности $a = f(\epsilon)$ для металлических миникольцевых насадок по данным фирм ZEHUA и Norton:

● — Zehua, Super Mini-Ring; × — Zehua, Cascade Mini ring; △ — Norton.

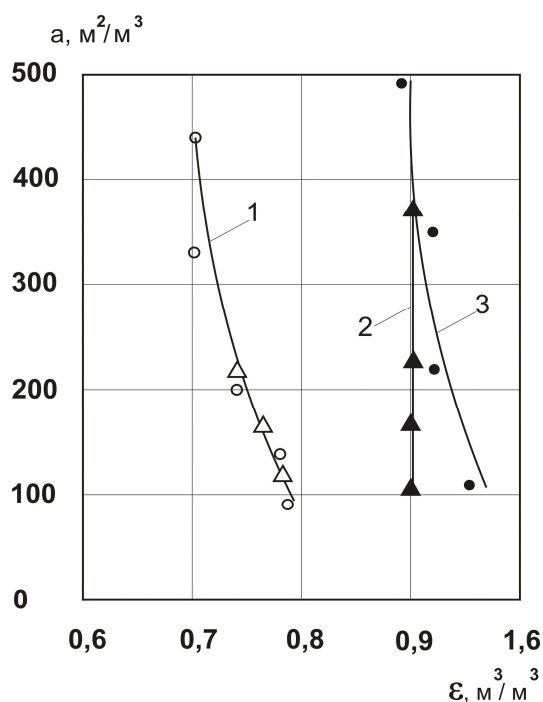


Рис. 9.8 Сравнение зависимостей $a = f(\epsilon)$ для обычных колец из металла и керамики: 1 — кольца Рашига (O) и кольца Палля(Δ) из керамики; 2 — кольца Палля стальные (\blacktriangle); 3 — кольца Рашига стальные (\bullet).

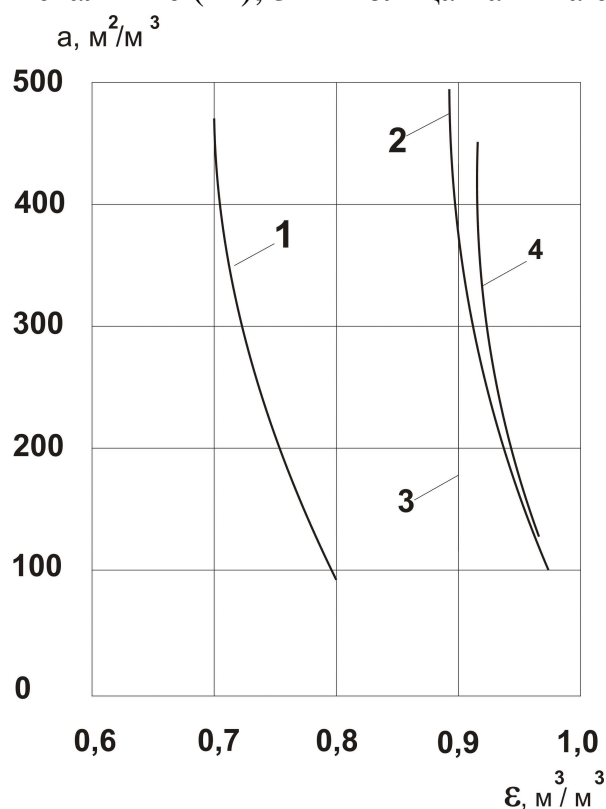


Рис. 9.9 Сравнение зависимостей $a = f(\epsilon)$ для обычных колец и миникольцевых насадок при загрузке внавал: 1 - керамические кольца Рашига и кольца Палля; 2 - металлические кольца Рашига; 3 - металлические кольца Палля; 4 - металлические и пластиковые миникольцевые насадки.

Для оценки влияния величины отношения D/d (т.е. размеров колонного аппарата) на величину средней порозности слоя насыпной насадки кольцевой формы в колонном аппарате можно воспользоваться эмпирическим выражением вида:

$$\varepsilon = \frac{A}{(D/d)^m} + B. \quad (9.18)$$

Выражение (9.18) было получено при $D/d > 2$ и при высоте слоя насадки $H > 20d$ [90]. В формуле (9.18) A , B и m – коэффициенты, зависящие от формы элементов насадки (см. таблицу 9.1).

Таблица 9.1

Значения постоянных коэффициентов в формуле (9.18)

№	Форма насадки	A	B	n
1	Шары	1,0	0,375	2
2	Цилиндрики	0,9198	0,3414	2
3	Куски неправильной формы	0,5	0,35	1
4	Кольца Рашига	0,349	0,5293	1

Графические зависимости порозности слоя насадки отношений $D/d > 2$ для различной формы, полученные по формуле (9.18), приведены на рис. 9.10. Среднее отклонение опытных значений ε от расчетных по формуле (9-18) составляет: для зерен шаровой формы $\pm 5,26$ %, для цилиндров $\pm 12,9$ %, для кусков $\pm 10,47$ %, для колец Рашига $\pm 14,23$ %.

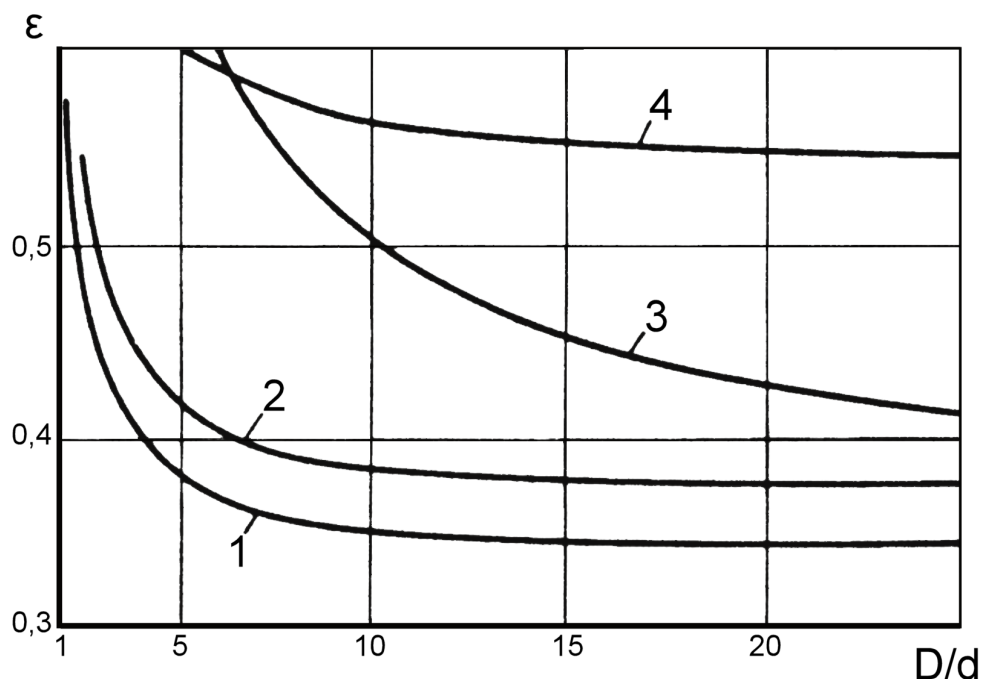


Рис. 9.10 Зависимость порозности от величины отношения D/d для насадок разной формы: 1 — шары; 2 — цилиндрики; 3 — куски; 4 — кольца Рашига.

Величина порозности – $\epsilon_{ст}$ в пристенной области колонного аппарата с металлической насадкой в виде колец Рашига 5x5x1 мм при $D/d = 8$ составляет по данным работ [54,86]:

$$\epsilon_{ст} = 0,8,$$

а величина средней порозности этой же насадки в аппарате составляет:

$$\epsilon = 0,6.$$

Соотношение между двумя этими величинами равно:

$$\frac{\epsilon_{ст}}{\epsilon} = 1,333. \quad (9.19)$$

Соотношение (9.19) является максимальным и распространяется на наиболее используемые на практике типы промышленных кольцевых металлических, пластмассовых и керамических насадок размером до 25x25 мм. При известной величине средней порозности данной насадки соотношение (9.19) может быть использовано для качественной оценки величины порозности в пристенной области. Величина ϵ приведена ниже в таблице 9.2.

Гидродинамические параметры структурной модели

Анализ опубликованных литературных данных [1,54,76,85,86,205] по исследованию поля скоростей в аппаратах с насыпной насадкой показывает известную консервативность ширины области пристенного всплеска удельного расхода газового потока, которая в большинстве случаев составляет $(2,5-3)d$. При этом максимум локальной скорости находится на расстоянии приблизительно $(0,3-0,5)d$ от стенки колонного аппарата с насадкой.

Для расчета профиля скорости в колонном аппарате с насыпной насадкой необходимо определить значение W_{\max} для аппарата с данной величиной отношения (d/D) . Зависимость $W_{\max}/W_0 = f(d/D)$ может быть описана уравнением:

$$\frac{W_{\max}}{W_0} = a\left(\frac{d}{D}\right)^2 + b\left(\frac{d}{D}\right) + c, \quad (9.20)$$

где: $a = -2,39$;

$b = -2,54$;

$c = 1,82$.

Обработка результатов опытов [76,85,99,205] по исследованию газораспределения в аппаратах с различными типами насыпных кольцевых насадок приведена в таблицах 9.2 и 9.3.

Таблица 9.2

Отношение w_{\max}/w_0 для нерегулярных кольцевых насадок

№№ пп	d/D	W_{\max}/W_0	№№ пп	d/D	W_{\max}/W_0
1	0.001	2.25	25	0.078	1.6
2	0.001	1.93	26	0.08	1.46
3	0.005	1.82	27	0.082	1.6
4	0.005	1.63	28	0.085	1.5
5	0.0065	1.58	29	0.09	1.62
6	0.025	1.72	30	0.09	1.8

7	0.025	1.63	31	0.095	1.54
8	0.03	1.54	32	0.102	1.4
9	0.04	1.6	33	0.102	1.5
10	0.042	1.64	34	0.102	1.52
11	0.045	1.6	35	0.102	1.63
12	0.045	1.534	36	0.113	1.55
13	0.044	1.89	37	0.123	1.3
14	0.058	1.55	38	0.123	1.28
15	0.059	1.63	39	0.135	1.3
16	0.062	1.8	40	0.152	1.41
17	0.064	1.92	41	0.152	1.54
18	0.068	1.38	42	0.156	1.48
19	0.068	1.82	43	0.156	1.5
20	0.068	2.0	44	0.164	1.13
21	0.075	1.53	45	0.164	1.42
22	0.075	1.58	46	0.185	1.2
23	0.075	1.66	47	0.185	1.22
24	0.075	1.72	48	0.185	1.30

Таблица 9.3

Результаты опытов по изучению газораспределения в слое насадки

Тип насадки	W_{pz} , м/с	W_{cz} , м/с	W_{pz}/W_{cz}
Кольца MS 10x10 мм	1,0	0,89	1,124
Кольца Рашига 10x10 мм	0,99	0,93	1,0645
Кольца № 1	0,88	0,84	1,0476

Здесь W_{pz} – средняя интегральная скорость в пристенной области; W_{cz} – средняя интегральная скорость в центральной части аппарата. Пристенная область имеет ширину $2d$, а центральная часть аппарата – $(D-4d)$. Координата максимальной скорости составляла $1d_e$. Здесь d – средний размер элемента насадки, d_e – эквивалентный диаметр канала.

Усредненное по данным опытов значение величины отношения (W_{pz}/W_{cz}) для испытанных различных кольцевых насадок составляет:

$$(W_{pz}/W_{cz})_{cp} = 1,079.$$

9.1.2. Применение структурной модели в расчетах насадочных колонных аппаратов

Предлагаемая структурная модель движения газового потока может быть использована при выполнении технологических расчетов ряда насадочных аппаратов, например, абсорберов и насадочных скрубберов [107], а также насадочных аппаратов для очистки газов от жидких и твердых включений [132,250].

Ниже представлены некоторые возможные практические приложения структурной модели движения газового потока в аппаратах с насыпной насадкой. По-видимому, использование элементов структурной модели возможно и при осуществлении расчета разделения гетерогенных систем в насадочных аппаратах.

К расчету гидродинамических характеристик колонных аппаратов при осуществлении процессов абсорбции и десорбции. Режим подвисяния.

Рассмотрим взаимодействие газовой и жидкой фаз контактирующих потоков в режиме противотока. Вначале при малых нагрузках потоков гидродинамическое взаимодействие между фазами незначительно. При этом гидравлическое сопротивление орошаемой насадки пропорционально сопротивлению сухой насадки. Этот режим течения системы газ-жидкость называют пленочным. При увеличении нагрузок по газу и жидкости возрастает трение между взаимодействующими потоками, происходит торможение потока жидкости. В связи с этим увеличивается количество жидкости, которое удерживается в слое насадки потоком газа. Следует отметить, что чем больше скорость газового потока, тем больше количество удерживаемой в режиме подвисяния жидкости. Гидравлическое сопротивление слоя насадки в устойчивом режиме подвисяния пропорционально скорости газа в степени 3-4 [107].

Режим подвисяния представляет большой практический интерес, поскольку, как известно, интенсивность массопередачи в этом режиме значительно возрастает.

Необходимые условия и предпосылки для возникновения режима подвисяния жидкой фазы в противоточных аппаратах создают экстремальные всплески скоростей газового потока вблизи стенки аппарата с насадкой при определенных числах Рейнольдса, характерных для пристенной области слоя насадки с повышенной порозностью. Таким образом, критической скоростью газового потока, соответствующей скорости начала подвисяния, можно считать величину скорости, равную:

$$W_j = W_{j_{\max}} .$$

При этом само явление начала подвисяния жидкости в слое насадки за счет противотока газовой фазы вследствие известной локальности сруй газового потока, пронизывающего слой насадки, также является локальным по всему поперечному сечению аппарата. О распределении поля скоростей газового потока можно судить по экспериментально полученной в работе [76] картине поля локальных скоростей газового потока в слое насадки шаровой формы (см. рис. 9.11).

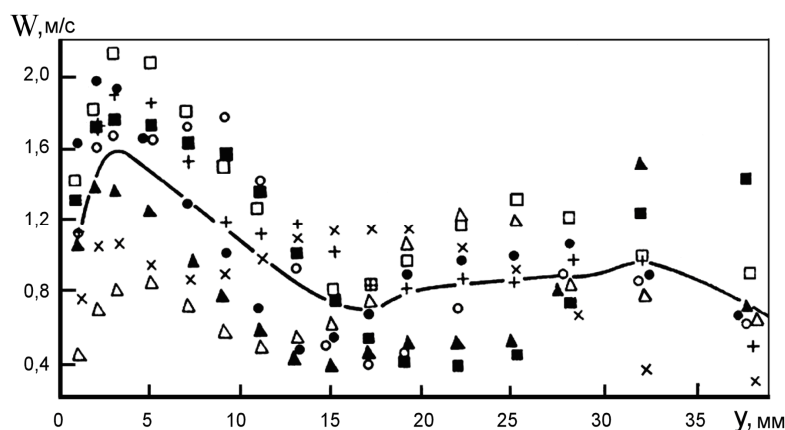


Рис. 9.11 Типичное распределение локальных скоростей газа W по радиусу аппарата (диаметр аппарата $D=94$ мм, диаметр шаровой насадки $d=4$ мм, отношение высоты слоя к $d - H/d=14,2$, средняя скорость потока $W_0 = 1$ м/с); y – расстояние от стенки аппарата, мм.

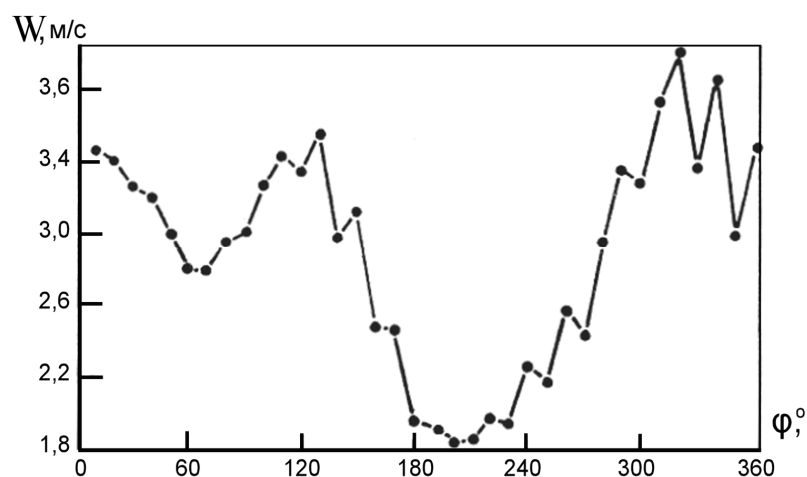


Рис. 9.12 Развертка по окружности локальных скоростей по 36 точкам при $y = 28 \text{ мм} = \text{const}$ ($D=94 \text{ мм}$, $d=14,5 \text{ мм}$, $H=300 \text{ мм}$, $W_0 = 2 \text{ м/с}$).

Особенностью всех названных режимов течения жидкой фазы по активной поверхности насыпной насадки при противотоке, а именно, пленочного режима течения, режима подвисяния и режима эмульгирования является то, что они плавно переходят один в другой. Причем в каждом последующем присутствуют элементы предыдущего режима. Структура слоя насыпной насадки отличается сложностью и многообразием геометрии и живого сечения образуемых каналов, которые постоянно изменяются по всему объему насадки в аппарате. Следствием этой особенности структуры слоя насадки является постоянно перемежающийся характер течения жидкости в слое насадки, обусловленный также пространственной динамикой газового потока. Речь идет о всплесках на эпюрах скоростей газового потока в слое насадки (см. рис. 9.12).

Вообще говоря, начало режима подвисяния можно охарактеризовать как некий промежуточный, перемежающийся во времени и пространстве режим локального псевдоподвисяния. Эффективность массопердачи при этом значительно возрастает. В газовом потоке образуются многочисленные очаги вихревого течения. Движение жидкой фазы при этом в большей части объема аппарата с насадкой еще сохраняет выраженный струйно-пленочный характер течения.

Дальнейшее развитие турбулентного движения газового потока (увеличение скорости газа) приводит к полному подвисянию жидкости в слое насадки. Затем наблюдаются опять-таки локальные нарушения граничной поверхности между потоками взаимодействующих фаз за счет преодоления сил поверхностного натяжения и наступает режим эмульгирования. Особенность режима эмульгирования заключается в том, что жидкая фаза полностью заполняет весь свободный объем слоя насадки, не занятый газом. Жидкость образует сплошную фазу, а газ при этом становится дисперсной фазой, распределенной в жидкости, т.е. происходит инверсия фаз.

Процесс подвисяния начинается не одновременно во всем объеме аппарата с насадкой. Вначале имеют место очаги локального подвисяния. Причем, наибольшая вероятность появления таких очагов в области локальных всплесков скорости приходится на пристенную область. Там скорость газовой фазы выше, чем в центре аппарата с насадкой. Постоянно образующиеся и распадающиеся конгломераты жидкости скатываются вниз в область более низких скоростей газового потока с образованием при этом множественных «воронок слива» по периметру внешней границы пристенной области колонного аппарата с насадкой.

В соответствии с известной формулой [152] при расчете режима захлебывания в настоящее время принимают следующее соотношение между рабочей скоростью газа в колонне – W_0 и скоростью захлебывания – W_3 :

$$W_0 = (0.75 \div 0.85) \cdot W_3. \quad (9.21)$$

Замена величины W_0 на симплекс W_{\max}/W_0 позволяет получить более обоснованное соотношение для расчета режима захлебывания в колонном аппарате с насыпной насадкой. Таким образом, выражение (9.21) будет иметь вид:

$$\frac{W_{\max}}{W_0} = (0.75 \div 0.85) \cdot W_3. \quad (9.22)$$

На рис. 9.13 приведена зависимость величины отношения средне-интегрального значения порозности в пристенной области шириной δ_{sz}

колонного аппарата с насадкой к средней порозности в аппарате. Как видно из зависимости $\varepsilon_{pz} / \varepsilon = f(\delta_{pz} / d)$ наибольшие отклонения ε_{pz} в пристенной области от среднего значения порозности ε приходятся на пристенную зону шириной [387].

$$\delta_{pz} \leq (1-2)d. \quad (9.23)$$

Вследствие различной порозности движение газового потока в обеих характерных зонах аппарата – пристенной (pz) и центральной (cz) траектория движения характеризуется различной величиной извилистости (см. рис. 9.14). Численно величина среднего коэффициента извилистости «k» может быть определена из соотношения вида [388]:

$$k = \left(1 + S_m \cdot N^{\frac{2}{3}} \right)^{\frac{1}{2}}. \quad (9.24)$$

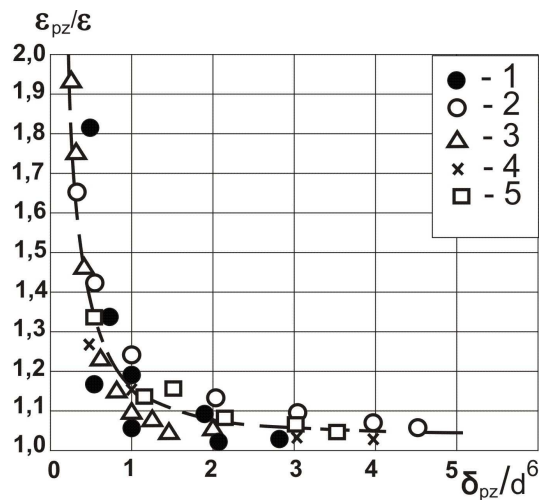


Рис. 9.13 Зависимость $\varepsilon_{pz} / \varepsilon = f(\delta_{pz} / d)$ для зерен шаровой формы различных размеров по данным [387].

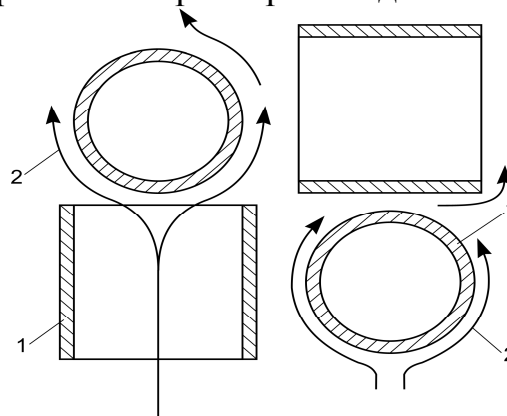


Рис. 9.14 Схема извилистости каналов в слое кольцевой насадки: 1 – элементы насадки; 2 – линии тока газа.

Поступающий в колонный аппарат поток газа наталкивается на своем пути на элементы насадки и обтекает их. При этом различная форма элементов насадки и различное живое сечение (порозность), характерные для слоя насадки в выделенных двух зонах колонного аппарата, приводят к тому, что отдельные струйки будут постоянно отклоняться в ту или другую сторону от основного направления потока (см. рис. 9.14). Это удлинение истинного пути газовых струй внутри слоя насадки можно характеризовать его извилистостью. В работе [170] степень извилистости характеризуют величиной отношения:

$$T = l_{\text{кан}} / l. \quad (9.25)$$

где: $l_{\text{кан}}$ – длина искривленного канала, мм; l – высота выделенного элементарного объема слоя насадки, мм

Как показано в работе [170], степень извилистости слоя насадки значительно зависит от величины порозности. Так, например, для шаровой насадки при $\varepsilon=0,4$ величина $T=1,5$, а при $\varepsilon=0,8$ – $T=1,1$. Можно предположить, что в слое кольцевой насадки величина T будет иметь среднее значение $T \approx 1,3$.

В условиях противоточного движения фаз фиктивная скорость газа в точке подвисяния (захлебывания или инверсии) W_3 рассчитывают по известному уравнению Бейна и Хоугена [152]:

$$\lg \left[\frac{W_3^2 \cdot a}{g \cdot \varepsilon^3} \cdot \frac{\rho_g}{\rho_{ж}} \cdot (\mu_{ж} \cdot 10^{-3})^{0,16} \right] = b - c \left[\left(\frac{L}{G} \right) \cdot \sqrt{\frac{\rho_g}{\rho_{ж}}} \right]^{0,25}, \quad (9.26)$$

где: a – удельная поверхность слоя насадки, $\text{м}^2/\text{м}^3$; $\rho_{ж}$ и $\rho_{г}$ – плотность газа и жидкости, $\text{кг}/\text{м}^3$; $\mu_{ж}$ – динамическая вязкость жидкости, $\text{Па} \cdot \text{с}$; g – ускорение свободного падения, $\text{м}/\text{с}^2$; ε – порозность слоя с учетом наличия жидкой фазы, $\text{м}^3/\text{м}^3$; L и G – массовый расход жидкой и газовой фаз, $\text{кг}/\text{с}$;

b и c – коэффициенты, определяемые опытным путем, зависят от режима работы аппарата и конструкции элементов насадки.

Из формулы (9.26) следует, в частности, что фиктивная скорость газового потока существенно зависит от порозности слоя насадки – ε и

удельной поверхности – a . Из представленных в таблицах 9.4 - 9.6 геометрических характеристик различных насадок видно, что используемые в настоящее время в промышленности насыпные насадки для осуществления процессов тепло- и массообмена в колонных аппаратах имеют величину порозности – ϵ , которая изменяется в следующих пределах:

насыпные насадки – от 0,60 до 0,98;

регулярно уложенные керамические кольцевые насадки - от 0,44 до 0,81.

Вместе с тем, из экспериментальных данных работ [44,54,86] следует, что значения локальной порозности в слое насадки вблизи стенок колонного аппарата – $\epsilon_{ст}$ и в центральной части аппарата – $\epsilon_{ц}$ заметно различаются между собой. Так, например, в случае кольцевой насадки по данным [54,86] эти расхождения составляют от 27,5% до 35,5%.

Таблица 9.4

Геометрические характеристики промышленных насыпных насадок

Тип насадки	Материал	Размеры элемента, мм	Порозность, ϵ , м ³ /м ³	Удельная поверхность, a , м ² /м ³	Масса единицы объема, γ , кг/м ³
Кольца Рашига	Керамика	10x10x1,5	0,70	440	700
		15x15x2	0,72	330	590
		25x25x3	0,74	200	530
		35x35x4	0,78	140	530
		50x50x5	0,785	90	530
	Сталь	10x10x0,5	0,88	500	960
		15x15x0,5	0,92	350	660
		25x25x0,8	0,92	220	640
		50x50x1	0,95	110	430
	Фарфор	5,2x5,4x1,3	0,64	896	1060
	Керамика	4,4x3,7x1,1	0,60	1000	1060
	Кварц	4,1x5,2x0,6	0,65	1380	780
	Стекло	4,1x4,1x0,5	0,71	1300	710
		6,2x6,2x0,6	0,77	850	560
Полихлорвинил	5x5x0,5	0,74	1150	350	
Фторопласт	5,6x5,9x0,9	0,64	920	785	

	Никель	3x3x0,5	0,66	1470	
Кольца Палля	Керамика	25x25x3	0,74	220	610
		35x35x4	0,76	165	540
		50x50x5	0,78	120	520
	Сталь	15x15x0,4	0,93	380	525
		25x25x0,6	0,94	235	490
		35x35x0,8	0,943	170	455
		50x50x1	0,95	108	415
	Полипропилен	15x15	0,87	340	112
		25x25	0,90	206	88
		35x35	0,91	127	76
		50x50	0,90	124	68
	Кольца ГИАП- НЗ	Сталь	25x25x0,6	0,92	281
50x50x1			0,96	101	400
25x25x0,5			0,96	185	400
38x38x0,8			0,96	127	400
50x50x1,0			0,96	101	400
Седла Берля	Керамика	12,5x12,5	0,68	460	720
		25x25	0,69	260	670
		38x38	0,70	165	670
Седла «Интал локс»		12,5x12,5x0,2	0,78	625	545
		25x25x2,5	0,78	255	545
		38x3x4,5	0,81	195	480
		50x50x6,0	0,79	118	530
	Пластмасса	25x25	0,90	206	96
		55x55	0,93	108	60

Таблица 9.5

Геометрические характеристики миникольцевых насадок

№	Фирма-производитель	Тип насадки	Материал	Размер, тип	$a, \frac{m^2}{m^3}$	$\epsilon, \frac{m^3}{m^3}$	$n, шт$	$\rho, \frac{kg}{m^3}$
1	Koch-Glitsch	Cascade mini-ring (CMR)	Металл	Ø25		0,97		237
				Ø38		0,96		285
				Ø44		0,97		241
				Ø50		0,97		202
				Ø63		0,98		160
				Ø90		0,98		125
				Ø125		0,98		108

2	Koch-Glitsch	B-eta Ring	Металли	Ø19		0,97		297
				Ø25		0,97		219
				Ø38		0,98		162
				Ø50		0,98		148
3	Saint-Gobain NorPro Corporation	Intalox Snowflake packing	Металли	50		0,95	4925	45
4	Zenua	Metal Cascade Mini ring	Металли	Ø25				
				25x12,5x0,6	222	0,942	98120	459
				25x12,5x0,5	221	0,951	98120	383
				Ø38				
				38x19x0,8	154	0,945	30040	433
				38x19x0,8	153	0,959	30040	325
			Металли	Ø50				
				50x25x1,0	111	0,951	12340	385
				50x25x0,8	109	0,961	12340	308
				Ø76				
				76x38x1,5	72	0,951	3540	385
	76x38x1,2	72	0,951	3540	306			
5	Zenua	SMR (Super Mini-Ring)	Металли	Ø16 16x5,5	348	0,923	378000	604
				Ø25 25x9x0,5	228	0,936	155000	506
				Ø38 38x12,7x0,7	150	0,95	48000	390
				Ø50 50x17x0,8	115	0,965	21500	275
				Ø75 75x22,5x1,0	88	0,975	5800	200

Таблица 9.5**Геометрические характеристики регулярно уложенных керамических кольцевых насадок [410]**

Тип насадки	Размер	Удельная поверхность	Порозность	Эквивалентный диаметр
Кольца Рашига	25x25x2,4	250	0,81	0,0117
	38x38x4,4	180	0,63	0,014
	50x50x4,4	141	0,69	0,0196
	50x50x5	110	0,735	0,027
	75x75x9,5	92	0,61	0,0266
	80x80x8	80	0,72	0,036
	100x100x10	60	0,72	0,048
	100x100x12,7	69	0,62	0,036
	125x125x14,3	52	0,66	0,0508
150x150x16	46	0,67	0,0582	
Спиральные кольца	75x75	140	0,59	0,0169
	100x75	100	0,6	0,024
	150x150	65	0,67	0,0412
	152x152	89	0,6	0,027
Кольца с перегородками	75x75	135	0,44	0,013
	100x75	110	0,53	0,0193
	100x100	105	0,58	0,0221
	150x100	72	0,5	0,028
	150x150	65	0,52	0,032
Рифленые кольца	76x76	95	0,64	0,027
	152x152	49	0,58	0,047
Кольца Палля	50	155,2	0,754	0,019

На рис. 9.15 представлена зависимость $W_0 / W_3 = f(\epsilon)$ для случая движения жидкой фазы в реакторе гидрирования с катализатором в виде сферических гранул.

Где: W_0 – средняя линейная скорость газовой фазы в расчете на полное сечение пустого аппарата, м/с; W_3 – фиктивная скорость газа в точке захлебывания, м/с; ϵ – порозность слоя насадки с учетом наличия жидкой фазы.

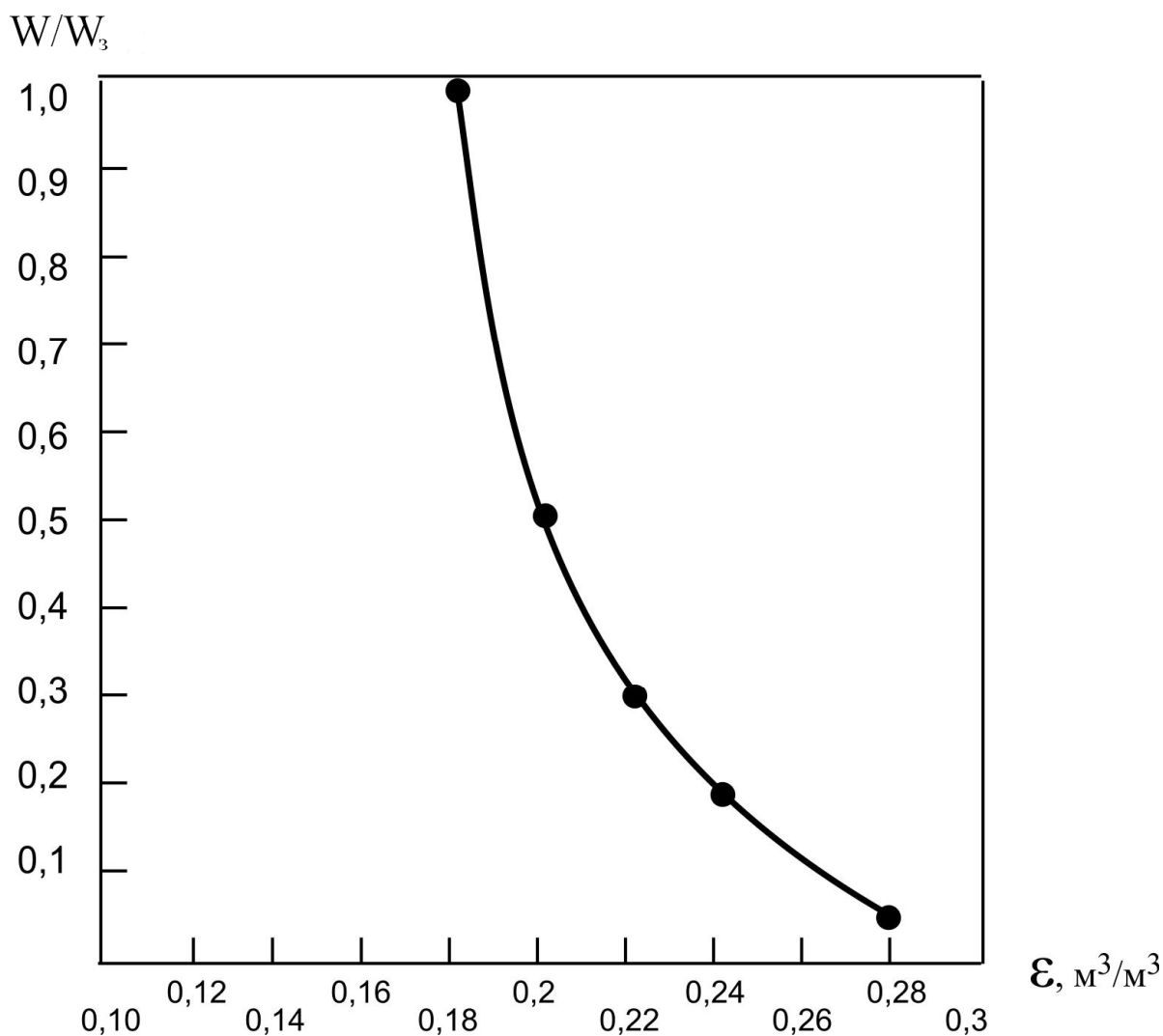


Рис. 9.15 Зависимость соотношения W/W_3 от величины порозности слоя насадки в виде сферических гранул – ϵ с учетом наличия жидкой фазы по данным работы [152].

Для определения порозности слоя насадки при наличии жидкости обычно используются уравнения вида [152]:

$$\epsilon = \epsilon_0 - \epsilon_{ст} - \epsilon_{дин} = \epsilon_0 - \frac{A}{d_e} - B \cdot \text{Re}_{d_e}^{0.5} \cdot \text{Ga}_{d_e}^{-0.5}, \quad (9.27)$$

где: $\epsilon_{ст}$ и $\epsilon_{дин}$ – статическая и динамическая составляющая удерживаемой жидкости, соответственно; $A = 0,00038$; $B=41,8$. Критерий Рейнольдса и Галилея в уравнении (9.27) отнесены к номинальному диаметру насадочного тела:

$$\text{Re}_{d_e} = \frac{W_{\text{жс}} \cdot d_e}{\mu_{\text{жс}}}, \quad (9.28)$$

$$\text{Ga}_{d_e} = \frac{g \cdot d_e^3 \cdot \rho_{\text{жс}}^2}{\mu_{\text{жс}}^2}, \quad (9.29)$$

где d_e – эквивалентный диаметр канала, м.

$$d_e = \frac{4\varepsilon}{a}. \quad (9.30)$$

В соответствии с концепцией структурной модели (см. рис. 9.4) в уравнениях (9.28), (9.29), (9.30) в качестве характерного линейного размера насадки следует принимать величину $d_{e_{\text{pz}}}$, вычисляемую по значениям ε_{pz} .

Предлагаемая структурная модель колонных аппаратов с насыпной насадкой позволяет более обоснованно подходить к выбору рабочей скорости вблизи скорости захлебывания – W_3 .

ГЛАВА 10

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ И РАСЧЕТЫ НАСАДОЧНЫХ АППАРАТОВ

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

10.1. Теоретические основы моделирование тепло- и массоотдачи в насадочных аппаратах

Исследованию и математическому описанию процессов переноса в пленочных аппаратах посвящено огромное количество работ. Можно отметить ряд наиболее известных монографий и учебных пособий Кафарова, Рамма, Александрова, Олевского, Холпанова, Николаева, Дытнерского, Аэрова и др. В большинстве работ, особенно до 80-х гг. прошлого столетия, основным математическим аппаратом для обобщения опытных данных использовалась теория подобия.

Для колонн с новыми контактными элементами необходимо вновь выполнять исследования массоотдачи, чтобы уточнить показатели степеней и коэффициентов в критериальных выражениях.

Другим путем вычисления коэффициентов массоотдачи является использование теории пограничного слоя и различных его моделей или численное решение системы уравнений переноса [286,291,305,438].

Массоотдача в жидкой фазе

Приближенное математическое описание процессов переноса в пограничном слое связано с моделями Прандтля, Кармана, Ландау и Левича, а также с развитием гидродинамической аналогии. Причем наиболее теоретически обоснованной и перспективной является модель диффузионного пограничного слоя Ландау-Левича.

На основе применения теории ламинарного пограничного слоя для ламинарной безволновой пленки ($Re_{ж} < 20$), стекающей по гладкой вертикальной поверхности широко используется уравнение Вязова:

$$\beta_{ж} = 1,38 \left(\frac{q_{ж} \cdot D_{ж}}{l \cdot \delta_{пл}} \right)^{0,5} = 1,38 \left(\frac{U_{ср} D_{ж}}{l} \right)^{0,5}, \quad (10.1)$$

где $\beta_{ж}$ – коэффициент массоотдачи в пленке, м/с; $q_{ж}$ – приведенный расход жидкости к периметру пленочного течения, $м^3/(м \cdot с)$; l – длина канала, м; $U_{ср}$ – средняя скорость жидкости в пленке, м/с; $\delta_{пл}$ – толщина пленки, м; $D_{ж}$ – коэффициент диффузии компонента в жидкой фазе, $м^2/с$.

Средняя скорость жидкости в пленке $U_{ср}$ для насадочной колонны определяется по формуле

$$U_{ср} = \frac{q}{\epsilon_{жд}},$$

где q – плотность орошения, $м^3/(м^2 \cdot с)$; $\epsilon_{жд}$ – динамическая составляющая задержки жидкости, $м^3/м^3$.

Выражение, аналогичное (10.1), записывается и для коэффициента теплоотдачи $\alpha_{ж}$ ($Вт/(м^2 \cdot К)$).

Связь между приведенным расходом пленочного течения $q_{ж}$ и плотностью орошения насадочной колонны q следует из соотношения:

$$V_{\text{ж}} = q_{\text{ж}} \cdot \Pi = q \cdot S_{\text{к}}$$

где $V_{\text{ж}}$ – расход жидкости, $\text{м}^3/\text{с}$; Π – периметр пленочного течения, м;
 $S_{\text{к}}$ – площадь поперечного сечения насадочной колонны, м^2 .

Для насадочной колонны [392]:

$$\Pi = S_{\text{к}} \cdot a_{\text{в}} / K,$$

где $K > 1$ – коэффициент учитывающий извилистость каналов, принимается $K \approx \pi/2$; $a_{\text{в}}$ – удельная поверхность насадки, $\text{м}^2/\text{м}^3$.

Так, в частности, для насадочных колонн с нерегулярными кольцевыми насадками на основе выражения (10.1) получено уравнение, которое дает удовлетворительные результаты по массоотдаче в жидкой фазе при ламинарном безволновом пленочном течении [286]:

$$\beta_{\text{ж}} = 0,68 \sqrt{\frac{q a_{\text{в}} \psi_{\text{w}} D_{\text{ж}}}{\varepsilon_{\text{св}} \varepsilon_{\text{жд}}}}, \quad (10.2)$$

где ψ_{w} – коэффициент смачиваемости поверхности насадки; $\varepsilon_{\text{св}}$ – удельный свободный объем, $\text{м}^3/\text{м}^3$.

Уравнение (10.2) дает удовлетворительные результаты при $d_{\text{э}} < 0,015$ м, где $d_{\text{э}} = \frac{4\varepsilon_{\text{св}}}{a_{\text{в}}}$ – эквивалентный диаметр насадки, м. При $d_{\text{э}} > 0,015$ значения

$\beta_{\text{ж}}$ по (10.2) меньше экспериментальных, что можно объяснить возникновением волн на поверхности пленки.

Выражение (10.2) содержит параметры, которые, как правило, определяются при гидравлическом исследовании насадочных колонн – динамическую задержку жидкости $\varepsilon_{\text{жд}}$ и коэффициент смачиваемости поверхности насадки ψ_{w} . Результаты расчета объемного коэффициента по уравнению (10.2) дано на рис. 10.1.

Для нерегулярных насадок, образованных изогнутыми полосами металлической ленты (типа «Инжехим–2000, 2002, 2003М» и др.) [293]

(рис. 10.2) в уравнении (10.1) в качестве длины пути течения пленки следует принимать ширину или длину полосы элемента (в зависимости от расположения в слое). Если предположить, что часть насадок расположилась вертикально, то $l = h$, а если горизонтально то $l = L$, где h – ширина полосы, L – длина полосы, м.

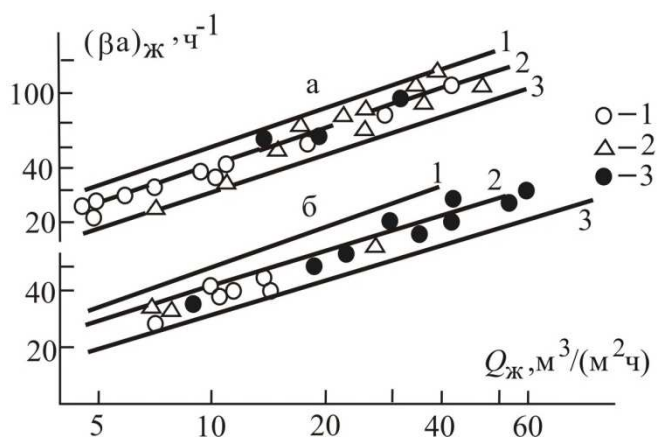
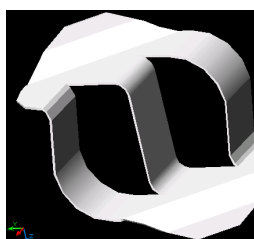


Рис. 10.1 Зависимости объемных коэффициентов массоотдачи от расхода жидкости. Сплошные линии – расчет по уравнению (10.2): 1 – кольца – 8 мм; 2 – 12 мм; 3 – 20 мм: а) десорбция CO_2 из воды воздухом; б) десорбция O_2 из воды воздухом. Экспериментальные данные Касаткина.



а



б



в



г

Рис. 10.2 Насадки: а – «Инжехим-2000»; б – «Инжехим-2002»; в – «Инжехим-2003М»; г – регулярная рулонная гофрированная насадка «Инжехим».

Для насадочного слоя в уравнении (10.1) используем поправочный коэффициент Дэвидсона $K = \pi/2$.

Тогда получим

$$\beta_{\text{ж}} = 1,38 \sqrt{\frac{\pi U_{\text{ср}} \cdot D_{\text{ж}}}{2 l}} Sc_{\text{ж}}^{-0,5}, \quad (10.3)$$

где $Sc_{\text{ж}}$ – критерий Шмидта в жидкой фазе, $Sc_{\text{ж}} = \frac{\mu_{\text{ж}}}{D_{\text{ж}} \cdot \rho_{\text{ж}}}$; $\mu_{\text{ж}}$ – динамический коэффициент вязкости жидкости, Па·с; $\rho_{\text{ж}}$ – плотность жидкости, кг/м³.

При ламинарном волновом пленочном течении необходимо учитывать длину и амплитуду волны. При волнообразовании коэффициент массоотдачи $\beta_{\text{ж}}$ увеличивается в 1,5-2,0 раза и более по сравнению с гладкой пленкой. При условии непрерывного роста диффузионного слоя по всему орошаемому каналу уравнение для $\beta_{\text{ж}}$ получено в виде [438]:

$$\beta_{\text{ж}} = \frac{1,96}{\sqrt{1,6 - \alpha^2}} \left[1 + \frac{5}{4} (\delta_{\text{пл}} \cdot \alpha \cdot n) \sqrt{\frac{D_{\text{ж}} \cdot U_{\text{ср}}}{l}} \right], \quad (10.4)$$

где α – амплитуда волны; $n = \frac{2\pi\delta_{\text{пл}}}{\lambda}$; λ – длина волны, м.

Сравнение различных уравнений по $\beta_{\text{ж}}$ в пленочных абсорберах [159, 286, 292], показывает, что удовлетворительные результаты дают уравнения Борисова, Олевского, Крашенинникова и Сытникова, Малюсова и др.:

$$Sh_{\text{ж}} = A \cdot Re_{\text{ж}}^m \cdot Sc_{\text{ж}}^n \left(\frac{\theta}{l} \right)^p = A \cdot Re_{\text{ж}}^m \cdot Sc_{\text{ж}}^n \cdot Ga_{\text{ж}}^{-p/3}, \quad (10.5)$$

где $Sh_{\text{ж}} = \beta_{\text{ж}} \theta / D_{\text{ж}}$ – критерий Шервуда в жидкой фазе; $Re_{\text{ж}} = 4q / v_{\text{ж}}$ – критерий Рейнольдса в жидкой фазе; $\theta = \left(v_{\text{ж}}^2 / g \right)^{1/3}$ – приведенная толщина

пленки жидкости, м; $Ga_{ж} = g \cdot l^3 / \nu_{ж}^2$ – критерий Галилея в жидкой фазе; $\nu_{ж}$ – коэффициент кинематической вязкости жидкости, m^2/c ; g – ускорение свободного падения, m/c^2 .

По данным отмеченных авторов можно приближенно принять

$$A = 0,5 - 0,8; m = n = p = 0,5 \text{ при } Re_{ж} = 40 - 600; (l/\theta)^{1/3} \approx 20.$$

Конечно, уравнение (10.5) не отражает физической картины волнового пленочного течения, как выражение (10.4), но позволяет быстро выполнять инженерные расчеты пленочных аппаратов.

Волнообразование может быть создано искусственно за счет регулярной шероховатости.

При расчете коэффициента массоотдачи в жидкой фазе необходимо учитывать известные данные о соотношении высоты выступа шероховатости и толщины пленки жидкости. Для ламинарного волнового режима получено выражение [438]:

$$\beta_{ж} = \left(\frac{D_{ж} U_{ср}}{\lambda} \right)^{0,5} \left[1 + 0,6(\alpha n \delta_{пл})^2 \right] f(\alpha), \quad (10.6)$$

где принято $\lambda = S$ – шаг регулярной шероховатости, м.

Амплитуда волны равна

$$\alpha = \frac{\delta_{\max} - \delta_{\min}}{\delta_{\max} + \delta_{\min}},$$

где δ_{\max} , δ_{\min} – максимальная и минимальная толщины волновой пленки жидкости, м.

Для расчета α получены выражения [438]:

$$\alpha = Re(1,444 \cdot Re + 44,48)^{-1}, \quad Re \leq 100,$$

$$\alpha = 0,505 + 2,3 \cdot 10^{-4} Re, \quad 600 > Re > 100,$$

$$\alpha = 0,643, \quad Re > 600,$$

где число Рейнольдса $Re = 3U_{ср} \delta_{пл} / \nu_{ж}$.

В формуле (10.6) функция $f(\alpha)$ имеет вид:

$$f(\alpha) = 1,22 - 0,23\alpha \text{ при } \alpha \leq 0,4,$$

$$f(\alpha) = 1,1 \text{ при } \alpha > 0,4.$$

При турбулентном течении пленки жидкости ($Re_{ж} > 2000$) по гладкой поверхности коэффициенты тепло- и массоотдачи можно вычислить по уравнениям, полученным на основе использования модели диффузионного пограничного слоя [197,284,286,305].

При теплообмене между стенкой канала и турбулентной пленкой выражение для коэффициента теплоотдачи имеет вид [286]:

$$\alpha_{ж} = \rho_{ж} c_{рж} u_{*ж} \sqrt{\frac{u_{*ж} a_{ж} \rho_{ж}}{\sigma}} \left(\arctg \left(R_1 v_{ж} \sqrt{\frac{\rho_{ж} u_{*ж}}{a_{ж} \sigma}} \right) \right)^{-1}, \quad (10.7)$$

где R_1 – безразмерная толщина вязкого подслоя; $a_{ж}$ – коэффициент температуропроводности, m^2/c ; $u_{*ж}$ – динамическая скорость в жидкой фазе, м/с; σ – поверхностное натяжение, Н/м; $c_{рж}$ – удельная теплоемкость жидкости, Дж/(кг·К).

Выражение для расчета R_1 получено на основе степенного профиля скорости в турбулентной пленке [286]:

$$R_1 = \left(\frac{U_{\infty}}{u_{*ж}} \right)^{\frac{7}{6}} \left(\frac{v_{ж}}{u_{*ж} \delta_{пл}} \right)^{\frac{1}{6}},$$

где U_{∞} – средняя скорость на внешней границе пограничного слоя (межфазной поверхности пленки), м/с. Как известно: $U_{\infty} = 1,15 \cdot U_{ср}$.

При массообмене жидкой пленки с газовым потоком (слабое взаимодействие фаз) [305]:

$$\beta_{ж} = 9 \cdot 10^{-4} (v_{ж} g)^{\frac{1}{3}} Re_{ж}^{0,712} Sc_{ж}^{-0,5}. \quad (10.8)$$

На рис. 10.3, 10.4 приведены результаты расчета безразмерных комплексов по тепло- и массоотдаче по уравнениям (10.7) и (10.8) и сравнение с известными результатами других авторов.

В критериальном виде выражение (10.8) запишется в виде

$$Sh_{пл} = 9 \cdot 10^{-4} Re_{ж}^{0,712} Sc_{ж}^{0,5}.$$

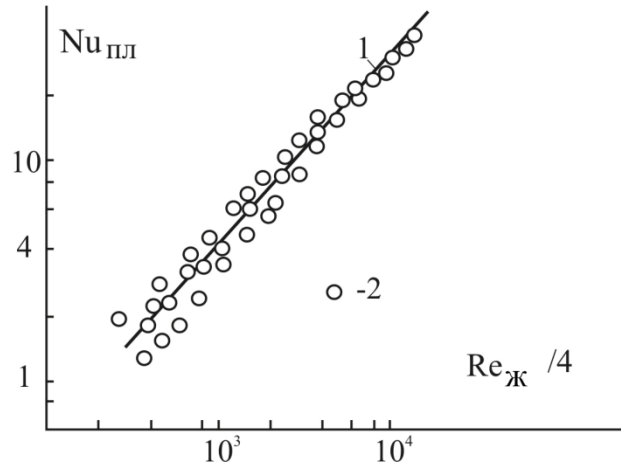


Рис. 10.3 Корреляция данных по теплоотдаче при пленочном течении: 1 – расчет по уравнению (10.7); 2 – опытные результаты различных авторов, обобщенные в работе $(Pr_{ж} = 1,75)$ [334].

На рис. 10.3, 10.4 $Nu_{пл} = \frac{\alpha_{ж}\theta}{\lambda_{ж}}$ – критерий Нусельта; $Sh_{пл} = \frac{\beta_{ж}\theta}{D_{ж}}$ –

критерий Шервуда; $\lambda_{ж}$ – удельная теплопроводность жидкости, Вт/(м·К).

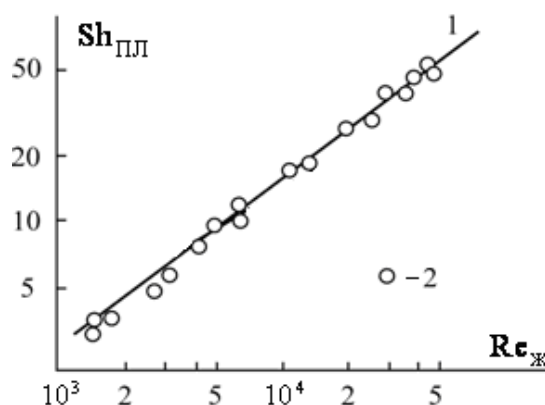


Рис. 10.4 Зависимость числа Шервуда в турбулентной пленке, стекающей по гладкой поверхности труб, от числа Рейнольдса при абсорбции кислорода воздуха дистиллированной водой: 1 – расчет по уравнению (10.8); 2 – опытные данные Кулова и др.

Массоотдача в газовой фазе

Массоотдачу в газовой фазе насадочных колонн иногда изучают путем возгонки твердых тел в отсутствие орошения. Тогда поверхность массообмена равна геометрической поверхности. Для возгонки часто используют нафталин, из которого изготавливают насадочные тела. Результаты экспериментов обобщаются в виде критериального уравнения [392]:

$$Sh_{\Gamma} = c \cdot Re_{\Gamma}^m \cdot Sc_{\Gamma}^{1/3}, \quad (10.9)$$

где $Sh_{\Gamma} = \beta_{\Gamma} d_{\text{э}} / D_{\Gamma}$ – критерий Шервуда в газовой фазе;

$Re_{\Gamma} = W_0 d_{\text{э}} / \nu_{\Gamma}$ – критерий Рейнольдса в газовой фазе;

$Sc_{\Gamma} = \frac{\mu_{\Gamma}}{D_{\Gamma} \cdot \rho_{\Gamma}}$ – критерий Штидта в газовой фазе; β_{Γ} – коэффициент

массоотдачи в газовой фазе, м/с; D_{Γ} – коэффициент диффузии компонента в

газовой фазе, м²/с; μ_{Γ} – динамический коэффициент вязкости газа, Па·с;

ρ_{Γ} – плотность газа, кг/м³; W_0 – фиктивная скорость газа (без насадки),

м/с; ν_{Γ} – коэффициент кинематической вязкости газовой фазы, м²/с.

Различными исследователями установлено для колец Рашига (10-50 мм), седел Берля (13, 25 мм), Колец Палля (50 мм), шаров, таблеток, колец (8 мм):

$$c=0,395 \dots 0,45; m=0,64 \dots 0,655, \text{ при } Re_{\Gamma} = 10 \text{ до } 10^4.$$

Для описанных выше условий для нерегулярных насадок хорошие результаты дает уравнение, полученное на основе использования модели диффузионного пограничного слоя [286,304]:

$$\beta_{\Gamma} = 0,175 \cdot \left(\frac{\bar{\epsilon} \nu_{\Gamma}}{\rho_{\Gamma}} \right)^{0,25} \cdot Sc_{\Gamma}^{-0,67}. \quad (10.10)$$

Средняя скорость диссипации энергии газового потока в слое насадки равна:

$$\bar{\varepsilon} = \frac{\Delta p_{\Gamma} \cdot W_0}{\varepsilon_{\text{св}} \cdot H},$$

где Δp_{Γ} – перепад давления, Па; H – высота слоя насадки, м.

Критериальное выражение Онда для расчета коэффициента массоотдачи в газовой фазе β_{Γ} в орошаемых колоннах с нерегулярными насадками имеет вид:

$$\text{Nu}_{\Gamma} = A \cdot \varepsilon_{\text{св}}^p \cdot \text{Re}_{\Gamma}^{0,8} \cdot \text{Ga}_{\Gamma}^k \cdot \text{Sc}_{\Gamma}^{1/3}, \quad (10.11)$$

где критерий Нуссельта в газовой фазе $\text{Nu}_{\Gamma} = \beta_{\Gamma} d_{\text{э}} / D_{\Gamma}$; критерий Галилея в газовой фазе $\text{Ga}_{\Gamma} = d_{\text{э}}^3 g / \nu_{\Gamma}^2$.

Постоянные A , p , k имеют значения:

Кольца внавал $A = 0,0142$, $p = 0,52$, $k = 0,16$;

Седла $A = 0,0058$, $p = 0,34$, $k = 0,22$.

В газовой фазе при пленочном режиме работы насадочных колонн теоретическое уравнение для расчета коэффициента массоотдачи при турбулентном движении имеет вид [286]:

$$\beta_{\Gamma} = A \frac{\left(\bar{\varepsilon}_{\Gamma-\text{ж}} \frac{v_{\Gamma}}{\rho_{\Gamma}} \right)^{0,25}}{\text{Sc}_{\Gamma}^{0,67} q^{0,4}}. \quad (10.12)$$

Аналогично записывается коэффициент теплоотдачи:

$$\alpha_{\Gamma} = A \rho_{\Gamma} c_{p\Gamma} \frac{\left(\bar{\varepsilon}_{\Gamma-\text{ж}} \frac{v_{\Gamma}}{\rho_{\Gamma}} \right)^{0,25}}{\text{Pr}_{\Gamma}^{0,67} q^{0,4}}, \quad (10.13)$$

где $c_{p\Gamma}$ – удельная теплоемкость газа, Дж/(кг·К); Pr_{Γ} – критерий Прандтля.

Средняя по объему скорость диссипации энергии равна

$$\bar{\varepsilon}_{\Gamma-\text{ж}} = \frac{\Delta p_{\Gamma-\text{ж}} W_0}{(\varepsilon_{\text{св}} - \varepsilon_{\text{жд}}) H},$$

где $\Delta p_{\Gamma-ж}$ – составляющая перепада давления $\Delta p_{ор}$ в орошаемой насадке, вызванная наличием жидкой фазы, Па. Приблизительно равна:

$$\Delta p_{\Gamma-ж} = \Delta p_{ор} (1 - \psi_w).$$

Для колец, седел и регулярных насадок в уравнениях (10.12) и (10.13) $A \approx 0,013$. Для нерегулярных насадок «Инжехим–2000, 2002, 2003М» $A \approx 0,028$.

Для колец Рашига в укладку известно эмпирическое выражение, полученное Малюсовым, Малафеевым, Жаровонковым:

$$\beta_{\Gamma} = 0,0013 \frac{D_{\Gamma}}{d_3} Re_{\Gamma}^{0,19} Sc_{\Gamma}^{0,5} \quad (10.14)$$

На рис. 10.5 представлены обобщенные результаты расчета β_{Γ} по выражению (10.12) и сравнение с опытными данными [392]

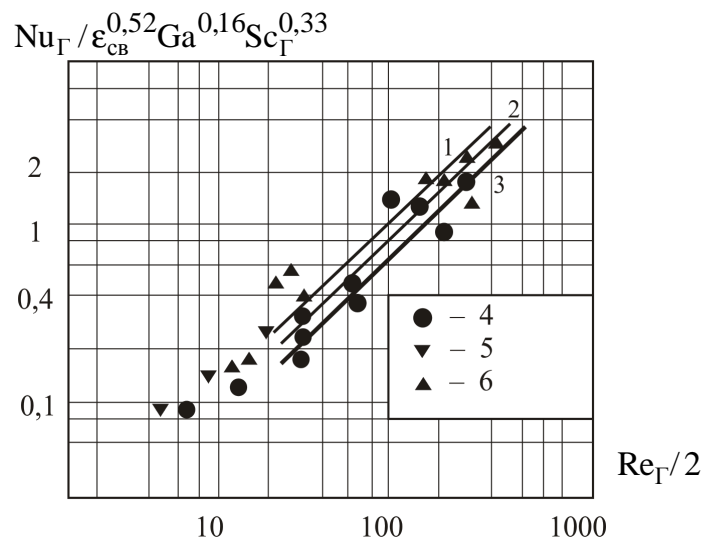


Рис. 10.5 Корреляция данных по массоотдаче в газовой фазе с насадкой из Колец Рашига: 1, 4 – кольца 10 мм; 2, 5 – 15 мм; 3, 6 – 25 мм. 1–3 – расчет по уравнению (10.12); 4–6 – экспериментальные данные, обобщенные в работе [392]. Коэффициент массоотдачи отнесен к смоченной поверхности насадки

Сравнительные массообменные характеристики насадок

В таблице 10.1 даны значения коэффициентов массоотдачи в жидкой фазе $\beta_{ж}$, рассчитанные по уравнению (10.2) для колец Рашига 25x25, по (10.3) для насадки «Инжехим–2000» и по (10.6) для регулярной рулонной насадки с шероховатой поверхностью «Инжехим» при различной плотности орошения, а также значения динамической составляющей задержки жидкости, вычисленные по критериальным выражениям для данных насадок.

Расчет выполнен при следующих условиях: давление в аппарате атмосферное, температура в аппарате 60°C, начальное содержание поглощаемого компонента в исходной смеси 47,72 мг/кг, конечное содержание 4 мг/кг, начальное содержание CO₂ в газовой фазе 460 мг/кг. Режим работы насадочной колонны пленочный. Критерий Шмидта составляет $Sc_{ж} = 191,1$.

Расчет коэффициента $\beta_{ж}$ для регулярной насадки «Инжехим» с шероховатой поверхностью (микрорельефом) с шагом $S = 3 \cdot 10^{-3}$ м, показывает, что значение $\beta_{ж}$ в 2 раза выше, чем у колец Рашига и на 20%, чем у «Инжехим–2000» с гладкой поверхностью.

Таблица 10.1. Значения коэффициентов массоотдачи в жидкой фазе и задержки жидкости при различной плотности орошения (десорбция углекислоты из воды воздухом)

Насадка	Плотность орошения, $\text{м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$					
	30		40		50	
	$\beta_{\text{ж}}, \text{м/с}$	$\epsilon_{\text{жд}}$	$\beta_{\text{ж}}, \text{м/с}$	$\epsilon_{\text{жд}}$	$\beta_{\text{ж}}, \text{м/с}$	$\epsilon_{\text{жд}}$
Нерегулярная насадка «Инжехим-2000», $a_v = 200$ $\text{м}^2/\text{м}^3$	$3,1 \cdot 10^{-4}$	$5,6 \cdot 10^{-2}$	$3,4 \cdot 10^{-4}$	$6,4 \cdot 10^{-2}$	$3,6 \cdot 10^{-4}$	$7,2 \cdot 10^{-2}$
Кольца Рашига 25x25 внавал, $a_v = 200$ $\text{м}^2/\text{м}^3$	$1,9 \cdot 10^{-4}$	$6,0 \cdot 10^{-2}$	$2,0 \cdot 10^{-4}$	$7,1 \cdot 10^{-2}$	$2,2 \cdot 10^{-4}$	$8,0 \cdot 10^{-2}$
Регулярная рулонная гофрированная насадка с шероховатой поверхностью, $a_v = 200$ $\text{м}^2/\text{м}^3$	$3,9 \cdot 10^{-4}$	$5,4 \cdot 10^{-2}$	$4,4 \cdot 10^{-4}$	$5,7 \cdot 10^{-2}$	$4,8 \cdot 10^{-4}$	$6,0 \cdot 10^{-2}$

На рис 10.6 и 10.7 приведены зависимости коэффициентов массоотдачи в газовой фазе $\beta_{\text{г}}$ от скорости газа W_0 для регулярных и нерегулярных насадочных контактных устройств при плотности орошения $q = 10(\text{м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ [291].

На рис. 10.6 приведены экспериментальные значения коэффициента массоотдачи рулонной сегментной насадки «Инжехим» и его расчет по

уравнению (10.12), а также сравнение с кольцами Рашига 50x50 в укладку, рассчитанное по уравнению (10.14). Вычисления, выполненные по уравнению (10.14) дают значения β_{Γ} с погрешностью не более 10–12 % от экспериментальных. Из рисунка видно, что рулонная сегментная насадка «Инжехим» имеет более высокие значения коэффициента массотдачи β_{Γ} по сравнению с кольцами Рашига.

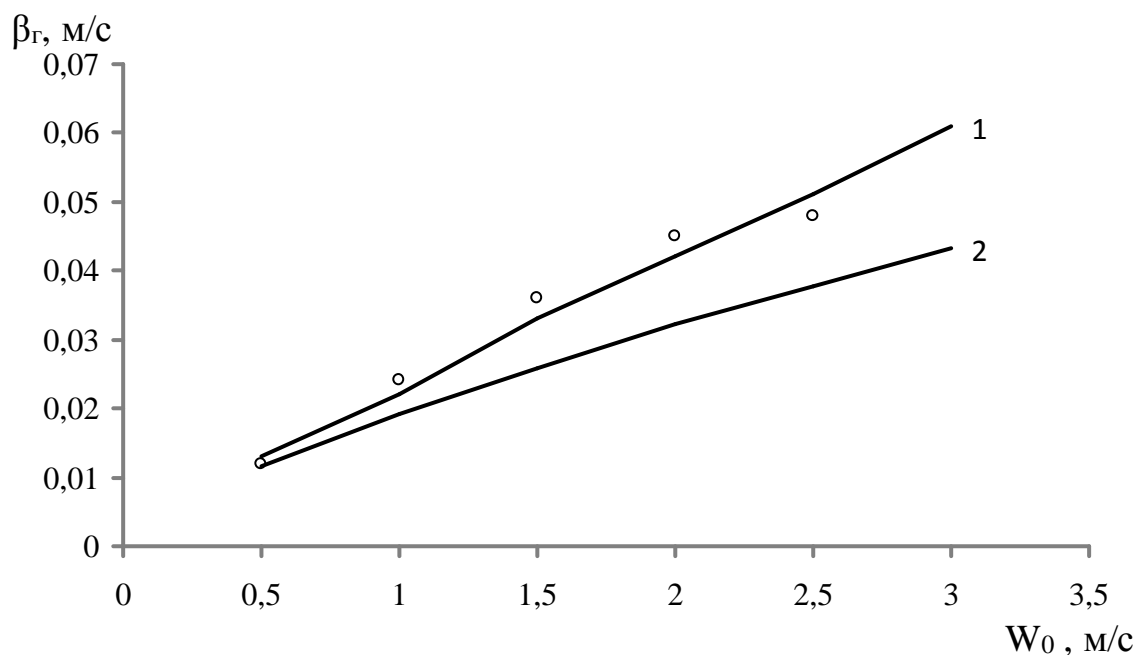


Рис. 10.6 Зависимость коэффициента массотдачи в газовой фазе от скорости газа, при плотности орошения $q = 10(\text{м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{ч})$, абсорбция аммиака водой: 1 – регулярная рулонная насадка «Инжехим»: – расчет по уравнению (10.12), \circ – опытные данные [423]; 2 – кольца Рашига 50x50 в укладку, расчет по уравнению (10.14).

На рис. 10.7 представлено сравнение коэффициентов массотдачи в газовой фазе для нерегулярных насадок, рассчитанных по уравнениям (10.11) и (10.12). Из рисунка видно, что нерегулярная насадка «Инжехим–2000» имеет более высокие значения коэффициента массотдачи β_{Γ} по сравнению с кольцами Рашига 25x25, кольцами Палля 25x25 и седлами Берля 25 мм.

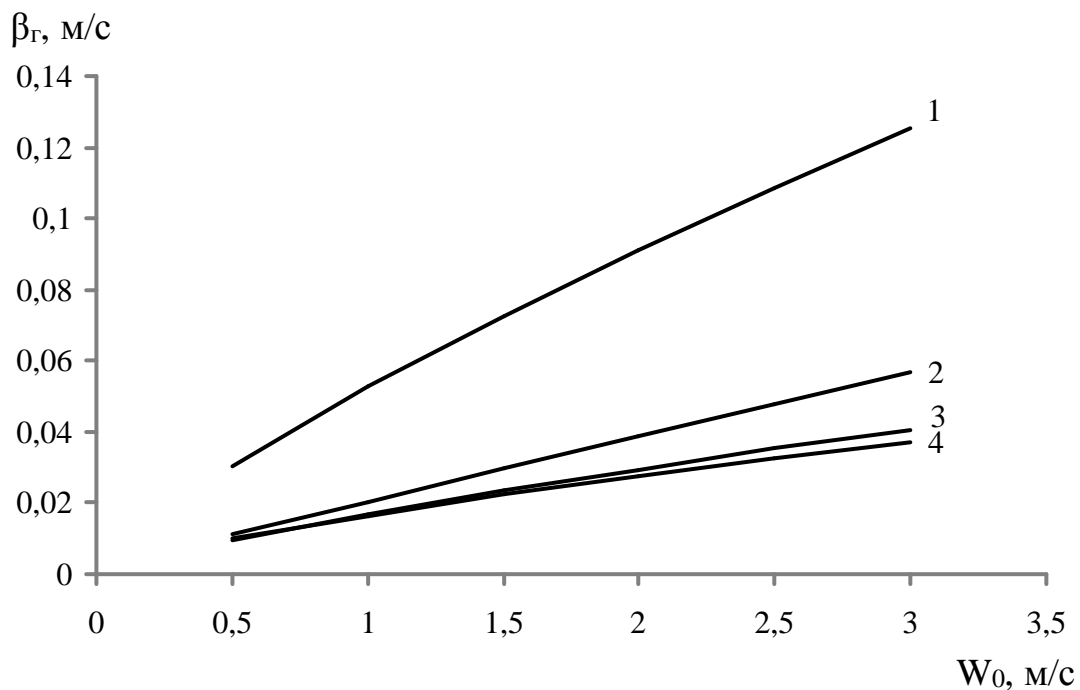


Рис. 10.7 Зависимость коэффициента массоотдачи в газовой фазе от скорости газа, при плотности орошения $q = 10(\text{м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{ч})$, абсорбция аммиака водой: 1 – нерегулярная насадка «Инжехим–2000», расчет по уравнению (10.12); 2 – седла Берля 25 мм; 3 – кольца Рашига 25x25 внавал; 4 – кольца Палля 25x25; 2, 3, 4 – расчет по уравнению (10.11).

На рис. 10.8 дано сравнение β_G , полученное по уравнениям (10.11) и (10.2) для различных насадок при плотности орошения $q = 40(\text{м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{ч})$. Из графика видно, что насадка «Инжехим–2000» также имеет лучшие массообменные характеристики, по сравнению со стальными кольцами Рашига 50x50 и стальными кольцами Палля 50x50.

На рис. 10.9 приводятся сравнения по объемному коэффициенту массопередачи [291,295] для различных типов контактных устройств. На рис. 10.10 дана зависимость высоты единиц переноса h_{0G} от скорости газа в колонне для различных пакетных регулярных насадок. Из представленных результатов следует, что регулярная гофрированная насадка с элементами шероховатости поверхности не уступает аналогичным контактным устройствам.

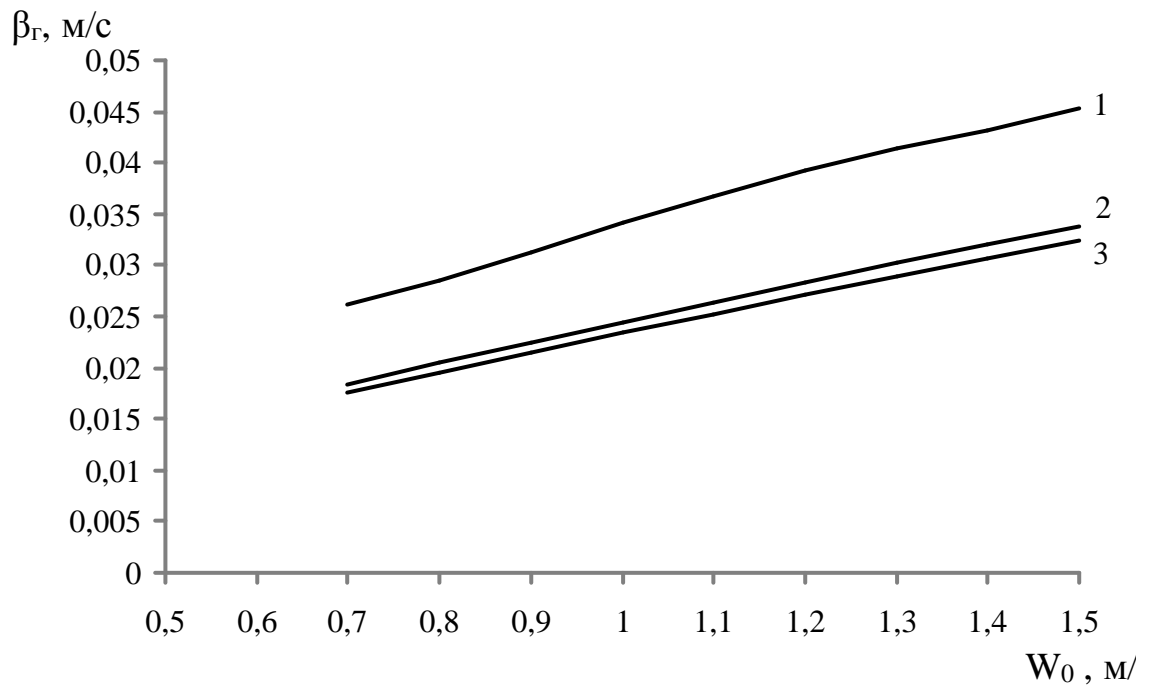


Рис. 10.8 Зависимость коэффициента массоотдачи в газовой фазе от скорости газа, при плотности орошения $q = 40(\text{м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{ч})$, абсорбция аммиака водой: 1 – насадка «Инжехим–2000»; 2 – стальные кольца Рашига 50x50; 3 – стальные кольца Палля 50x50.

Для оценки гидродинамических и массообменных характеристик насадок иногда используется энергетический коэффициент

$$E = \frac{\Delta p_{\text{ор}} \cdot h_{\text{ог}}}{H}, \quad (10.15)$$

где $h_{\text{ог}}$ – общее число единиц переноса, м.

Коэффициент E характеризует энергозатраты и массообменную эффективность контактных устройств.

Чем меньше гидравлическое сопротивление и больше коэффициент массопередачи (т.е. ниже значение $h_{\text{ог}}$), тем меньше комплекс E и, следовательно, эффективнее насадка. На рис. 10.9 видно, что наиболее эффективной насадкой является насадка «Инжехим–2000» [291].

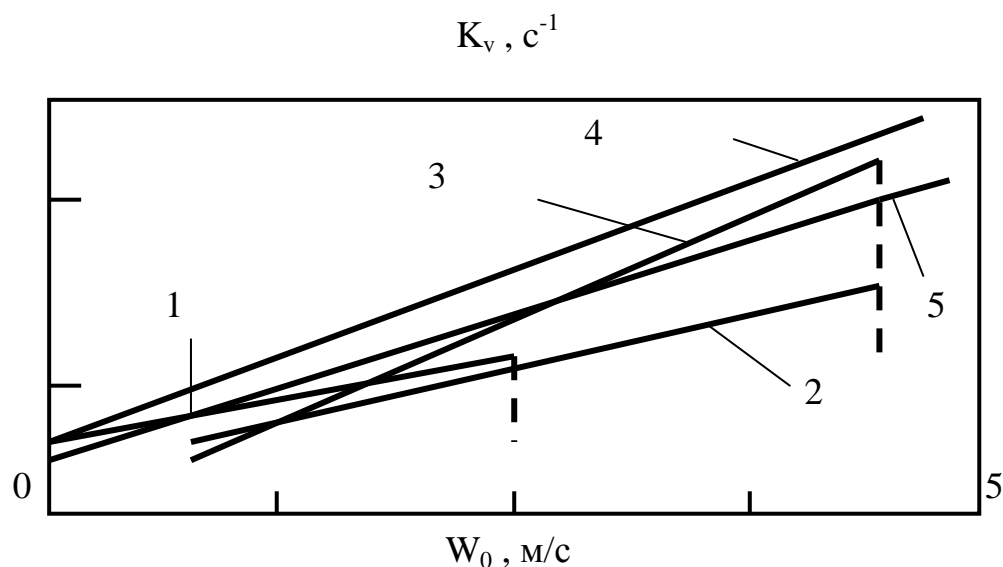


Рис. 10.9 Зависимость объемного коэффициента массопередачи K_v от скорости пара для дырчатой провальной тарелки, рулонной и плоскопараллельной насадок в условиях ректификации метанола [361] [модельная установка с колонным диаметром 120 мм, средняя концентрация метанола 50–55% (мол.); $G/L=1$; $P=101,3$ кПа; высота пакета насадок 50 мм; штриховые линии – предельные нагрузки]:

- 1 – тарелка со свободным качением 25% и отверстиями диаметром 3 мм;
- 2 – спиральная рулонная насадка с прямым гофром, $d_3=12$ мм;
- 3 – то же, с косым гофром, $d_3=18$ мм;
- 4 – плоскопараллельная насадка, $d_3=12$ мм;
- 5 – регулярная рулонная гофрированная насадка «Инжехим» [291], $d_3=15$ мм.

Модернизация тепло- и массообменных аппаратов с использованием высокоэффективных контактных устройств является все более актуальным направлением в различных отраслях промышленности и энергетике. В данной главе показано, что нерегулярная насадка «Инжехим-2000» является современной альтернативой кольцам Палля, Рашига и другим аналогичным насадкам. При равной высоте слоя она обеспечивает большую производительность, меньшее удельное гидравлическое сопротивление и более высокое качество разделения смесей.

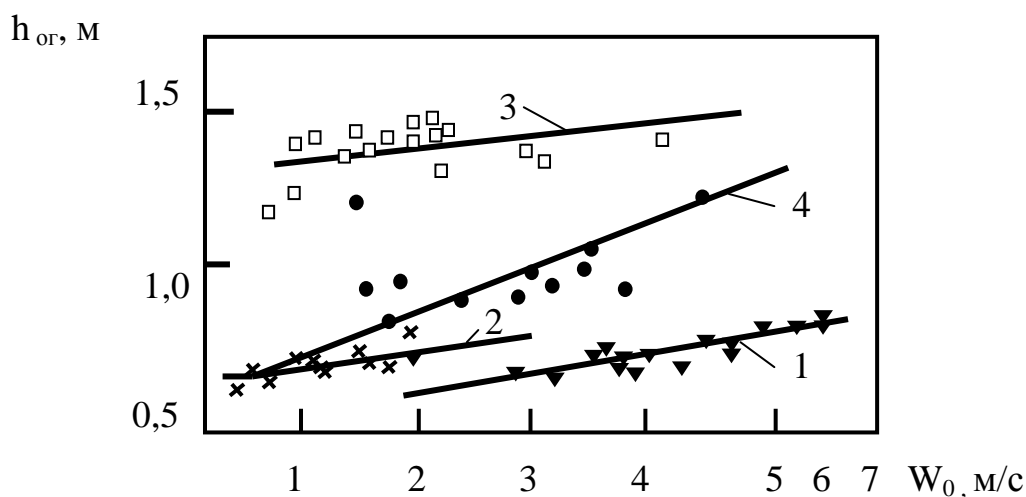


Рис. 10.10 Эффективность пакетных регулярных насадок при ректификации смеси метанол-вода [295,296,361] [модельная установка с колонной диаметром 400 мм; концентрация метанола 30-45% (мол.); $P=101,3$ кПа]: 1- спиральная насадка с прямым гофром, $d_3=12$ мм; 2 – насадка «зиг-заг», $d_3=30$ мм; 3 – плоскопараллельная насадка, $d_3=30$ мм; 4 – регулярная рулонная гофрированная насадка «Инжехим», $d_3=15$ мм.

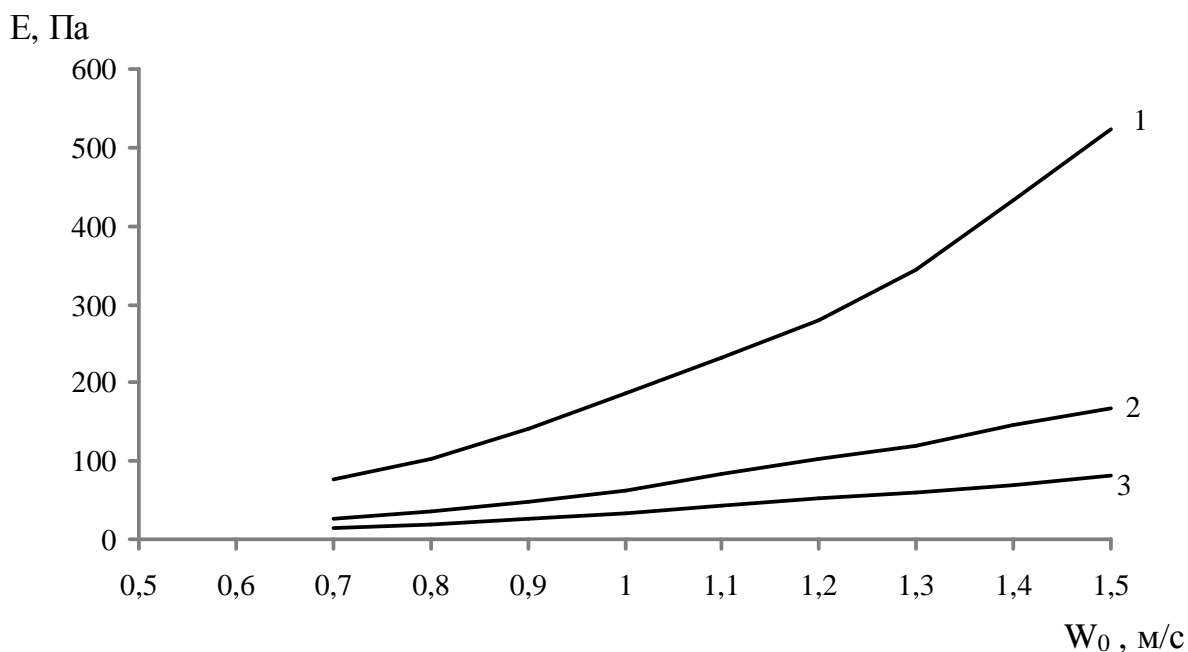


Рис. 10.11 Зависимость комплекса E от скорости газа, при плотности орошения $q = 40(\text{м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{ч})$, $d_3 = 0,03$ м, абсорбция аммиака водой: 1 – стальные кольца Рашига 50x50; 2 – стальные кольца Палля 50x50; 3 – насадка «Инжехим-2000».

У регулярной рулонной гофрированной насадки «Инжехим» гофры смежных листов расположены перекрестно по отношению друг к другу и образуют каналы для потока паровой фазы с интенсивной турбулентностью. Кроме того насадка выполняется с элементами шероховатости, что повышает коэффициент массоотдачи в жидкой фазе. Насадка характеризуется высокой разделяющей способностью при низком гидравлическом сопротивлении.

Рассмотренные выше теоретические выражения используются для расчёта промышленных насадочных колонн при их проектировании или модернизации с насадками «Инжехим» [288,292,299].

Насадки «Инжехим» внедрены в более пятидесяти массообменных колоннах [144-146,198,202,230,231,285,288,297,299,302,308,309,312,318,325,413,423,424,427-429,451,452].

10.2. Расчет аппаратов для осуществления массообменных процессов

10.2.1. Выбор конструкции насадки

Выбор насадки является ключевым моментом в проектировании насадочных аппаратов. От того насколько правилен будет этот выбор зависит, как стоимость насадочного аппарата, так и эффективность его работы.

Конкурирующими при выборе насадки, естественно, могут быть только промышленные насадки, т.е. те немногочисленные из большого числа известных конструкций (см. главу 3), для которых, помимо результатов всесторонних исследований, имеется опыт промышленной эксплуатации в аппаратах различного диаметра. Для этих насадок должна иметься освоенная технология их массового изготовления. Они должны реально производиться в необходимых масштабах с тем, чтобы поставка в нужном количестве и в нужные сроки была гарантирована. В настоящее время одним из лидеров в

части разработки и производства насадок является фирма Зульцер (ФРГ), которой принадлежит безусловное первенство в изготовлении и поставках регулярных насадок.

Прежде всего, выбор насадок должен определяться технологическим назначением аппарата и условиями проведения процесса разделения. Если требуется осуществление процесса ректификации под вакуумом, или разделение компонентов с близкими температурами кипения, или в других случаях, когда для осуществления разделения требуется большое число теоретических тарелок или ступеней разделения, или требуется высокая степень разделения, выбор должен склоняться в пользу регулярных насадок, как обладающих меньшим гидравлическим сопротивлением и более высокой эффективностью. В иных случаях, когда требования к степени разделения не столь велики, или когда возможно наличие механических загрязнений в виде твердой фазы, смол и т.д. предпочтительны нерегулярные насадки. Они по сравнению с регулярными, особенно сетчатыми, менее чувствительны к забивкам и к тому же стоимость их изготовления существенно ниже.

На выбор конструкции насадки большое влияние оказывают и такие условия проведения процесса, как температура и коррозионные свойства среды. При достаточно высоком уровне температур исключается или в значительной степени ограничиваются конструкции насадок, изготавливаемых из полимерных материалов (см. раздел 2.3). В высококоррозионных средах ограничено использование металлических насадок и, в некоторых случаях, даже из легированных сталей. Таким образом, указанные выше условия проведения процессов разделения в определенной мере сужают круг насадок, подлежащих использованию для конкретного процесса.

Из числа насадок, удовлетворяющих предъявляемым требованиям, должны быть выбраны насадки, обладающие наилучшими технологическими показателями: эффективностью, пропускной способностью, наиболее низким гидравлическим сопротивлением.

Таким образом, первым шагом при выборе типа насадки является выбор материала насадки (керамика, пластик, металл, сетка и т.д.). Далее определяются с видом насадки – нерегулярная или регулярная. После этого выбирается конкретный тип насадки – кольца, миникольца, седла и т. д. для нерегулярной насадки или блочная, рулонная, кассетная и т.д. для регулярной насадки. Эти решения могут быть приняты, руководствуясь рекомендациями и данными по сопоставимым характеристикам насадок, изложенным в разделе 3.4, а также данными, приведенными в других литературных источниках.

Дальнейшее сужение круга конкурирующих насадок должно быть осуществлено путем выбора нескольких, обладающих при близких технологических показателях (для одинакового размера), наименьшей стоимостью, включая стоимость изготовления и цену доставки с завода (или страны) изготовителя к месту эксплуатации будущего насадочного аппарата.

Окончательный выбор наилучшей насадки из 2~3 прошедших предварительный отбор должен, как нам представляется, быть осуществлен только после выполнения предварительных расчетов аппарата с этими насадками, в ходе которых будет оценена необходимая высота насадочного слоя, определен диаметр аппарата и гидравлическое сопротивление насадки, а также выполнена эскизная проработка конструкции аппарата, позволяющая с известной степенью приближения оценить ожидаемую материалоемкость аппарата и стоимость его изготовления. Эти данные позволят сравнить экономическую эффективность каждой из конкурирующих насадок и выбрать оптимальную.

Некоторые рекомендации по выбору насадки см. также в разделе 3.4. О выборе насадки и об оценке экономической эффективности ее использования см. главу 11.

10.2.2. Выбор оптимального размера насадки

После выбора насадки оптимальной конструкции, следующим шагом должен быть выбор ее размера, который, в свою очередь, был бы оптимальным для данного конкретного процесса разделения. При этом следует руководствоваться существующей для насадок закономерностью: эффективность насадки увеличивается с уменьшением ее размера, но при этом снижается ее пропускная способность (правда в меньшей степени, чем растет эффективность). Одновременно значительно увеличивается гидравлическое сопротивление и стоимость изготовления насадки. Рост ΔP превосходит увеличение эффективности. Эта закономерность является общей, как для нерегулярных, так и для регулярных насадок. Графический характер этих закономерностей представлен на рис. 10.12. по данным [232], полученным для насадки ГИАП-НЗ. Лишь по характеру кривой $w_{II}=f(d)$ может быть сделан определенный вывод. Он касается размера насадки, выше которого следует ожидать незначительное увеличение ее пропускной способности и поэтому показателю использование более крупной насадки не целесообразно. Этого, однако, явно недостаточно для выбора оптимального размера насадки. Поэтому даже точное знание зависимостей, представленных на рис. 10.12, в том числе зависимости $\Delta P/\beta_{жв}=f(d)$, при скоростях начала подвисяния, как это видно из характера кривых, не делает возможным окончательный выбор ее необходимого размера.

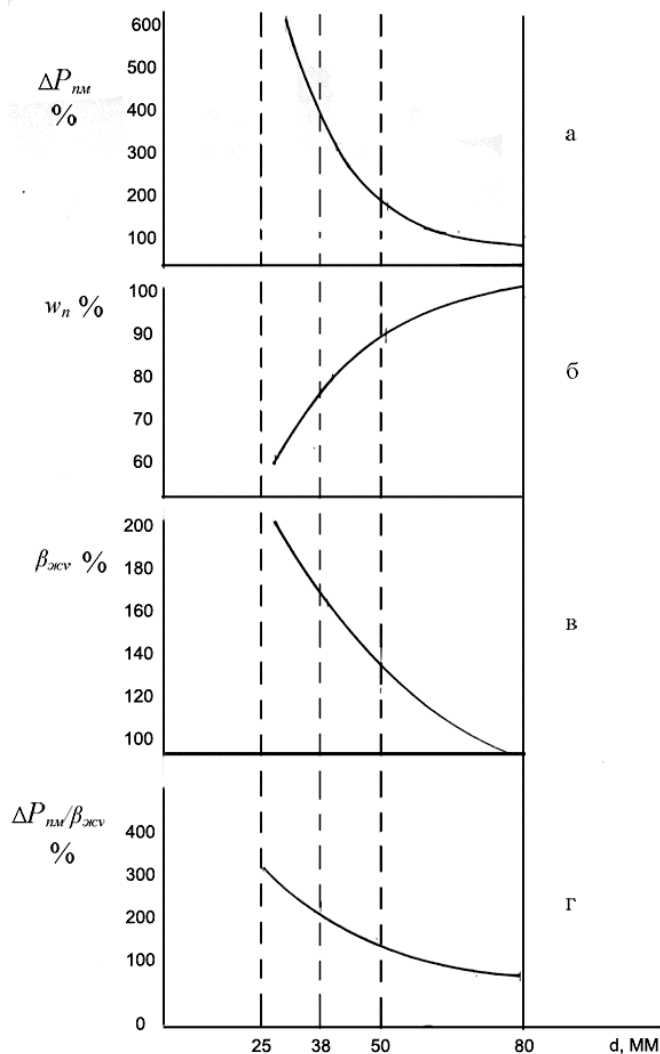


Рис. 10.12 Влияние размера насадки на показатели ее работы:

а - $\Delta P_{плм} = f(d)$;

б - $w_n = f(d)$;

в - $\beta_{жсв} = f(d)$;

г - $\Delta P_{плм} / \beta_{жсв} = f(d)$;

значения $\Delta P_{плм}$ и $\beta_{жсв}$ взяты при $w = const$.

Следует сказать об имеющемся практическом опыте в вопросе выбора размера насадки. Так, наиболее популярными размерами нерегулярных насадок, используемых для осуществления процесса абсорбции, являются: для кольцевых насадок (кольца Рашига, Палля, ГИАП-НЗ и др.), а также седел (седла Берля, Инталокс) – 38мм и 50 мм, Инжехим 25-35 мм.

Для процессов, требующих весьма большого количества ступеней разделения (например, для разделения изотопов), используются весьма мелкие насадки – размером, доходящим до 5 мм.

Тем не менее для окончательного решения о размере насадки следует, как и в случае выбора конструкции насадки, произвести в указанном выше объеме варианты технологических расчетов аппаратов, применительно к

различным размерам насадки и далее оценить ожидаемую стоимость насадочного аппарата (включая стоимость насадки, что позволит осуществить оценку экономической эффективности (см. главу 11). Такой подход нам представляется необходимым, поскольку учитывает все экономические аспекты. Выполнение этих расчетов при современном уровне вычислительной техники потребует минимальных затрат усилий и времени.

10.2.3. Выбор скорости газа и расчет диаметра колонны

Для достижения максимальной эффективности работы насадочных аппаратов и, в частности колонн для осуществления процессов абсорбции, целесообразно принимать скорость газа близкую к предельно допустимой. Обычно принимают рабочую скорость чуть ниже скорости начала подвисяния и заметно ниже скорости начала захлебывания: $w_0 \approx 0,6 \div 0,8 w_3$. Ниже будет обсуждаться возможность увеличения рабочей скорости и ее максимальное приближение к предельно допустимым значениям – к скорости начала захлебывания, что, на наш взгляд, в современных условиях является технически осуществимым.

Таким образом, первым шагом является определение скорости начала подвисяния – w_{II} . В большинстве случаев по результатам технологических расчетов задаются весовые количества подаваемого в аппарат количества газа – G и жидкости – L . Если для данной системы газ-жидкость имеются опытные данные (см. рис. 10.13), представляющие собой кривые захлебывания и подвисяния, то заданному соотношению G/L на каждой из этих кривых, будет соответствовать лишь по одной точке w_{II} и w_3 , которые легко определить.

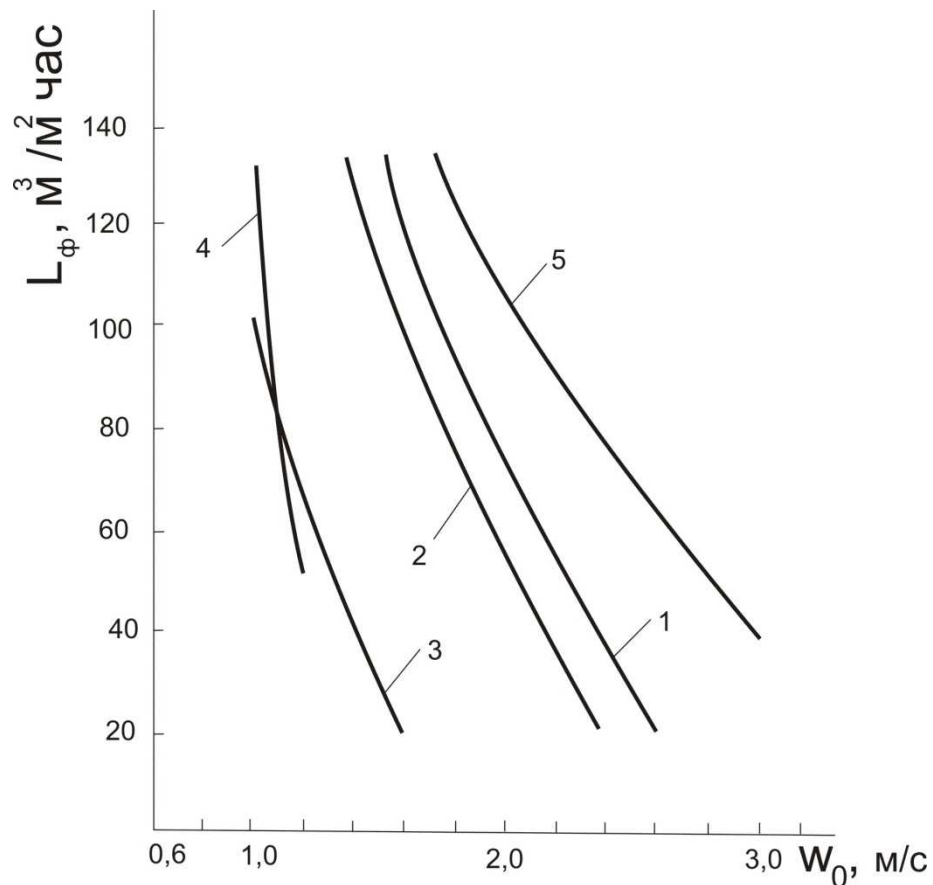


Рис. 10.13 Зависимость скорости начала подвисяния и захлебывания от плотности орошения для нерегулярных насадок размером 50 мм: зависимость $w_n=f(L_{op})$ для: 1 – насадка ГИАП-НЗ; 2 – кольца Палля; 3 – седла Инталокс; 4 – кольца Рашига; 5 – $w_3=f(L_{op})$ для насадки ГИАП-НЗ.

Если опытные данные отсутствуют, то скорость начала подвисяния можно определить по уравнению [359]:

$$Re_{\Gamma} = 0,045 Ar^{0,57} \left(\frac{G}{L}\right)^{0,43}, \quad (10.16)$$

где $Re_{\Gamma} = \frac{4w_{\Pi}}{\nu_{\Gamma}a}$, а $Ar = \frac{gd_{\text{з}}^3(\rho_{\text{ж}}-\rho_{\Gamma})}{\nu_{\Gamma}\rho_{\Gamma}}$ - критерий Архимеда.

Значения w_{Π} и w_3 можно также рассчитать по уравнению Бейна и Хоугена [359] при наличии соответствующих опытных данных:

$$\lg\left(\frac{w_{\Pi}^2 a}{g \varepsilon^3} \frac{\rho_{\Gamma}}{\rho_{\text{ж}}} \mu_{\text{ж}}^{0,16}\right) = b - c \left(\frac{L}{G}\right)^{0,25} \left(\frac{\rho_{\Gamma}}{\rho_{\text{ж}}}\right)^{0,125}. \quad (10.17)$$

Здесь $\mu_{\text{ж}}$ – вязкость жидкости в мПа·с; остальные обозначения прежние. Опытные значения b и c для некоторых насадок представлены в табл. 10.2.

Таблица 10.2.

Значения коэффициентов b и c в уравнении (10.17) для расчета скорости начала захлебывания и подвисяния

Гидродинамический режим		b	c
Подвисяние			
Кольца Рашига (внавал)	[22]	-0,073	1,75
Кольца Палля 50 мм	[16]	-0,49	1,04
Кольца Мебиуса	[23]	0,286	1,818
Седла 25 мм	[16]	-033	1,04
Седла 50 мм	[16]	-058	1,04
Пакетная насадка	[24]	0,062	1,55
Плоско-параллельная насадка	[25]	0	1,75
Захлебывание			
Кольца Рашига (внавал)	[26]	0,022	1,75
Кольца Мебиуса	[23]	0,024	1,632
Седла	[27]	0,26	1,75
Пакетная насадка	[28]	$*0,176(h/0,05)^{0,33}$	1,55

* h – высота пакета

Значения w_{II} и w_3 при заданном соотношении L/G можно определить, используя график Эдулджи (см. раздел 10.2.5).

В тех случаях, когда весовое соотношение строго не задано, рабочую скорость следует брать, базируясь на имеющемся опыте работы насадочных аппаратов. Так для испарительных градирен $w_0=1.8\div 2.3$ м/с и $L_{OP} = 5\div 15$ м³/м²·час. Для абсорбционных колонн выбор сопряженных значений w_0 и L_{OP} , соответствующих режиму начала подвисяния, должен быть в пределах скоростей газа $w_0 \approx 1\div 3$ м/с (участок АВ на кривой подвисяния рис. 10.14). Оптимальное соотношение L/G , лежащее в указанных выше пределах, как нам представляется, должно выбираться с учетом оптимальной величины потери напора в слое насадки. С этой целью на том же рис. 10.14 строится кривая зависимости $\Delta P=f(w_{II})$. Точка пересечения кривых будет соответствовать искомым значениям w_{II} и L_{OP} , и соответствующему им соотношению G/L или L/G .

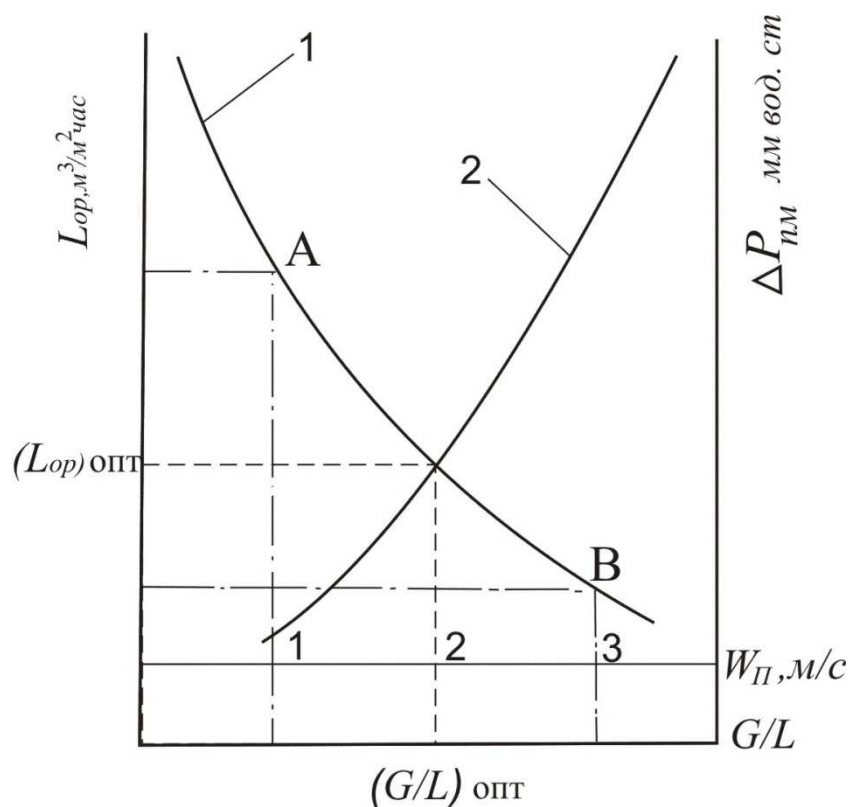


Рис. 10.14 Определение оптимальных значений w_{II} и L_{OP} и соотношения L/G на основании гидродинамических характеристик насадки: 1 - кривая скорости начала подвисяния; 2 – кривая зависимости $\Delta P=f(w_{II})$.

В тех случаях, когда необходимо иметь малое гидравлическое сопротивление в насадочном слое, принимают более низкую скорость газа - $w_0 < 0,8 w_{II}$. Если необходимо иметь более низкое L_{op} , то следует контролировать, чтобы оно не было меньше значения $L'_{об}$, ниже которого не достигается максимальное смачивание поверхности насадки и коэффициент смачивания $\psi_w = L_{op}/L'_{об}$, становится $\psi_w < 1,0$. Величина $L'_{об}$ определяется по формуле:

$$L'_{об} = ba, \quad (10.18)$$

где a – удельная поверхность насадки, m^2/m^3 ; b – коэффициент, значения которого приведены в табл. 10.3.

Таблица 10.3.

Значения коэффициента b в уравнении (10.18)

Процесс	b
Абсорбция аммиака водой	0,158
Абсорбция паров органических жидкостей водой	0,093
Ректификация	0,065
Испарение воды	0,065

В случае, если заданное $L_{op} < L_{op}'$, то нужно увеличить L_{op} , а если это невозможно, то применить насадку с меньшей удельной поверхностью, чтобы снизить величину L_{op}' .

По принятому значению w_0 и заданному количеству газа G - находится площадь поперечного сечения колонны:

$$S = \frac{G}{\rho_{\Gamma} 3600 w_0}, \text{ м}^2. \quad (10.19)$$

Далее по заданному количеству жидкости L уточняется плотность орошения:

$$L_{op} = \frac{L}{\rho_{\text{ж}} S}, \text{ м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{час}. \quad (10.20)$$

Площади сечения колонны S соответствует ее диаметр: $D_{\kappa} = (4S/\pi)^{1/2}$.

10.2.4. Расчет высоты насадочного слоя

Расчет высоты насадочного слоя для процессов абсорбции

Основной задачей при расчете насадочных аппаратов, в которых осуществляется любой процесс, в том числе и процесс абсорбции, является определение необходимой высоты слоя насадки – H . Правильная оценка H не только обеспечивает необходимую эффективность процесса разделения, но и наряду с рассчитанным значением диаметра, определяет габариты массообменного аппарата.

Исходными данными для расчета процесса абсорбции чаще всего являются: количество газовой смеси, поступающей на абсорбцию G_1 , кг/час, с концентрацией абсорбируемого компонента A , равной y_{A1} , кг/кг смеси при температуре t и давлении P ; расход газового потока на выходе из абсорбера G_2 , кг/час, концентрация абсорбируемого компонента на выходе из абсорбера, которая понижается до значения y_{A2} , кг/кг смеси; количество абсорбента на входе в абсорбер L_1 , кг/час с концентрацией компонента A , равной x_1 кг/кг (в ряде случаев возможно $x_1=0$), а на выходе с учетом поглощения компонента $A - L_2$, кг/час с концентрацией x_2 (см. рис. 10.15).

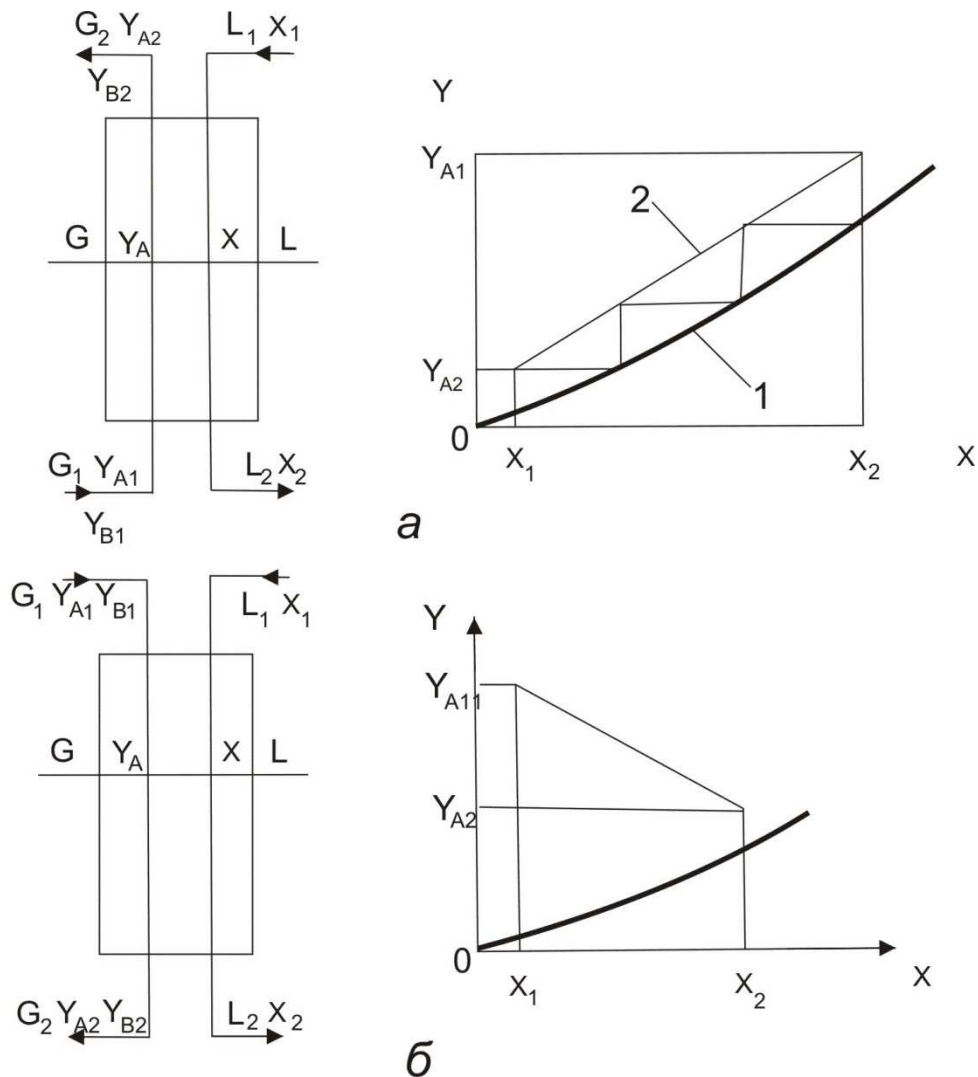


Рис. 10.15 Рабочие диаграммы однокомпонентной изотермической абсорбции нелетучим абсорбентом:
 а – противоток газа и жидкости: 1 – кривая равновесия; 2 – рабочая линия;
 б – прямоток газа и жидкости.

Если применяемый абсорбент отличается высокой летучестью, то он будет частично испаряться при контакте с газом и в восходящей газовой смеси появится концентрация паров абсорбента B , равная y_{B2} , кг/кг смеси. В самом общем случае пары абсорбента могут присутствовать и в исходной газовой смеси с концентрацией y_{B1} , кг/кг смеси.

В процессе абсорбции происходит приращение жидкой фазы за счет абсорбции $(G_1 \cdot y_{A1} - G_2 \cdot y_{A2})$ кг/час компонента A , которое превосходит убыль компонента за счет испарения $(G_2 \cdot y_{B2} - G_1 \cdot y_{B1})$ кг/ час. Следовательно:

$$G_1 \cdot y_{A1} - G_2 \cdot y_{A2} - (G_2 \cdot y_{B2} - G_1 \cdot y_{B1}) = L_2 - L_1. \quad (10.21)$$

В промышленности большей частью используются практически нелетучие абсорбенты, и тогда $y_{B1} = y_{B2} = 0$, массовый расход чистого абсорбента $L_0 = \text{const}$. Тогда уравнение материального баланса, если выразить концентрации в относительных соотношениях: $Y_1 = \frac{y_{A1}}{1 - y_{A1}}$; $Y_2 = \frac{y_{A2}}{1 - y_{A2}}$;

$$X_1 = \frac{x_1}{1 - x_1}; \quad X_2 = \frac{x_2}{1 - x_2}$$

$$G_0 \cdot (Y_1 - Y_2) = L_0 \cdot (X_2 - X_1), \quad (10.22)$$

где G_0 – инертная часть газового потока, кг/час. Отсюда часовой расход абсорбента, если он задан:

$$L_0 = G_0 \frac{Y_1 - Y_2}{X_1 - X_2} \quad (10.23)$$

или концентрация извлекаемого из газовой смеси компонента, если она задана:

$$X_2 = \frac{G_0(Y_1 - Y_2) + L_0 X_1}{L_0}. \quad (10.24)$$

Уравнение рабочей линии для случая противотока:

$$Y_A = \left[Y_{A2} - \frac{L_1}{G_2} - \left(Y_{A2} - \frac{L_1}{G_2} \right) x \right] / \left[1 - \frac{L_1}{G_2} x_1 - \left(1 - \frac{L_1}{G_2} \right) x \right]. \quad (10.25)$$

Уравнение рабочей линии для случая прямотока:

$$Y_A = \left[Y_{A1} + \frac{L_1}{G_1} x_1 - \left(Y_{A1} + \frac{L_1}{G_1} \right) x \right] / \left[1 + \frac{L_1}{G_1} x_1 - \left(1 + \frac{L_1}{G_1} \right) x \right]. \quad (10.26)$$

Далее в координатах $y=f(x)$, используя уравнение 10.25, строится рабочая линия (рис. 10.4а). На этот же график наносится линия равновесия. Исходные данные для ее построения – $y_p=f(x)$ при заданных t и P , берутся из справочных материалов, а если таковые отсутствуют, то рассчитываются. Для этого сначала рассчитываются парциальные давления извлекаемого компонента в пределах между значениями y_1 и y_2 , взятыми в объемных долях: $p_1=Py_1$ и т.д. Далее по эмпирическим уравнениям вида $m_{px}=A/(a-bp)$, где A , a и b – коэффициенты (значения a и b изменяются в зависимости от температуры); в тех же пределах рассчитываются константы фазового равновесия – m_{px} и, наконец, равновесные значения $y_p = \frac{m_{px}x}{P} = m_{yx}x$.

Построив в координатах $y=f(x)$ рабочую и равновесные линии (рис. 10.16), можно графическим путем определить необходимое число единиц переноса, отнесенное к концентрациям газа – N_E .

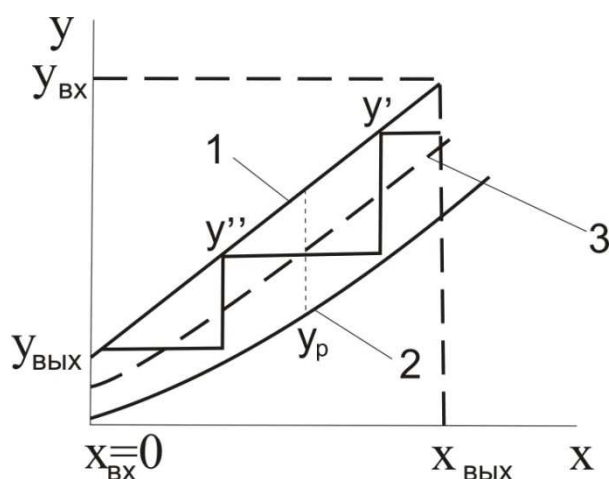


Рис. 10.16 Определение числа единиц переноса – N_E :

1 – рабочая линия; 2 – равновесная кривая;

3 – вспомогательная кривая {проводится через середину ординат $(y-y_p)/0.5$ }.

Для этого через середины отрезков ординат, заключенных между рабочей и равновесной кривой, проводится вспомогательная линия (см. пунктирную линию на рис. 10.16). Далее, начиная с точки $y_{вых}$, проводятся горизонтальные линии таким образом, чтобы каждая из этих линий, соответствующая одной единице переноса, делилась вспомогательной линией пополам.

Для определения числа единиц переноса может быть также использован метод численного интегрирования, предложенный Симпсоном [392]. По данному методу $y_{вх}-y_{вых}$ делят на два равных участка (рис. 10.17).

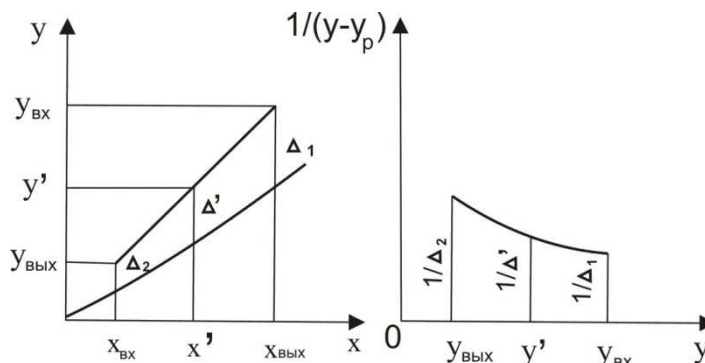


Рис. 10.17 Определение числа единиц переноса методом Симпсона [16].

Соответствующие значения движущих сил будут: $\Delta_1=y_{вх}-y_{вх,p}$, $\Delta'=y'-y'_p$, $\Delta_2=y_{вых}-y_{вых,p}$. Число единиц переноса в этом случае будет равно:

$$N_E = \frac{y_{вх} - y_{вых}}{6} \left(\frac{1}{\Delta_1} + \frac{4}{\Delta'} + \frac{1}{\Delta_2} \right), \quad (10.27)$$

а средняя движущая сила:

$$\Delta C_{ср} = \frac{6}{\frac{1}{\Delta_1} + \frac{4}{\Delta'} + \frac{1}{\Delta_2}}. \quad (10.28)$$

Для расчета высоты насадочного слоя помимо N_E необходимо знание высоты, эквивалентной единице переноса ВЕП - h_E . Эта характеристика эффективности массопереноса находит самое широкое применение для процессов абсорбции. Наиболее достоверными являются значения h_E , полученные на основании опытных данных. Если таковые отсутствуют, то прибегают к расчету.

ВЕП складывается из высот единиц переноса в газовой – h_{EG} и жидкой фазе - $h_{EЖ}$. Для газовой фазы высота единицы переноса может определяться для нерегулярных насадок по формуле [209,210]:

$$h_{EG}=0,615d_p Re_G^{0,345} Pr_{ГД}^{2/3}, \quad (10.29)$$

для регулярных насадок:

$$h_{EG} = 1,5 d_3 Re_{\Gamma}^{0,26} Pr_{\Gamma D}^{2/3} (l/d_3)^{0,47}, \quad (10.30)$$

где $d_3 = 4\varepsilon/a$; $Re_{\Gamma} = d_3 w_0 / \nu_{\Gamma} \varepsilon$; $Pr_{\Gamma D} = \nu_{\Gamma} / D_{\Gamma}$;
 ν_{Γ} – вязкость газа, м²/с; D_{Γ} – коэффициент диффузии газа, м²/с; l – высота элемента насадки, м.

Для определения высоты единицы переноса в жидкой фазе может быть использована формула:

$$h_{Eж} = 119 \zeta_{прив} Re_{ж}^{0,25} Pr_{жD}^{0,5}, \quad (10.31)$$

где $Re_{ж} = d_3 L_{op} / \nu_{ж}$; $Pr_{жD} = \nu_{ж} / D_{ж}$; $\zeta_{прив} = (\nu_{ж}^2 / g)^{1/3}$ – приведенная толщина пленки жидкости; $\nu_{ж}$ и $D_{ж}$ – коэффициенты вязкости и диффузии жидкости, м²/с.

Совокупная высота единицы переноса:

$$h_E = h_{EG} + h_{Eж} \cdot m_{yx} / l, \quad (10.32)$$

здесь $l = L/G$ – удельный расход поглотителя; m_{yx} – константа фазового равновесия.

Высота слоя насадки без коэффициента запаса:

$$H = N_E \cdot h_E.$$

Коэффициент запаса, учитывающий погрешности расчета, а также отрицательное влияние масштабного фактора, может колебаться в интервале от 1,25 [232] до 2,0 [392].

Поскольку высота единицы переноса связана с объемным коэффициентом массопередачи K_{Gv} (кг/м³·час) уравнением:

$$h_{EG} = G / K_{Gv} S, \quad (10.33)$$

то определение h_{EG} может быть осуществлено через K_{Gv} . Здесь S – площадь поперечного сечения аппарата.

В случае хорошей растворимости абсорбируемого газа (например, NH₃ в воде), активная поверхность насадки вообще не поддается расчету. В этом случае базируются именно на объемном коэффициенте массопередачи, определяемом часто по эмпирическим формулам [178], которые по своей надежности уступают критериальным зависимостям:

$$K_v = A \cdot G^m \cdot L^n, \quad (10.34)$$

где G и L – расходы газа и жидкости, а A , m и n – опытные коэффициенты, колеблющиеся по данным различных исследователей в широких пределах (например для колец Рашига размером $10 \div 25$ мм в среднем $A=0,9$, $m=0,75$, $n=36$; для седел Берля размером $13 \div 25$ мм в среднем $A=0,38$; $m=0,8$; $n=0,4$).

В некоторых случаях возможно определение необходимой высоты насадки, через коэффициенты массоотдачи, отнесенные к единице поверхности контакта фаз – β_G и $\beta_{ж}$, которые рассчитываются по соответствующим критериальным уравнениям. Коэффициент массоотдачи в газовой фазе – β_G можно рассчитать для случая плохой растворимости абсорбируемого газа по формуле [178,392]:

$$Nu_{DG} = 0,407 \cdot Re_{\Gamma}^{0,655} \cdot Pr_{DG}^{1/3}, \quad (10.35)$$

где: $Nu_{DG} = \beta_G d_{\text{э}} / D_G$; $Re_{\Gamma} = d_{\text{э}} w_0 / \nu_{\Gamma} \epsilon$; $Pr_{DG} = \nu_{\Gamma} / D_G$.

Коэффициент массоотдачи в жидкой фазе $\beta_{ж}$ рассчитывается по формуле:

$$Nu_{D_{ж}} = 0,01 \cdot Re_{ж}^{0,5} Pr_{D_{ж}}^{0,5}, \quad (10.36)$$

где: $Nu_{D_{ж}} = \beta_{ж} d_{\text{э}} / D_{ж}$; $Re_{ж} = d_{\text{э}} L_{op} / \nu_{ж}$; $Pr_{D_{ж}} = \nu_{ж} / D_{ж}$, а $D_{ж}$ – коэффициент диффузии, м²/с.

Коэффициент массопередачи, отнесенный к концентрации газа:

$$\frac{1}{K_G} = \frac{1}{\beta_G} + \frac{m}{\beta_{ж}}$$

Далее из уравнения массопередачи:

$$M = K_G \cdot F \cdot \Delta_{cp}, \quad (10.37)$$

где: M – количество абсорбированного вещества, а Δ_{cp} – средняя движущая сила процесса массопередачи (рассчитывается по уравнению 10.28), определяется F . Необходимая геометрическая поверхность насадки:

$$F_G = F / \psi_a, \quad (10.38)$$

здесь ψ_a – коэффициент активной поверхности, характеризующий долю геометрической поверхности насадки, участвующую в массообменном процессе (см. раздел 7). Уравнения для расчета ψ_a см. в [392].

Необходимая высота насадки:

$$H = \frac{F_{\Gamma}}{aS}. \quad (10.39)$$

Однако, точность расчетов по этому методу недостаточно велика, т.к. ψ_a не подлежит точной оценке, из-за множества факторов, влияющих на него, в том числе, плотности орошения, скорости газа, конструкции и размера насадки, высоты слоев насадки на отдельных полках и даже способы загрузки насадки в абсорбер.

Варианты расчетов необходимой высоты насадки для различных абсорбционных процессов рассматриваются в [178,306,392].

Расчет высоты насадочного слоя для процессов ректификации

Для оценки высоты слоя насадки в насадочных аппаратах для осуществления процесса ректификации преимущественно используется наиболее распространенная в инженерной практике методика расчета, базирующаяся на определении необходимого для разделения числа теоретических тарелок – N_T . С этой целью на графике $y=f(x)$ строится равновесная линия (аналогично описанному выше в разделе 10.1.4.1.). Далее, например, для процесса непрерывной ректификации бинарной смеси по уравнениям рабочих линий строятся рабочие линии для укрепляющей (верхней) и исчерпывающей (нижней) частей ректификационной колонны (см. рис. 10.18).

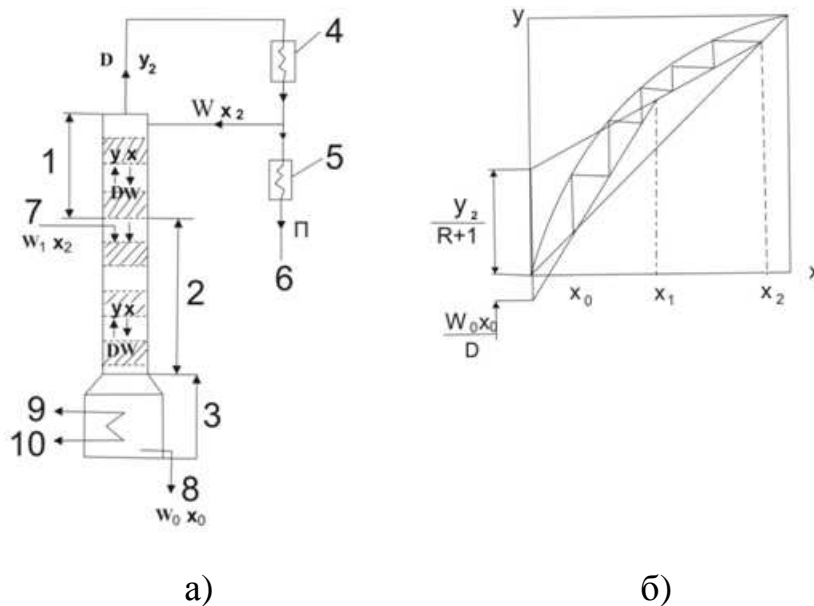


Рис. 10.18 Определение числа теоретических тарелок N_T (теоретических ступеней равновесия) в процессе непрерывной ректификации: а – схема установки: 1 – укрепляющая колонна; 2 – исчерпывающая колонна; 3 – дистилляционный куб; 4 – конденсатор; 5 – холодильник дистиллята; 6 – отвод дистиллята; 7 – подача исходной смеси; 8 – отвод кубового остатка; 9 – вход греющего пара; 10 – выход конденсата; б – диаграмма для определения N_T .

Уравнение рабочей линии для укрепляющей части колонны:

$$y = (\Pi/D) \cdot y_2 + (W/D) \cdot x = y_2 / (R+1) + [R/(R+1)] x. \quad (10.40)$$

Уравнение рабочей линии для исчерпывающей колонны:

$$y = - (W_0/D) x_0 + (W'/D) x, \quad (10.41)$$

где W – поток возвращаемого дистиллята (флегма), кмоль; D – уходящая из колонны паровая смесь, кмоль; Π – дистиллят, кмоль; $R = W/\Pi$ – флегмовое число, кмоль; W_0 – поток кубового остатка, кмоль; $W' = W + W_1$ – поток жидкости в исчерпывающей части колонны, кмоль; W_1 – количество жидкости, поступающей в колонну на разделение, кмоль; y_2 и x_0 – концентрация низкокипящего компонента, соответственно в уходящей паровой смеси и в кубовом остатке.

По форме уравнения (10.40) и (10.41) аналогичны уравнению рабочей линии для процесса абсорбции.

Далее определяется необходимое для заданного процесса разделения число теоретических тарелок или число теоретических ступеней, заключенных между этими кривыми.

Наиболее надежными значениями высоты слоя насадки, эквивалентной одной теоретической тарелке – ВЭТТ являются значения h_T , полученные опытным путем для конкретной системы на конкретной насадке, поскольку предложенный ряд эмпирических формул плохо согласуется между собой и с опытом работы промышленных колонн [257].

Высота насадочного слоя:

$$H = N_T h_T. \quad (10.42)$$

При расчете через число единиц переноса - N_E , число которых определяется так же, как описано выше (см. раздел 10.1.4.1), для определения ВЭП– h_E используются те же уравнения, что и для процесса абсорбции.

Поскольку $h_T = H / N_T$, а $h_E = H / N_E$, то отсюда возникает соотношение, связывающее эти показатели эффективности насадочных колонн:

$$h_T / h_E = N_E / N_T. \quad (10.43)$$

Расчеты ректификации различных смесей (бинарной, многокомпонентной, азеотропной и др.) см. [141,178,306,416,421].

10.2.5. Расчет гидравлического сопротивления

Гидравлическое сопротивление неорошаемого слоя насадки (сухой насадки) с учетом порозности слоя – ε и значения d_{Σ} можно рассчитать по уравнению:

$$\Delta P_C = \xi \left(H w_0^2 \rho_{\Gamma} a / 8 \varepsilon^3 \right), \quad (10.44)$$

здесь ξ – коэффициент сопротивления.

Для слоя колец Рашига, загруженных внавал по данным [206] при $Re_{\Gamma} < 40$, $\xi = 140 / Re_{\Gamma}$, при $Re_{\Gamma} > 40$, $\xi = 16 / Re_{\Gamma}^{0,2}$.

Для нерегулярных насадок, в которых пустоты равномерны по всем направлениям (шары, седлообразные насадки), для ламинарного и турбулентного режима ξ может быть рассчитан по уравнению:

$$\xi = \frac{133}{Re_{\Gamma}} + 2,34. \quad (10.45)$$

Для определения гидравлического сопротивления орошаемой насадки – ΔP в [105] для режимов ниже точки подвисания предлагается использовать графическую зависимость $\Delta P/\Delta P_C = f(K)$ для загруженных внавал колец Рашига и Палля, а также седел Инталокс и Берля (рис. 10.19), где K :

$$K = 0,12 Fr_{ж} Re_{ж}^{-0,8} (1 + 7,5 \cdot 10^{-5} Re_{\Gamma}), \quad (10.46)$$

здесь: $Fr_{ж} = L_{op}^{2,0} a/g$ – критерий Фруда для жидкости, рассчитанный по плотности орошения и удельной поверхности насадки.

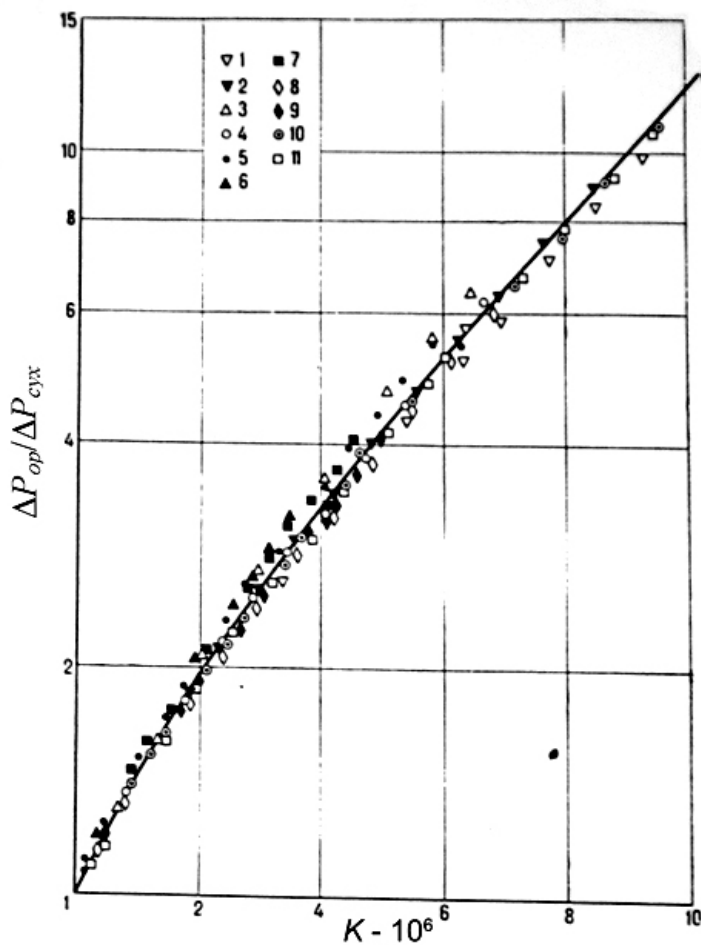


Рис. 10.19 Значения $\Delta P_{op}/\Delta P_{сух}$ в зависимости от K :

- 1 – кольца Рашига размером 30 мм;
- 2 – то же, 35 мм;
- 3 – то же, 50 мм;
- 4 – кольца Палля размером 25 мм;
- 5 – то же, 35 мм;
- 6 – то же, 50 мм;
- 7 – седла Берля размером 38 мм;
- 8 – седла Инталокс размером 25 мм;
- 9 – то же, 35 мм;
- 10 – стальные кольца Палля размером 35 мм;
- 11 – стальные седла Берля размером 35 мм.

Для определения гидравлического сопротивления слоя орошаемой насадки при всех гидродинамических режимах и наиболее распространенных видов насадок пользуются графиком Эдулджи (рис. 10.20), построенном по результатам обширных экспериментов [29].

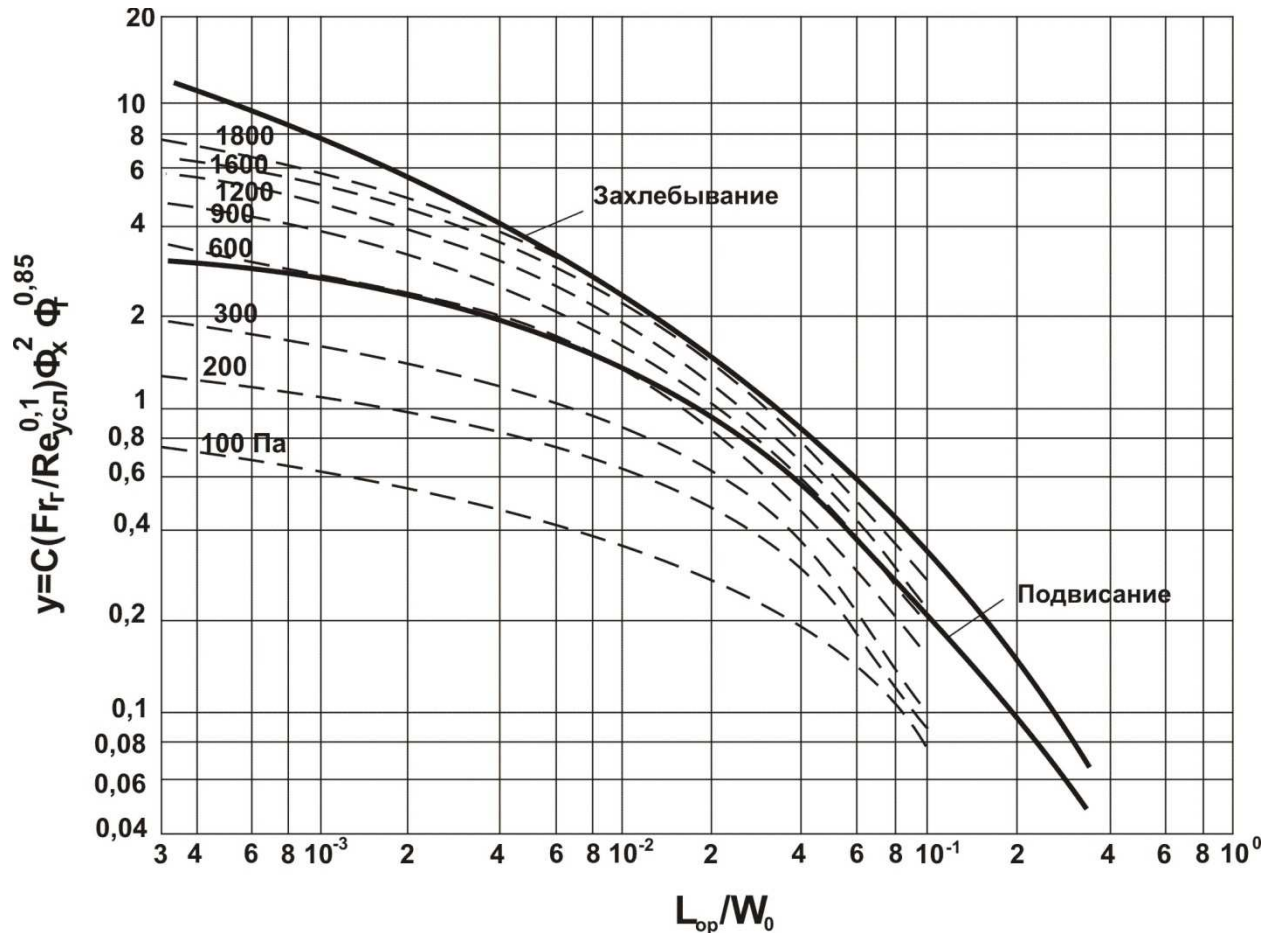


Рис. 10.20 Зависимость комплекса $Y = C \frac{Fr_{\Gamma}}{Re_{усл}^{0,1}} \Phi_{ж}^2 \Phi_{\Gamma}^{0,85}$ от $L_{ор}/W_0$

(линии равных $\Delta P_{ор}/H$ показаны пунктиром).

На этом графике представлена функциональная зависимость:

$$Y = C(Fr_{\Gamma}/Re_{усл}^{0,1})(\gamma_{в}/\gamma_{ж})^2(\gamma_{\Gamma}/\gamma_0)^{0,85} = f(L_{ор}/w_0), \quad (10.47)$$

где $Fr_{\Gamma} = w_0^2/gd$ – критерий Фруда для газа; d – номинальный размер элемента насадки; $Re_{усл} = w_0 d \rho_{\Gamma}/\mu_{ж}$; $\gamma_{в}$ – удельный вес воды; γ_0 – удельный вес воздуха; $\rho = \gamma_{\Gamma}/g$ – плотность газа; $\mu_{ж}$ – динамическая вязкость жидкости, кгс/м²; C – коэффициент, значения которого для некоторых насадок приведены в табл. 10.4.

Таблица 10.4.

Значения коэффициента C в уравнениях (10.47) и (10.48)

Наименование насадки	d , мм	C
Кольца Рашига (регулярная укладка)	15÷38	0,251
Металлические кольца Палля	25÷38	0,261
Седла Инталокс	13÷38	0,370
Проволочные спирали	13	0,447
Седла Берля	13÷38	0,471
Металлические кольца Рашига (внавал)	25÷50	0,61
Кольца Рашига (внавал)	9,5÷50	1,0
Спиральные кольца (внавал)	76	1,1
Спиральные кольца (регулярная укладка)	76	1,33
Кусковая	15÷35	2,75

На графике разграничены гидродинамические режимы работы насадочных колонн (сплошные линии), а пунктирными линиями соединены точки, соответствующие равным значениям $\Delta P/H$. Это позволяет определить не только гидравлическое сопротивление орошаемых насадок, но также скорости газа, соответствующие началу подвисяния (w_{II}) и захлебывания (w_3). Отношение L_{op}/w_0 , равное отношению объемных расходов жидкости и газа, всегда известно из технологических расчетов аппарата. Поэтому на графике можно найти соответствующие этому отношению значения Y , отвечающие точкам начала подвисяния Y_{II} и начала захлебывания Y_3 . Зная же эти величины, легко определить искомые скорости газа:

$$(w_{II}, w_3) = \left[\frac{(Y_{II} Y_3) g d^{1.1} \rho_{\Gamma}^{0.1}}{C \mu_{жс}^{0.1} (\gamma_в / \gamma_{жс})^{2.0} (\gamma_{\Gamma} / \gamma_0)^{0.85}} \right]^{0.527}. \quad (10.48)$$

Хотя в настоящее время использование рис. 10-8 и 10-9 считается довольно надежным для определения ΔP все же эти методики дают расхождения. Это расхождение в известной степени объясняется недостаточной идентичностью разных партий насадок, а также различиями в их засыпке.

В [128] предлагается вычисление ΔP по критериальной зависимости:

$$Eu'_{\Gamma} = Eu_{\Gamma} \cdot 10^{m Re_{жс}}, \quad (10.49)$$

где $Eu'_Г$ – критерий Эйлера для газа в условиях орошения насадки;

$Eu_Г = \frac{\Delta P_c g \varepsilon^2}{w_0^2 \gamma_Г}$ – критерий Эйлера для газа в условиях сухой насадки;

$Re_{жс} = \frac{4L_{оп}}{a v_{жс}}$; m – коэффициент, зависящий от типа и размера насадки.

Значения коэффициентов m для некоторых типов изученных насадок представлены в табл. 10.5.

Таблица 10.5.

Значения коэффициента m в уравнении (10.34)

Тип насадки	Размер насадки, мм	$m \cdot 10^3$	
Кольца Рашига	50	0,79	[69]
Седла Инталокс*	50	0,73	[69]
Кольца Палля	50	0,718	[69]
Насадка ГИАП-НЗ	50	0,653	[69]
Насадка ГИАП-НЗ	38	0,931	[59]
Кольца Мебиуса	40×40	1,94	[237]

* - материал седел Инталокс – керамика, остальные насадки металлические

10.2.6. Расчет количества удерживаемой жидкости

Задержка жидкости в насадке, или количество удерживаемой жидкости – $u_з$ складывается из статической – $u_{ст}$ и динамической – $u_{дин}$ составляющих: $u_з = u_{ст} + u_{дин}$. Величина $u_{ст}$ выражает количество жидкости, удерживаемое насадкой благодаря капиллярным силам, т.е. независимо от потоков газа и жидкости. Она определяется свойствами жидкости и материала насадки, а также формой последней. Величина $u_{дин}$ выражает количество жидкости, удерживаемое насадкой благодаря ее орошению при наличии потока газа. Очевидно, что КУЖ, приходящееся на единицу орошаемой поверхности, равно средней толщине жидкостной пленки: $\delta = u_з/a$.

Величины $u_{ст}$ и $u_{дин}$ не поддаются теоретическому расчету. Для их определения предложен ряд эмпирических формул, полученных путем обобщения опытных данных в сравнительно узком диапазоне физических свойств жидкостей, размеров и формы элементов насадки. Для ориентировочных оценок можно пользоваться следующими формулами при режимах ниже точки подвисяния. Для расчета $u_{дин}$ [2]:

$$u_{дин} = 0,747 Re_{жс}^{0,64} Ga^{-0,42}, \quad (10.50)$$

где $Ga = g/a^3 \nu_{жс}^2$ – критерий Галилея. Уравнение (10.50) получено для колец, загруженных внавал. Для расчета $u_{ст}$ [13]:

$$u_{ст} = b(a_{эл}/\pi)^{-0,5p} (\mu_{жс}^m \sigma^n / \rho_{жс}^{0,37}) \quad (10.51)$$

здесь: $a_{эл}$ – поверхность одного элемента насадки; $\mu_{жс}$, σ и $\rho_{жс}$ – коэффициент динамической вязкости, межфазное поверхностное натяжение и плотность жидкости; для фарфоровых колец Рашига $b = 5 \cdot 10^{-5}$, $p=1,21$, $m= 0,02$, $n=0,99$; для седел Берля $b = 7 \cdot 10^{-5}$, $p=1,56$, $m= 0,04$, $n=0,55$.

Суммарную задержку жидкости в режиме подвисяния можно определить по формуле [18]:

$$u_z = \varepsilon(1-\varepsilon'/\varepsilon), \quad (10.52)$$

где ε – порозность неорошаемой насадки (кольца и кусковой материал размером 16÷35 мм); ε' – порозность орошаемой насадки. При этом $\varepsilon'/\varepsilon = f[(w_0/L_{оп})Ga_d^{0,1}]$. Критерий Галилея в данном случае базируется на номинальном диаметре элемента насадки, т.е. $Ga_d = gd^3/\nu_{жс}^2$.

Таблица 10.6

Численные значения функции

$w_0/L_{оп}Ga_d^{0,1}$	1,0	5,0	10	20	50	100	200	400	600	1000	10000
ε'/ε	0,54	0,57	0,615	0,65	0,70	0,75	0,80	0,85	0,854	0,90	0,95

Ряд эмпирических уравнений для оценки КУЖ рассматриваются в [128]. Однако возможности их использования ограничены, поскольку они в основном базируются на опытных данных, полученных для колец Рашига.

10.3. Расчет аппаратов для теплообмена при непосредственном контакте фаз (скрубберов)

Такие стадии расчета, как выбор типа насадки, ее размера, расчет диаметра аппарата, гидравлического сопротивления, полностью идентичны с расчетами, выполняемыми для массообменных насадочных аппаратов. Для расчета высоты слоя насадки существенно то обстоятельство, что при нагреве газа в аппаратах с непосредственным контактом фаз одновременно происходит его насыщение парами жидкости, а при охлаждении падает его влагосодержание.

Изменение энтальпии газа и жидкости в процессе теплообмена в скруббере в координатах $t-J$ иллюстрируется на рис. 10.21. Если ставится задача охладить или нагреть газ, то задается его количество G , его температура на входе θ_1 и на выходе θ_2 , относительная влажность φ . Это дает возможность рассчитать теплосодержание парогазовой смеси по правилу аддитивности:

$$i = i_{\Gamma} + i_{\Pi} = c_{\Gamma}\theta + x(r + c_{\Pi}) = c_{\Gamma}\theta + \frac{z_{\Gamma}}{z_{\Pi}} \cdot \frac{R_{\Gamma}}{R_{\Pi}} \cdot \frac{\varphi \cdot p_n}{P - \varphi \cdot p_n} (r + c_{\Pi}), \quad (10.53)$$

где i_{Γ} – теплосодержание сухого газа, ккал/кг; i_{Π} – теплосодержание паров жидкости в расчете на 1 кг сухого газа, ккал/кг; c_{Γ} и c_{Π} – теплоемкости соответственно газа и пара, ккал/кг; x – влагосодержание, кг на 1 кг сухого газа; r – теплота парообразования при 0°C, ккал/кг; z_{Γ} и z_{Π} – коэффициенты сжимаемости соответственно газа и пара; R_{Γ} и R_{Π} – газовые постоянные газа и пара; p_n – давление насыщенного пара при температуре θ , кг/см². Тогда количество тепла отданного газом Q_{Γ} :

$$Q_{\Gamma} = G(i_1 - i_2) = \Delta J_{\Gamma} = J_{\Gamma 1} - J_{\Gamma 2}, \quad (10.54)$$

где i_1 и i_2 – теплосодержание газа соответственно на входе и выходе из скруббера в процессе охлаждения газа, ккал/кг; $J_{Г1}$ и $J_{Г2}$ – тоже, ккал/ч.

Количество жидкости, подаваемой на охлаждение (или на нагревание) газа – L , или задается, исходя из технологии процесса, или рассчитывается через плотность орошения, соответствующую выбранной скорости газа (см. раздел 10.2.3.). Температура жидкости на входе – t_1 задается. Температура жидкости на выходе может быть найдена через $Q_{Г} = Q_{Ж}$.

Количество тепла, принятого жидкостью:

$$Q_{ж} = (L + G\Delta x) \cdot i_{ж2} - i_{ж1} L = \Delta J_{ж} = J_{ж2} - J_{ж1} \quad (10.55)$$

здесь $i_{ж2}$ и $i_{ж1}$ – теплосодержание жидкости, соответственно на выходе и входе в скруббер в ккал/кг; $J_{ж2}$ и $J_{ж1}$ – то же в ккал/ч.

Уравнение теплового баланса для случая охлаждения газа:

$$G(i_1 - i_2) = J_{Г1} - J_{Г2} = (L + G\Delta x) \cdot i_{ж2} - L i_{ж1}. \quad (10.56)$$

Уравнение теплового баланса для случая нагрева газа:

$$G(i_2 - i_1) = J_{Г2} - J_{Г1} = L i_{ж1} - (L - G\Delta x) \cdot i_{ж2} = J_{ж1} - J_{ж2}. \quad (10.57)$$

Энтальпии жидкости (рис. 10.21) изменяются линейно в случае малой летучести или низкого содержания паров в охлаждаемом газе, а также при незначительном изменении теплоемкости жидкости в рассматриваемом интервале температур и давлений.

При известных начальных и конечных температурах обоих потоков и известном соотношении количеств газа и жидкости процесс теплообмена возможен, если кривые энтальпии на диаграмме $t-J$ не касаются друг друга и не пересекаются. На практике из-за колебаний рабочего режима минимальная разность температур между потоками по высоте скруббера должна быть не менее 3°C . Если допустить, что на каждой ступени теплового равновесия происходит выравнивание температур газа и жидкости, то процесс теплообмена на $t-J$ диаграмме изобразится ломаной линией, заключенной между кривыми, характеризующими изменение энтальпии газа и жидкости в рассматриваемых условиях (рис. 10.21).

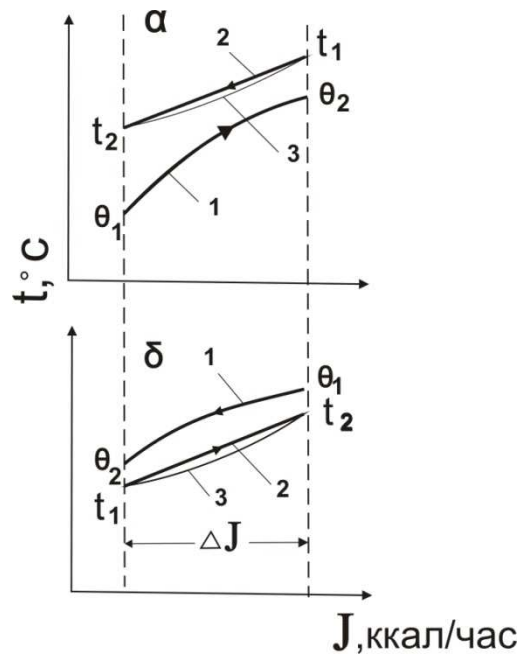


Рис. 10.21 Изображение процесса теплообмена при непосредственном контакте жидкости и газа в случае нагревания (а) и охлаждения (б) газа:
 1 – изменение энтальпии газа;
 2 – изменение энтальпии жидкости при $L=const$; 3 – то же при $L \neq const$.

Каждый из горизонтальных участков, параллельных оси абсцисс, соответствует одной теоретической ступени теплового равновесия, поскольку на каждом из них стекающая жидкость и покидающая парогазовая смесь имеют одинаковую температуру. Располагая данными о числе ступеней теплового равновесия – N_C и высоте слоя насадки, эквивалентной одной теоретической ступени теплового равновесия – h_C , полученными экспериментальным путем для заданных нагрузок по жидкости и газу (L_{op} и w_0) рассматриваемой системы, можно рассчитать необходимую высоту насадочного слоя:

$$H = h_C N_C$$

Следует иметь ввиду, что только для случая нагрева газа и охлаждения насыщенного (при $\varphi=1$) газа $h_C=const.$ по всей высоте скруббера. При охлаждении сухого или ненасыщенного газа в нижней части аппарата происходит охлаждение газа с одновременным его насыщением до $\varphi=1,0$, что сопровождается испарением жидкости. Эффективность теплоотдачи в этой

части аппарата существенно ниже, чем в верхней части, где охлаждается уже полностью насыщенный газ, что сопровождается частичной конденсацией паров (схему изменения параметров при охлаждении сухого или ненасыщенного газа см. на рис. 10.22).

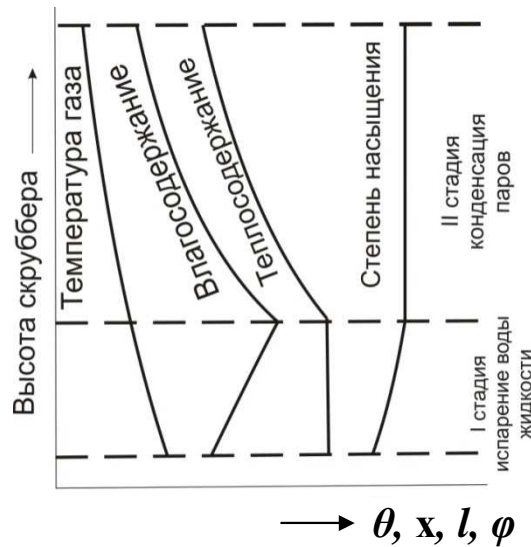


Рис. 10.22 Охлаждение сухого или ненасыщенного газа. Схема изменения его параметров по высоте скруббера.

Поэтому для получения данных о некоем усредненном значении h_C для случая охлаждения сухого или ненасыщенного газа, в ходе экспериментов должны, строго говоря, полностью воспроизводиться все условия осуществления процесса охлаждения в промышленном аппарате.

Круг критериальных уравнений, предлагаемых для расчета теплоотдачи в скрубберах весьма ограничен, а расчеты по ним недостаточно точны. Так для случая охлаждения ненасыщенного газа водой в насадочном скруббере в [201,327,359] предлагается обобщенная формула:

$$Ki = 0,01 Re_G^{0,7} Re_{жс}^{0,7} Pr_G^{0,33}, \quad (10.58)$$

где $Ki = Kd/\lambda_G$ – критерий Кирпичева; K – коэффициент теплопередачи, ккал/м²·час°С;

λ_G – теплопроводность газа, ккал/м·час°С; $Pr_G = C_p \mu_G g 3600 / \lambda_G$ – критерий Прандтля для газа; остальные обозначения прежние.

Формула (10.58) получена для случая охлаждения воздуха в интервале от $\sim 80^{\circ}\text{C}$ до 10°C при $L_{OP} \approx 3 \div 10 \text{ м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{час}$. Поэтому возможность ее применения, учитывая особенности теплопередачи при охлаждении ненасыщенного газа, указанные выше, ограничена.

Необходимая поверхность теплообмена, принимая ее равной поверхности насадки:

$$F = \frac{Q_{\Gamma}}{K\Delta t} = \frac{G(i_2 - i_1)}{K\Delta t}, \quad (10.59)$$

где Δt – логарифмическая разность температур между начальными и конечными температурами воды и воздуха, $^{\circ}\text{C}$.

Необходимое количество насадки:

$$V_{cl} = F/a$$

Необходимая высота насадочного слоя:

$$H = V_{cl}/S$$

где $S = G/(\gamma_{\Gamma} 3600 w_0)$, м^2 – площадь поперечного сечения скруббера.

О методах теплового расчета скрубберов см. [392,201].

ГЛАВА 11

ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЕ И МАССООБМЕННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ НАСАДОК «ИНЖЕХИМ»

В данной главе представлены результаты экспериментальных исследований гидравлических и массообменных характеристик регулярных и нерегулярных насадок «Инжехим» [190-193,293,294,298,300,425,452], используемых при проектировании или модернизации тепло- и массообменных аппаратов. Конструктивные характеристики данных насадок представлены в разделе 3.4.

11.1. Конструирование насадочных контактных устройств

В последние годы в практике отечественных и зарубежных предприятий сложилась устойчивая тенденция к замене устаревших контактных элементов (барботажных тарелок, насадок и т.п.) преимущественно в вакуумных и атмосферных колоннах на модернизированные или вновь разработанные виды насадок, обладающих более широким интервалом устойчивой работы и большей эффективностью [95,186,223,224,228,249,270,301,313,362,389,390, 391,400,412,426,434,435].

При создании насадок новых типов ставятся следующие цели: во-первых, увеличение эффективности массообменного процесса, во-вторых, расширение интервала устойчивой работы аппарата (как по нижнему, так и по верхнему пределам).

Широко используются, насадочные элементы как зарубежных, так и отечественных фирм, например, нерегулярные насадки НУ-ПАК, CASCADE-RINGS, «Инжехим», ГИПХ, ГИАП и регулярные – INTALOX, Sulzer, Koch, «Инжехим», Norton, «Меллапак», «Вакупак», «Кедр» и др.

Обилие известных конструкций насадок, различия в характере их укладки и широкий диапазон материалов, из которых они могут изготавливаться, обуславливают необходимость классификации насадочных контактных устройств. В литературе известны попытки такой классификации (глава 3).

При разработке конструкций регулярных и нерегулярных насадочных элементов авторами данной монографии учитывались и анализировались реальные физические процессы, происходящие при массообмене [298,300,301,452]. Так, например, известно, что при ректификации большинства смесей сопротивление массопередаче от 60 до 90 % сосредотачивается в паровой фазе. Отсюда напрашивается вывод об организации интенсивной турбулизации паровой фазы за счет различных конструктивных решений по форме насадки. Эти выводы справедливы и для абсорбции легко растворимых газов. Если основное сопротивление массопередаче сосредоточено в жидкой фазе, то необходима организация волнового и даже турбулентного пленочного течения по элементам насадки.

Одним из способов интенсификации массоотдачи в жидкой фазе является создание шероховатой поверхности контактных устройств. Для выбора высоты элементов шероховатости использовались известные исследования ряда авторов [21,56,157-159,166,266,267,335,438]. Установлено, что если высота выступов небольшая, т. е. они утоплены в вязком подслое, то коэффициент массоотдачи меньше на 10–15 %, чем для гладких

поверхностей. Если высота выступов приблизительно равна толщине вязкого подслоя, то коэффициент массоотдачи сравним с коэффициентом массоотдачи для гладкой поверхности. Для увеличения интенсивности массоотдачи по сравнению с гладкой поверхностью необходимо, чтобы высота выступов была в 5–10 раз больше толщины вязкого подслоя, т. е. $h=(5 \div 10) \delta_1$.

Для оценки высоты шероховатостей на поверхности насадки сделаны следующие расчеты. Как известно из теории турбулентного пограничного слоя, безразмерная толщина вязкого подслоя в двухслойной модели равна

$$\frac{u_* \delta_1}{\nu_{ж}} = 11,6, \quad (11.1)$$

где u_* – динамическая скорость, м/с; δ_1 – толщина вязкого подслоя, м; $\nu_{ж}$ – кинематическая вязкость, м²/с.

Отсюда

$$\delta_1 = 11,6 \frac{\nu_{ж}}{u_*}. \quad (11.2)$$

Динамическая скорость при пленочном течении записывается из выражения для касательного напряжения на стенке

$$\tau = \rho g \delta_{пл} = u_*^2 \rho, \quad (11.3)$$

где $\delta_{пл}$ – толщина пленки, м; ρ – плотность жидкости, кг/м³; g – ускорение свободного падения, м/с².

Отсюда следует:

$$u_* = \sqrt{g \delta_{пл}}. \quad (11.4)$$

Среднюю толщину пленки на поверхности насадки определили исходя из задержки жидкости $\epsilon_{ж}$ (м³/м³). Так, например, задержка жидкости в регулярной насадке находится в пределах $\epsilon_{ж} \approx 0,05 - 0,08$. Принято за среднюю $\epsilon_{ж} = 0,065$, что хорошо подтверждается экспериментальными исследованиями.

Толщина пленки составит:

$$\delta_{\text{ПЛ}} = \varepsilon_{\text{ж}} / a_{\text{v}}, \quad (11.5)$$

где a_{v} – удельная поверхность разрабатываемой насадки, $\text{м}^2/\text{м}^3$. Если $a_{\text{v}} = 160$, то получим $\delta_{\text{ПЛ}} = 0,065/160 = 4 \cdot 10^{-4}$ м.

Из формулы (11.4) найдем $u_* = 0,0626$ м/с. Для воды ($t = 20$ °С) толщина вязкого подслоя составит (11.2) $\delta_1 = 1,85 \cdot 10^{-4}$ м.

Следовательно, высота элементов шероховатостей должна быть в несколько раз больше δ_1 .

Авторами выполнено конструирование целого ряда регулярных и нерегулярных насадок и распределителей фаз [351,352,401-406] (см. раздел 3.4). Экспериментальное исследование этих элементов приводится в следующих разделах.

11.2. Экспериментальное исследование гидравлических характеристик сегментной регулярной насадки

Для проведения гидравлических испытаний новых насадок использовалась экспериментальная установка [193,423,452]. Установка состоит из колонны диаметром 600 мм с переходником под круглые и квадратные обечайки меньших размеров, воздуховода с вентилятором для подачи потока газа, водопровода, напорной и накопительной емкостей и насоса для орошения насадочного слоя. В аппарате расположены следующие внутренние устройства: опорная решетка, распределитель газовой фазы, распределитель жидкой фазы. Для визуального наблюдения распределения жидкости предусмотрены окна.

В колонне организовано противоточное движение фаз. Воздух от вентилятора по воздуховоду подается в нижнюю часть аппарата. Далее он проходит через ситчатый распределитель, в результате чего достигается равномерный профиль скорости на входе в слой насадки. В то же время

жидкая фаза из напорной емкости подается на орошение слоя насадки в колонне. Для равномерного начального распределения жидкой фазы по сечению аппарата выше слоя насадки установлен трубчатый распределитель. Число точек орошения подобрано согласно известным рекомендациям. Проходя через аппарат, жидкость распределяется по поверхности насадочных элементов, а газовая фаза занимает весь свободный объем аппарата.

Далее жидкость поступает в накопительную емкость, а газ выбрасывается в атмосферу. Предусмотрена возможность возврата жидкости из накопительной емкости в напорную.

На рис. 11.1 даны фотографии пульта управления стендом и показаны экспериментальные исследования распределителя жидкой фазы.

Целью проведения гидравлических испытаний насадки является:

- 1) экспериментальное определение зависимости гидравлического сопротивления слоя насадки от нагрузок по жидкости и газу;
- 2) определение зависимости коэффициента сопротивления от режимных параметров;
- 3) изучение структуры потока жидкой фазы в слое насадки;
- 4) исследование предельных нагрузок;
- 5) исследование распределителей фаз.



Рис. 11.1 Испытательные стенды «Инжехим».

*Результаты экспериментальных исследований сегментно
регулярной рулонной насадки «Инжсхим»*

Разработана конструкция насадки, образованной сдвоенными лентами, одна из которых имеет гофры треугольной формы, на сторонах гофров выполнены лепестки в виде круговых сегментов, при этом хорды сегментов смежных сторон гофров расположены под углом друг к другу. Такое конструктивное выполнение насадки за счет формы и ориентации отогнутых лепестков обеспечивает как осевую, так и радиальную составляющие скорости газовой фазы, что приводит к ее дополнительной турбулизации и повышению массообменных характеристик процесса. Сплошная лента служит для формирования обновленной межфазной поверхности из жидкости, выносимой на ее поверхность потоком газа из сегментных отверстий, образованных при отгибе лепестков. Кроме того, чередование плоских и гофрированных лент обеспечивает жесткость пакету насадки, что позволяет выполнить ее из тонкого материала [402].

Насадка (рис. 11.2) выполнена в виде пакета, образованного лентами 1 и 2. На боковых поверхностях треугольных гофров ленты 1 выполнены лепестки 3 и 4 в виде круговых сегментов. При этом хорды у смежных гофров наклонены друг к другу. Ориентация лепестков каждого последующего слоя насадки противоположна предыдущей, что исключает поперечное смещение газового потока по ходу газового движения.

Насадка изготовлена из перфорированных сплошных лент шириной 40 мм методом штамповки. Удельная поверхность насадки $a_v = 160 - 280 \text{ м}^2/\text{м}^3$; удельный свободный объем $\varepsilon_{св} = 0,95 \text{ м}^3/\text{м}^3$.

Насадка, свернутая в рулон, укладывалась на опорную решетку под распределителем газовой фазы. Орошение насадки осуществляется через распределитель жидкой фазы.

Экспериментальные исследования проводились на системе воздух – вода при высоте слоя новой насадки 0,94 м. Скорость газа в колонне достигала значений 5 м/с, плотность орошения изменялось от 5 до 30 м³/м²ч.

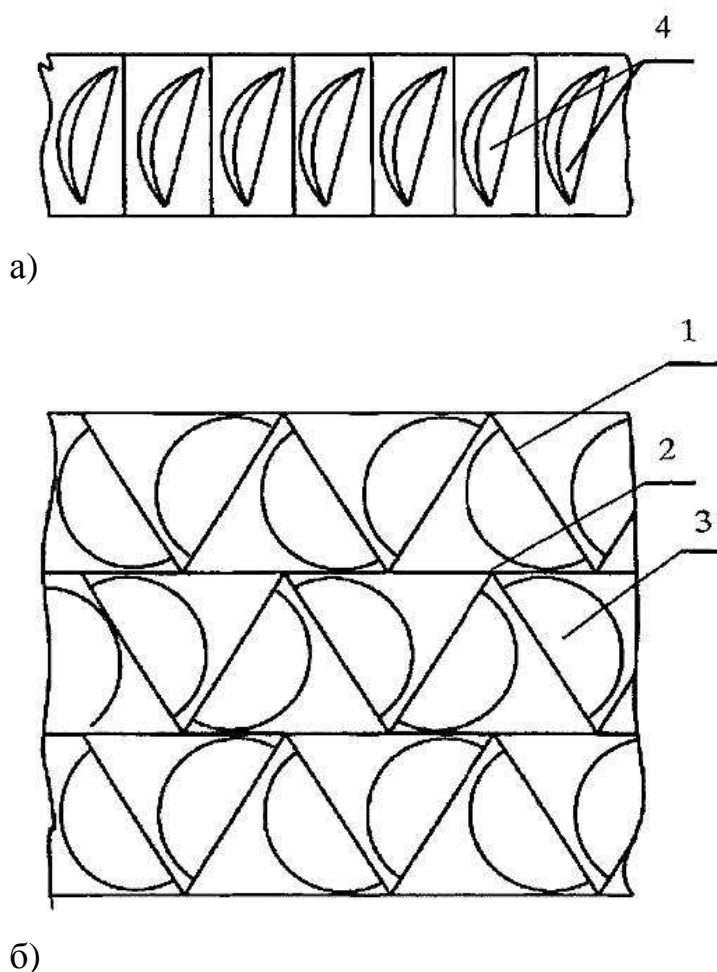


Рис. 11.2 Сегментная насадка: а) вид спереди; б) – вид с торца

Гидравлическое сопротивление сухой насадки

Экспериментальное исследование сопротивления сухой насадки проведено в зависимости от скорости газа (воздуха) в диапазоне скоростей 0,5–4,5 м/с. При этом значение критерия Re_{Γ} для газа $Re_{\Gamma} = \frac{W_0 d_{\text{э}}}{\nu_{\Gamma}}$ изменяется от 340 до 3100, где W_0 – фиктивная скорость газа, м/с; $d_{\text{э}}$ – эквивалентный диаметр насадки, м; ν_{Γ} – коэффициент кинематической вязкости газовой фазы, м²/с.

Расчет гидравлического сопротивления сухой насадки проводится по известному уравнению

$$\Delta p_{\text{сух}} = \xi_0 \frac{H \rho_{\text{г}} W_0^2}{d_3^2}, \quad (11.6)$$

где $\Delta p_{\text{сух}}$ – гидравлическое сопротивление сухой насадки, Па; ξ_0 – коэффициент сопротивления сухой насадки; H – высота слоя насадки, м; $\rho_{\text{г}}$ – плотность газа, кг/м³.

Коэффициент сопротивления сухой насадки ξ_0 определяется в результате обработки экспериментальных данных известным методом наименьших квадратов. При этом коэффициент ξ_0 зависит от числа $\text{Re}_{\text{г}}$ в

$$\text{виде } \xi_0 = A \text{Re}_{\text{г}}^B, \text{Re}_{\text{г}} = \frac{W_0 d_3}{\nu_{\text{г}}}, d_3 = 4 \frac{\varepsilon_{\text{св}}}{a_{\nu}}.$$

Коэффициенты A и B данной аппроксимации рассчитываются в результате минимизации функции:

$$\sum_{i=1}^n (\Delta p_{\text{сух.эксп}} - \Delta p_{\text{сух.расч}})^2 \rightarrow \min. \quad (11.7)$$

В результате обработки экспериментальных данных получено [195,202,423]

$$\xi_0 = 0,105 \text{Re}_{\text{г}}^{0,108}. \quad (11.8)$$

Сравнение значений перепада давления для различия насадок показано на рис. 11.9 (разд. 11.3).

Погрешность аппроксимации экспериментальных данных $\Delta p_{\text{сух.эксп}}$ уравнением (11.7) составляет от 0,57 до 9,58 %. Погрешность аппроксимации рассчитывается по формуле

$$\Delta_i = \frac{|\Delta p_{\text{сух.эксп}} - \Delta p_{\text{сух.расч}}|}{\Delta p_{\text{сух.эксп}}} \cdot 100 \%$$

Среднее квадратичное отношение

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum \Delta_i^2}{n-1}} = 4,12 \%$$

Гидравлическое сопротивление орошаемой насадки

Экспериментальное исследование сопротивления орошаемой насадки рулонного типа проведено в зависимости от скорости газа (воздуха) W_0 (м/с) и плотности орошения жидкости (вода) L (м³/м²ч). Скорость газа изменяется от 0,5 до 4,5 м/с, а плотность орошения $L = Q/S$ от 5 до 30 м³/м²ч, где Q – расход жидкости (м³/ч), S – площадь сечения аппарата (м²).

Расчет гидравлического сопротивления орошаемой насадки проводится по уравнению

$$\Delta p_{\text{ор}} = \xi_{\text{ор}} \frac{H \rho_{\text{г}} W_{\text{г,отн.}}^2}{d_3}, \quad (11.9)$$

где $\Delta p_{\text{ор}}$ – гидравлическое сопротивление орошаемой насадки, Па;
 $\xi_{\text{ор}}$ – коэффициент орошаемой насадки, зависящий от скорости газа и плотности орошения; $W_{\text{г,отн.}} = W_0 + W_{\text{ж}}$ – относительная скорость газа, м/с;
 $W_{\text{ж}}$ – среднее (фиктивное) значение скорости жидкости, м/с.

Коэффициент сопротивления орошаемой насадки $\xi_{\text{ор}}$ записывается в виде

$$\xi_{\text{ор}} = \xi_0 + c \text{Re}_{\text{ж}}^m \text{Re}_{\text{г}}, \quad (11.10)$$

где $Re_{ж} = \frac{q_{ж} d_{э}}{v_{ж}}$ – число Рейнольдса для жидкости; $Re_{г}$ – число

Рейнольдса для газа; c и m – эмпирические коэффициенты, полученные в результате обработки экспериментальных данных по орошаемой насадке; $q_{ж} \sim \text{м}^3 / (\text{м}^2 \cdot \text{с})$. Обработка экспериментальных данных проводится, как и в предыдущем случае, методом наименьших квадратов.

В результате расчета коэффициент сопротивления орошаемой насадки получается в виде [195,423]

$$\xi_{ор} = \xi_0 + 0,0226 Re_{ж}^{0,34 \cdot 10^{-3}} Re_{г} . \quad (11.11)$$

Погрешность аппроксимации экспериментальных данных уравнениями (11.9) – (11.10) в отдельных опытах изменяется от 0,03 до 19 %.

Среднее квадратичное отклонение $\sigma = 2,5\%$.

На рис. 11.3, 11.4 представлены зависимости гидравлического сопротивления орошаемой насадки от скорости газа и плотности орошения [195, 423].

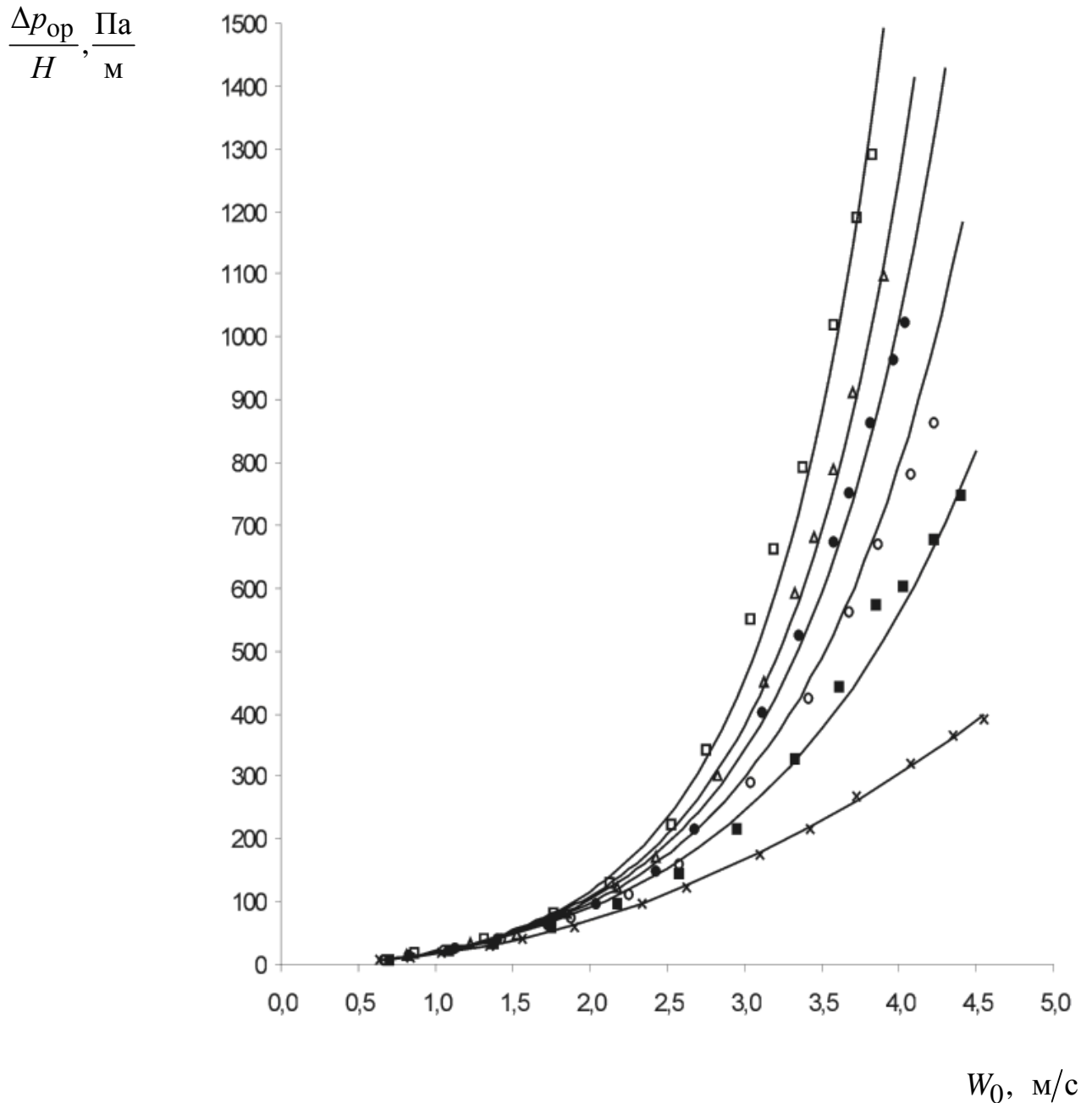


Рис. 11.3 Гидравлическое сопротивление орошаемой насадки в зависимости от скорости газа и плотности орошения L , $\text{м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{ч}$:
 \times – $L=0$; \blacksquare – $L=5$; \circ – $L=10$; \bullet – $L=15$; Δ – $L=20$; \square – $L=30$.

Сравнение сопротивления орошаемой рулонной насадки с сопротивлением на современных структурных пакетных насадках, собранных из гофрированных или рифленых листов, в том числе пакетных насадках INTALOX фирмы NORTON, показывает преимущества рулонной насадки.

На рис. 11.5–11.6 проводится сравнение гидравлического сопротивления орошаемой рулонной насадки с сопротивлением на известных конструкциях регулярных и нерегулярных насадок [195,202,423].

С увеличением плотности орошения гидравлическое сопротивление рулонной насадки по сравнению с кольцами Рашига в укладку снижается (рис. 11.4) и значительно ниже сопротивления нерегулярных насадок (кольца Рашига внавал, кольца Палля).

На рис. 11.6 приводится сравнение сопротивления рулонной насадки с сопротивлением регулярных насадок типа: плоско-параллельная, «зиг-заг», спиральная гофрированная.

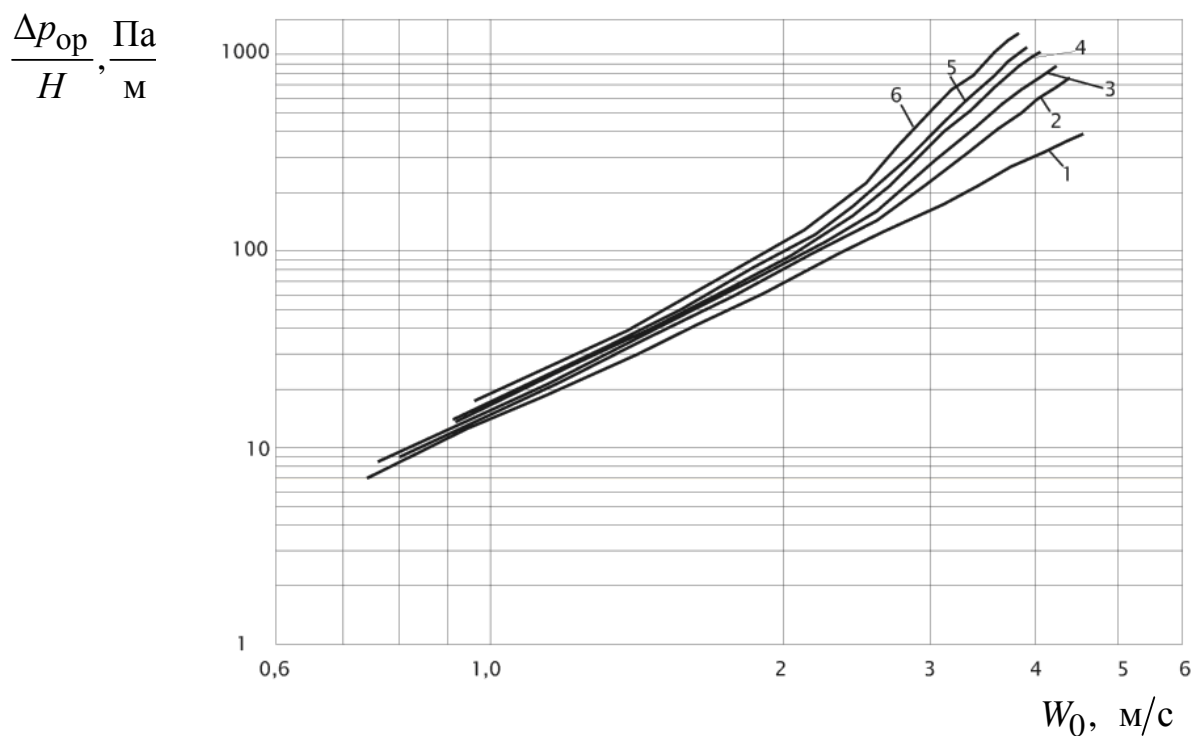


Рис. 11.4 Гидравлическое сопротивление орошаемой насадки в зависимости от скорости газа и плотности орошения L , $\text{м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{ч}$: 1 – 0; 2 – 5; 3 – 10; 4 – 15; 5 – 20; 6 – 30.

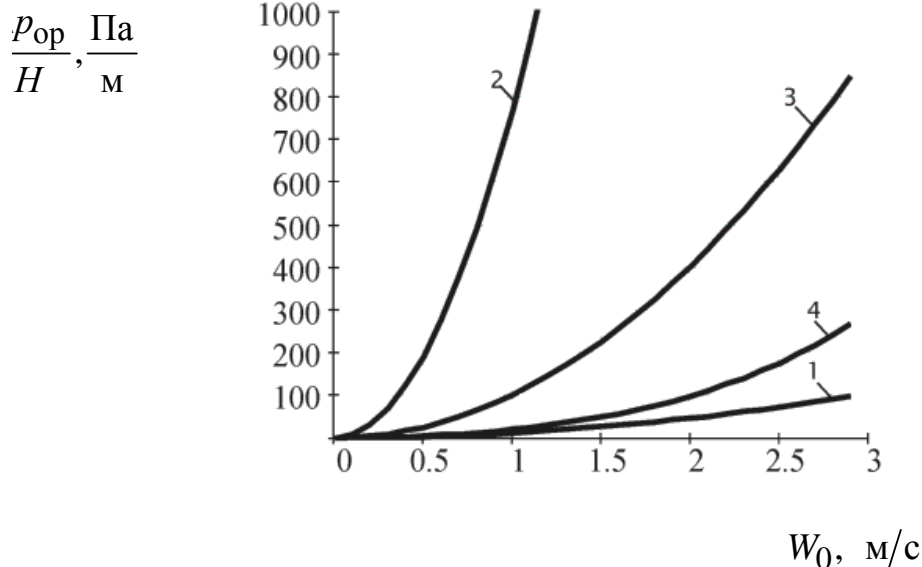


Рис. 11.5 Гидравлическое сопротивление орошаемых насадок при плотности орошения $L=10$ м/ч: 1 – кольца Рашига в укладку, $d=100$ мм; 2 – кольца Рашига внавал, $d=25$ мм; 3 – кольца Палля, $d=50$ мм; 4 – рулонная насадка.

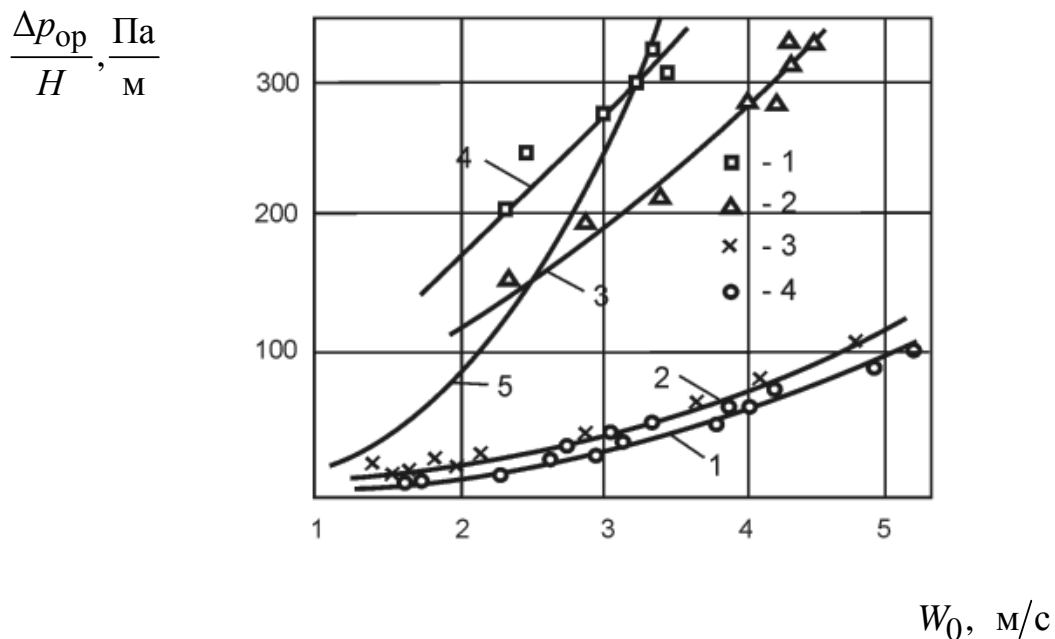


Рис. 11.6 Зависимость удельного гидравлического сопротивления от скорости газа для регулярных пакетных насадок при ректификации смеси метанол-вода (плотность орошения $4-14$ м³/м²·ч), данные в работе [392]:

1 – плоскопараллельная насадка, $d_3=18$ мм; 2 – насадка «зиг-заг», $d_3=12$ мм; 3 – спиральная рулонная насадка с прямым гофром $d_3=30$ мм; 4 – с косым гофром; 5 – рулонная насадка [195], система воздух-вода, плотность орошения 5 м³/м²·ч, $d_3=7,8$ мм.

До величины скорости газа 3 м/с рулонная насадка имеет гидравлическое сопротивление ниже, чем спиральная гофрированная насадка и выше, чем плоско-параллельная и насадка типа «зиг-заг».

Экспериментально исследована динамическая составляющая задержки жидкости в слое насадки. Получено следующее обобщающее выражение:

$$\varepsilon_{\text{жд}} = 0,16 \text{Re}_{\text{ж}}^{0,186} \text{Ga}^{-0,23}, \quad (11.12)$$

где $\text{Re}_{\text{ж}} = 4q / (v_{\text{ж}} a_v)$; $\text{Ga} = g / (v_{\text{ж}}^2 a_v^3)$.

Учитывая высокую удельную поверхность, свободный объем разработанной рулонной насадки, выполнив сравнительный анализ сопротивления различных насадок, можно сделать следующие выводы:

- разработанная рулонная насадка имеет широкий диапазон рабочих скоростей по газовой и жидкой фазам при пленочном режиме;
- режим подвисяния пленки начинается при скорости газа 2,5–2,7 м/с в зависимости от плотности орошения (рис. 11.4);
- в исследованном диапазоне скорости газа и плотности орошения «захлебывания» насадки не наблюдается.

11.3. Результаты гидравлических исследований регулярной рулонной гофрированной насадки

Регулярная насадка для теплообменных аппаратов, состоящая из пакетов, набранных из гофрированных листов и установленных один над другим слоями, отличается тем, что центральный пакет в слое выполнен в виде цилиндра, а остальные пакеты размещены в виде долей коаксиальных цилиндров, при этом гофры листов расположены под углом к горизонту, а в

смежных листах пакета выполнены перекрестно (рис. 11.7) [298,312,351]. На рис. 11.8 показана изготовленная насадка для промышленной колонны.

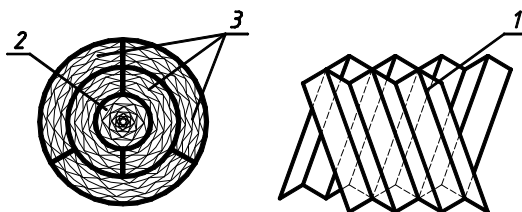


Рис. 11.7 Вид регулярной насадки: 1 – гофры смежных листов; 2 – центральный пакет; 3 – остальные пакеты.



Рис.11.8 Насадка «Инжехим» для промышленной колонны

Гидравлическое сопротивление сухой насадки

Экспериментальное исследование сопротивления сухой насадки проведено в зависимости от скорости газа (воздуха) в диапазоне скоростей 0,6–7,0 м/с ($500 < Re_r < 6000$).

Расчет гидравлического сопротивления сухой насадки проводится по известному уравнению (11.6).

В результате обработки экспериментальных данных получено [298,429]

- для рулонной с шероховатой поверхностью (пуклеванной):

$$\xi_0 = 3,89 Re_r^{-0,294} . \quad (11.13)$$

- для рулонной просечной: $\xi_0 = 0,8$.

Экспериментальные данные сопротивления сухой рулонной насадки (рис. 11.9) показывают большее гидравлическое сопротивление рулонной насадки по сравнению с сопротивлением колец Рашига, расположенных в укладку ($d = 100, 80, 50$ мм). Удельная поверхность таких колец составляет от 60 до $110 \text{ м}^2/\text{м}^3$, что по сравнению с рулонной насадкой меньше в 2–3 раза, и в этом случае рулонная насадка предпочтительнее колец Рашига.

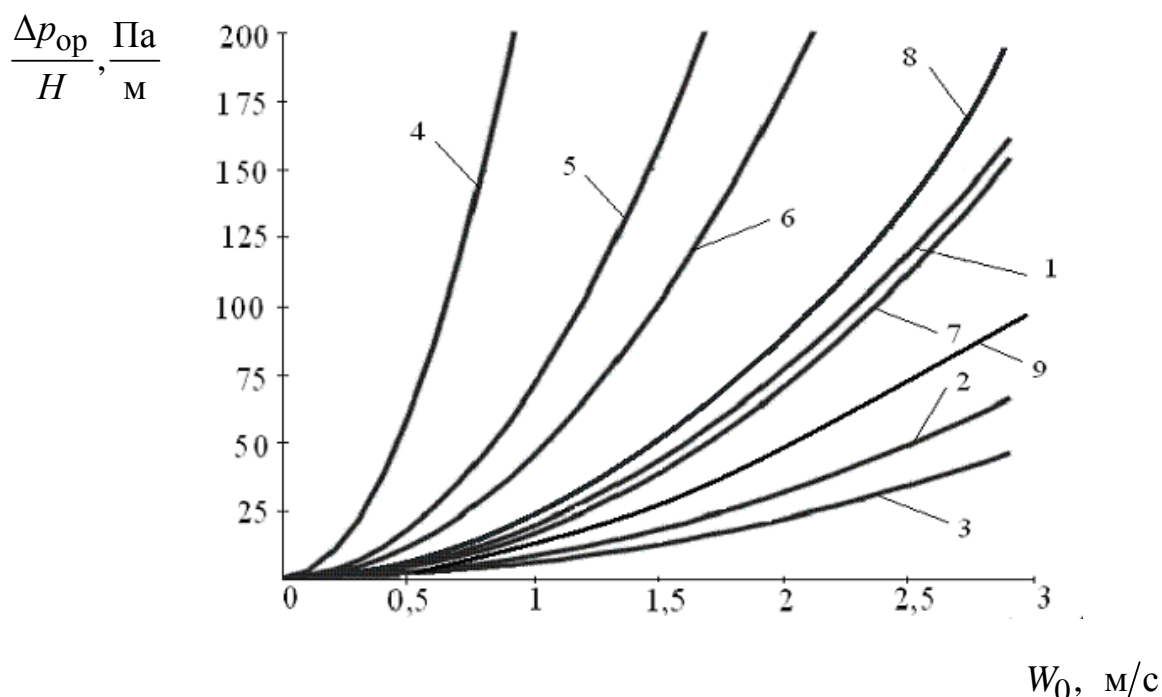


Рис. 11.9 Гидравлическое сопротивление сухой насадки: 1, 2, 3 – кольца Рашига в укладку, $d = 50, 80, 100$ мм; 4, 5 – кольца Рашига внавал, $d = 25, 50$ мм; 6 – кольца Палля, $d = 50$ мм; 7 – рулонная насадка [402] (с сегментными отверстиями); 8 – рулонная просечная; 9 – рулонная с шероховатой поверхностью [351].

Гидравлическое сопротивление орошаемой насадки

Экспериментальное исследование сопротивления орошаемой насадки рулонного типа проведено в зависимости от скорости газа

(воздуха) W_0 и плотности орошения жидкости (вода) L ($\text{м}^3/\text{м}^2\text{ч}$). Скорость газа изменяется до 7,5 м/с, а плотность орошения до $120\text{ м}^3/\text{м}^2\text{ч}$.

На рис. 11.10 и 11.11 представлены зависимости гидравлического сопротивления орошаемой насадки от скорости газа (фактора скорости $W_0\sqrt{\rho_{\Gamma}}$) и плотности орошения.

На рис. 11.12–11.13 проводится сравнение гидравлического сопротивления орошаемой рулонной насадки с сопротивлением на известных конструкциях регулярных и нерегулярных насадок.

С увеличением плотности орошения гидравлическое сопротивление рулонной насадки по сравнению с кольцами Рашига в укладку снижается и значительно ниже сопротивления нерегулярных насадок (кольца Рашига внавал, кольца Палля).

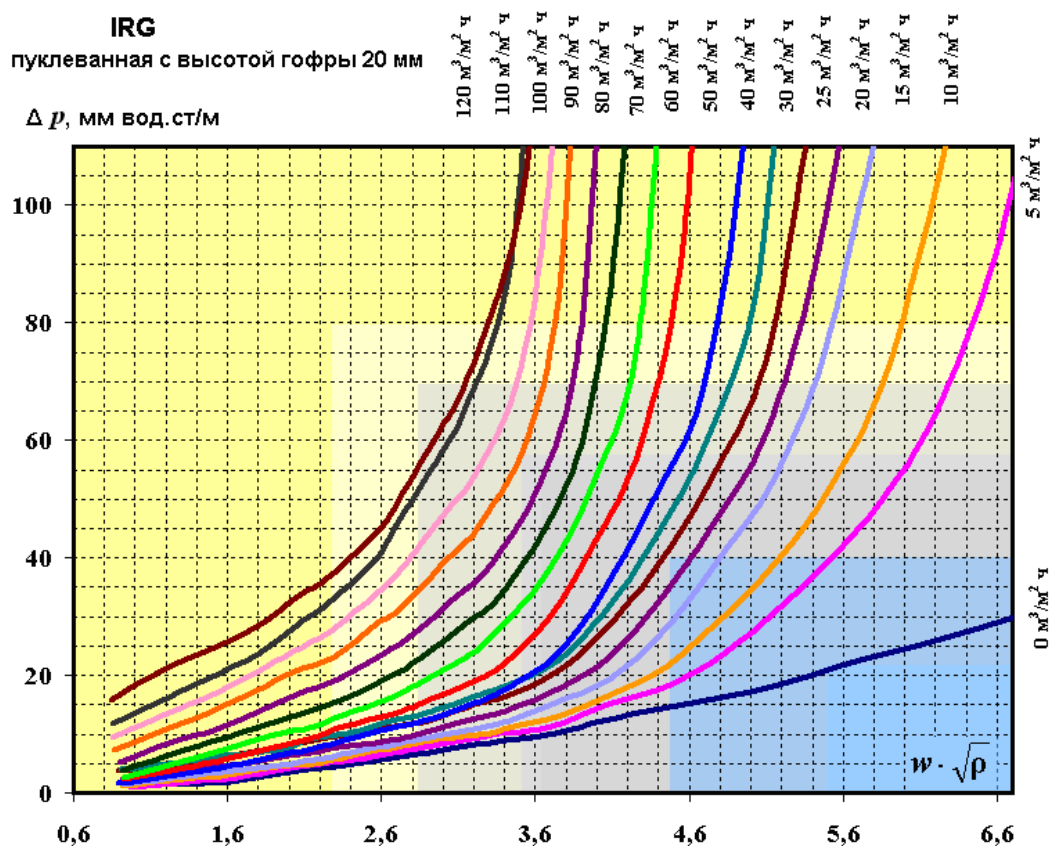


Рис. 11.10 Гидравлическое сопротивление орошаемой насадки в зависимости от фактора скорости газа и плотности орошения.

Насадка рулонная регулярная пуклеванная (гофра 20 мм).

Сравнение сопротивления орошаемой рулонной насадки с сопротивлением на современных структурных пакетных насадках, собранных из гофрированных или рифленых листов, в том числе пакетные насадки INTALOX фирмы NORTON, показывает (рис. 11.13) преимущества рулонной насадки.

До величины скорости газа 3 м/с рулонная насадка имеет гидравлическое сопротивление ниже, чем спиральная гофрированная насадка и выше, чем плоско-параллельная и насадка типа «зиг-заг».

Для расчета гидравлического сопротивления орошаемой насадки часто используется выражение вида [392]

$$\frac{\Delta p_{\text{ор}}}{\Delta p_{\text{сух}}} = 10^{bq} . \quad (11.14)$$

где $q \sim \text{м}^3 / (\text{м}^2 \cdot \text{ч})$.

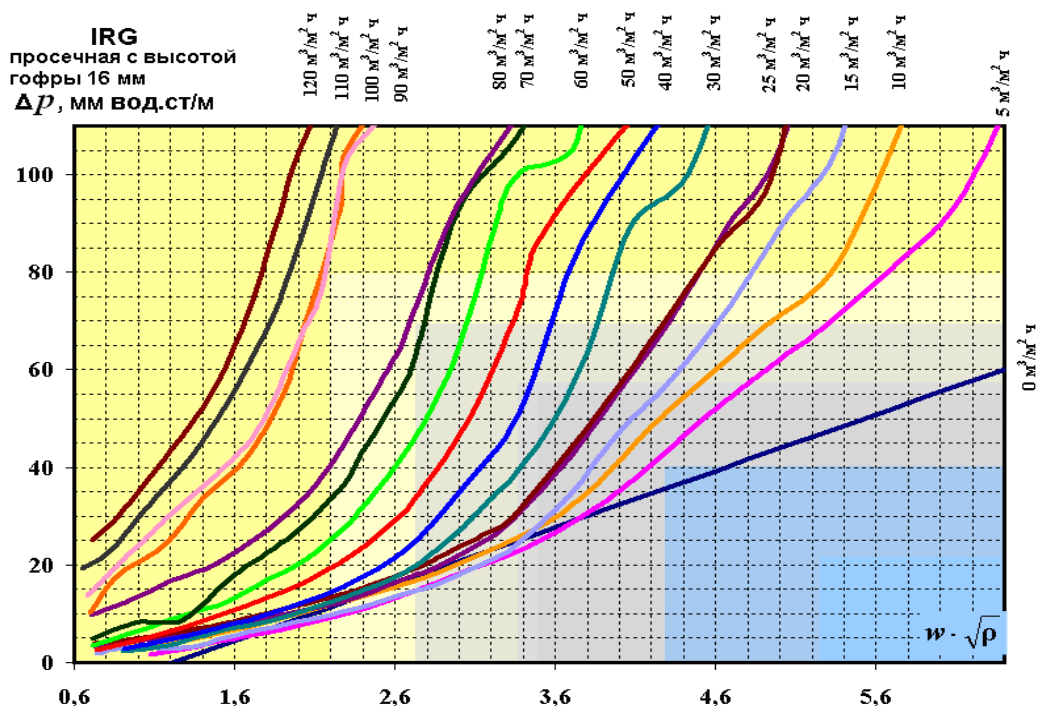


Рис. 11.11 Гидравлическое сопротивление орошаемой насадки в зависимости от фактора скорости газа и плотности орошения.

Насадка рулонная просечная.

В результате обработки экспериментальных данных (рис. 10.10, 10.11) для пленочного режима получено:

- насадка с шероховатой поверхностью: $b = 0,0082$;
- насадка с просечками: $b = 0,0091$.

Максимальное отклонение расчетных и экспериментальных данных составляет 12,5 %.

Учитывая высокую удельную поверхность, свободный объем разработанной рулонной насадки, выполнив сравнительный анализ сопротивления различных насадок, можно сделать следующие выводы:

- разработанная рулонная гофрированная насадка имеет широкий диапазон рабочих скоростей по газовой и жидкой фазам при пленочном режиме;
- режим подвисяния пленки начинается при скорости газа 3,0–3,5 м/с в зависимости от плотности орошения (рис. 6.10);
- для использования данной насадки в вакуумных колоннах наиболее подходит насадка с шероховатой поверхностью, так как она имеет меньшее гидравлическое сопротивление.

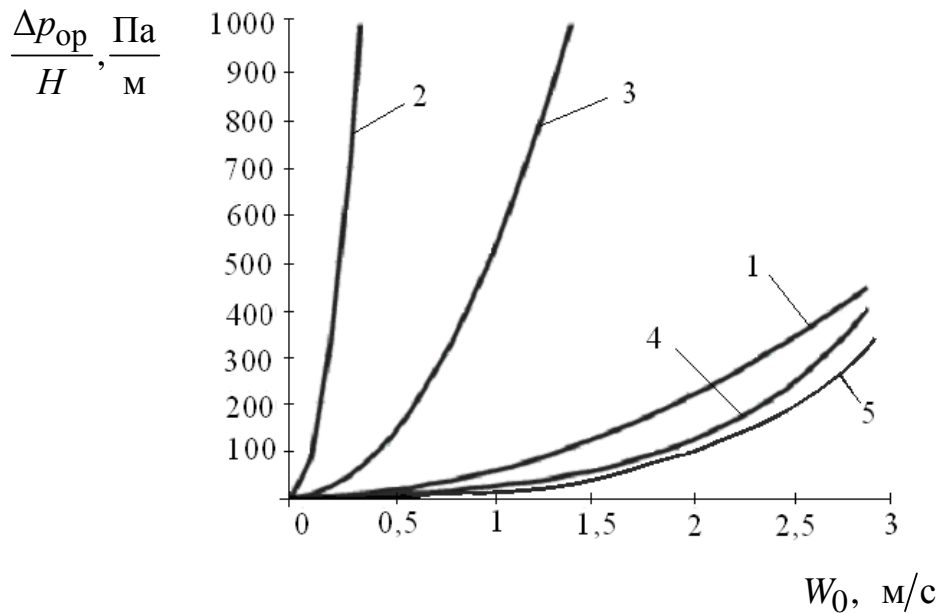


Рис. 11.12 Гидравлическое сопротивление орошаемых насадок при плотности орошения $L = 30$ м/ч: 1 – кольца Рашига в укладку, $d_3 = 100$ мм; 2 – кольца Рашига внавал, $d = 25$ мм; 3 – кольца Палля, $d = 50$ мм; 4 – рулонная насадка с сегментными отверстиями [402]; 5 – рулонная просечная, $d_3 = 15$ мм [351].

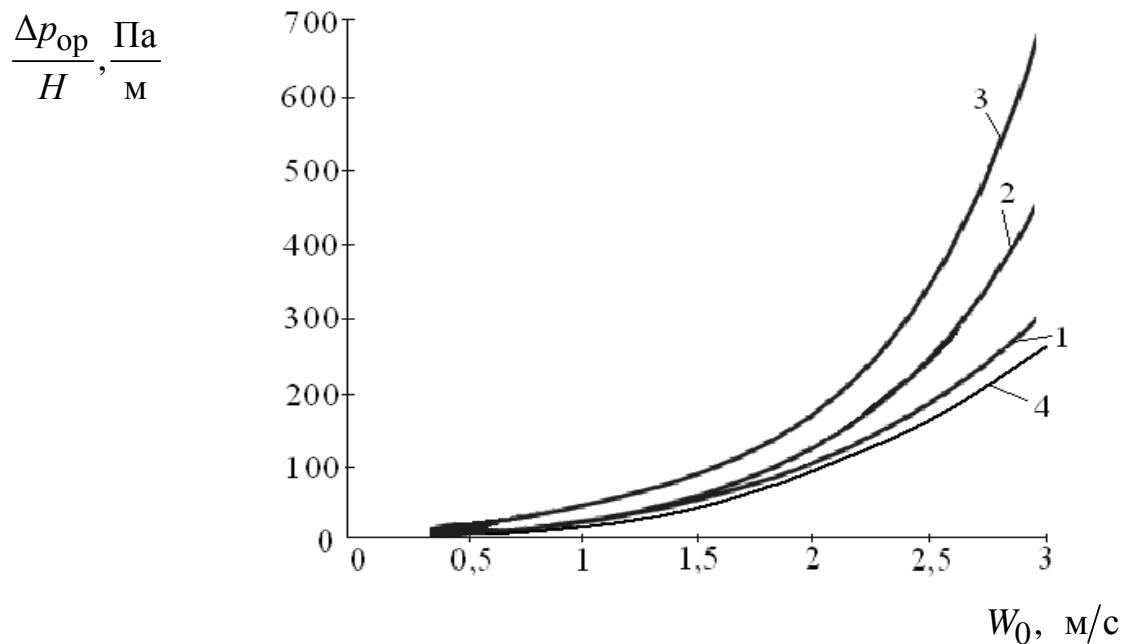


Рис. 11.13 Гидравлическое сопротивление орошаемых насадок в зависимости от скорости газа и плотности орошения L , м/ч: 1, 2 – рулонная насадка, плотность орошения $L = 10, 30$ м/ч [402]; 3 – структурная насадка INTALOX 3Т при полном рефлюксе (система изооктан-толуол); 4 – рулонная с шероховатой поверхностью [351].

Аппроксимация результатов измерения задержки жидкости осуществляется известным уравнением [392]:

$$\epsilon_{\text{ж}} = A \cdot \text{Re}_{\text{ж}}^m \text{Ga}^{-\kappa}, \quad (11.15)$$

где числа подобия $\text{Re}_{\text{ж}} = 4q / (v_{\text{ж}} a_v)$; $\text{Ga} = g / (v_{\text{ж}}^2 a_v^3)$; q – плотность орошения, $\text{м}^3 / (\text{м}^2 \text{с})$; $v_{\text{ж}}$ – коэффициент кинематической вязкости, $\text{м}^2 / \text{с}$; a_v – удельная поверхность насадки, $\text{м}^2 / \text{м}^3$.

В результате обработки экспериментальных данных получены коэффициенты эмпирического уравнения:

$$\epsilon_{\text{ж}} = 0,652 \text{Re}_{\text{ж}}^{0,186} \text{Ga}^{-0,23}. \quad (11.16)$$

11.4. Результаты экспериментальных исследований регулярной насадки IRG

Решена техническая задача по конструкции регулярной насадки, содержащей уложенные в пакет гофрированные листы с перекрестным расположением гофров в соседних листах, с выполненными на поверхности листов выступами, причем выступы расположены горизонтальными рядами, при этом расстояние между выступами в рядах меньше расстояния между рядами. Конструкция регулярной насадки показана на рис. 11.14 и 11.15 [401,452].

Новая упорядоченная насадка названа IRG (Ingechim Regular Gofr), что означает регулярная гофрированная насадка ИВЦ «Инжехим».

Насадка выполнена из листа, имеющего параллельные гофры с вершинами. На боковых поверхностях гофров выполнены горизонтальные ряды выступов. Причем расстояние между выступами в рядах меньше расстояния между рядами выступов.

Насадка представляет собой пакет установленных вертикально гофрированных металлических пластин. Гофры пластин расположены под углом к горизонту. Пакет составляется таким образом, что гофры соседних

пластин расположены перекрестно (рис. 11.14). На поверхности пластин созданы фигурные шероховатости в виде выпуклостей. Пакет регулярной насадки показан на рис. 11.15 [452].

Такое конструктивное исполнение позволяет достичь высокого свободного объема насадки в аппарате за счет исключения взаимного проникновения насадки и равномерного распределения поверхности по сечению аппарата.



Рис. 11.14 Элементы пластин насадки.



Рис. 11.15 Пакет пластин насадки.

Экспериментальные исследования проводились на системе воздух – вода при высоте слоя новой насадки 1,0 м. Максимальная фиктивная (на полное сечение колонны) скорость газа в колонне достигала 3,1 м/с, плотность орошения составляла 5, 10 и 20 м³/(м²·ч). На рис. 11.16 приведены результаты проведенных испытаний по перепаду давления [293,452].

Как видно из рис. 11.16, при скоростях газа от 0,5 до 2,3 м/с расход жидкости практически не влияет на гидравлическое сопротивление слоя насадки.

В результате анализа полученных результатов сделаны следующие выводы:

- новая насадка имеет широкий интервал рабочих скоростей по газовой и жидкой фазам при пленочном режиме;

- режим подвисяния начинается при скорости газа более 2,2–2,3 м/с в зависимости от плотности орошения (система воздух – вода);

- перепад давления при пленочном режиме слабо зависит от расхода жидкости.

В результате обработки экспериментальных данных получено, что зависимость удельного сопротивления сухой насадки IRG от фиктивной скорости газа описывается уравнением [293]:

$$\frac{\Delta p_{\text{сух}}}{H} = 376,7 W_0^{1,88} \text{ (Па)}. \quad (11.17)$$

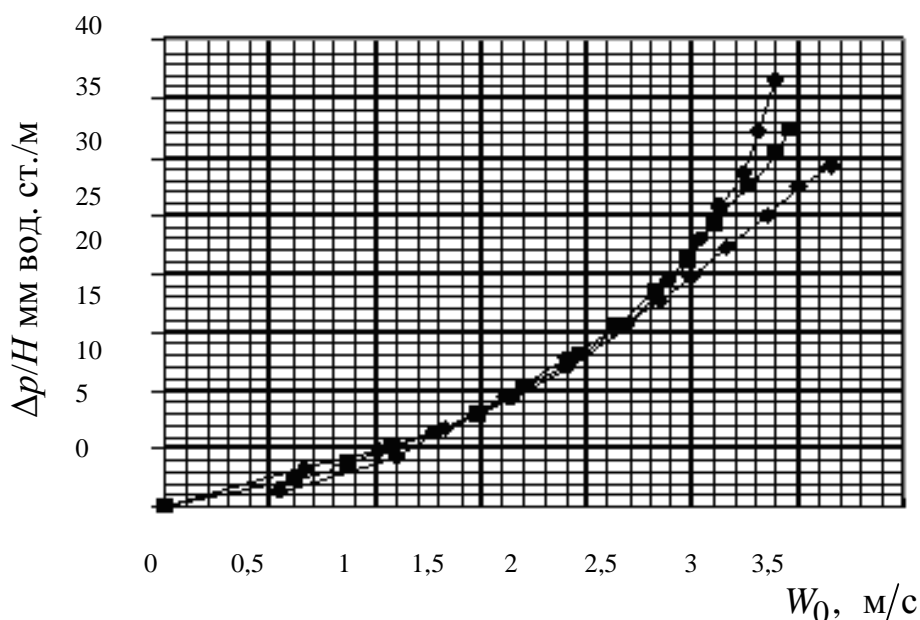


Рис. 11.16 Гидравлическое сопротивление слоя насадки в зависимости от фиктивной скорости газа: \square – сухая насадка, \blacksquare – плотность орошения $10 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$, \bullet – плотность орошения $20 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$.

Максимальное отклонение расчетных и экспериментальных данных составляет не более 3 %.

Потеря давления на 1 м высоты слоя насадки

$$\frac{\Delta p_{\text{сух}}}{H} = \frac{\xi_0 W_0^2 \rho_{\Gamma}}{2d_{\ominus}}. \quad (11.18)$$

Коэффициент сопротивления для насадки IRG получен в виде

$$\xi_0 = 3,18 \text{Re}^{-0,12}, \quad (11.19)$$

где $\text{Re}_{\Gamma} = \frac{4W_0\rho_{\Gamma}}{a_{\nu}\mu_{\Gamma}}$.

Уравнение (11.19) справедливо при $\text{Re}_{\Gamma} > 500$. Максимальное отклонение экспериментальных и расчетных значений ξ_0 составляет 7,5 %.

Для расчета гидравлического сопротивления слоя орошаемой насадки, работающей в пленочном режиме, часто применяют уравнение [392]:

$$\frac{\Delta p_{\text{ор}}}{\Delta p_{\text{сух}}} = 10^{bq}, \quad (11.20)$$

где b – коэффициент, определяемый для каждой насадки экспериментально; q – плотность орошения, $\text{м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$.

Для насадки IRG $b = 5,06 \cdot 10^{-3}$. Максимальное отклонение расчетных и экспериментальных данных составляет не более 12 %.

Для расчета гидравлического сопротивления орошаемой насадки можно также использовать уравнение

$$\frac{\Delta p_{\text{ор}}}{\Delta p_{\text{сух}}} = A W_0^b q^c. \quad (11.21)$$

Для насадки IRG: $A = 0,708$; $b = 0,198$; $c = 0,247$.

Максимальное отклонение расчетных и экспериментальных данных составляет не более 6,1 %. Уравнение (11.21) справедливо при плотностях орошения до $20 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$.

Коэффициент задержки жидкости $\varepsilon_{\text{ж}}$ для новой насадки был определен экспериментальным путем и составил $0,04\text{--}0,06 \text{ м}^3/\text{м}^3$.

Исследование структуры потока жидкости в слое насадки проведено методом импульсного ввода трассера. В качестве трассера использован раствор NaCl. В поток жидкости на входе в слой насадки (центральное отверстие распределительной тарелки) вводилось 200 мл раствора соли с концентрацией 0,15 кг/кг. Плотности орошения изменялись от 5, 8,5 до 10 м³/(м²·ч) при максимальной скорости воздуха. Концентрация индикатора на выходе из слоя насадки измерялась с помощью потенциометра. Вид кривых отклика на импульсное возмущение приводится на рис. 11.17.

Коэффициент обратного перемешивания не зависит от скорости газа в интервале изменения последней от 0,6 до 3,2 м/с. Результаты исследования структуры потока жидкости в слое насадки обобщены в виде известного [392] критериального уравнения

$$Re_{ж} = 2,193 \cdot Re_{ж}^{0,336}. \quad (11.22)$$

где число Пекле $Pe_{ж} = qd_{\ominus} / (D_{пж} \epsilon_{ж})$, число Рейнольдса $Re_{ж} = 4qr_{ж} / (a_v \epsilon_{ж} \mu_{ж})$, d_{\ominus} – эквивалентный диаметр насадки. Максимальное отклонение расчетных и экспериментальных данных составляет не более 7,7 %. Уравнение (11.22) справедливо при плотностях орошения до 10 м³/(м²·ч) и скорости газа до 3,5 м/с.

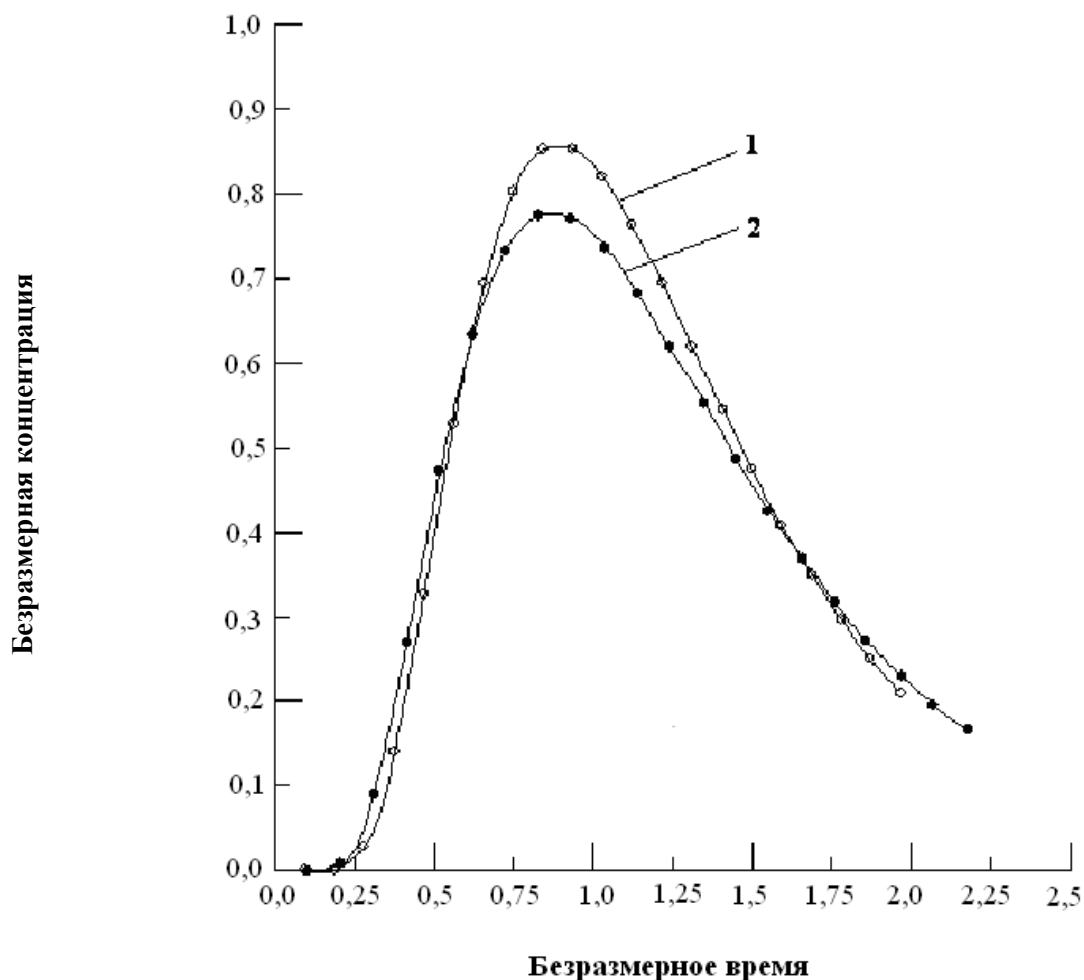


Рис. 11.17 С – кривые для новой насадки: 1 – плотность орошения 10 м/ч, 2 – плотность орошения 5 м/ч.

Для новой насадки выражение для расчета коэффициента $D_{ПЖ}$ записывается в виде [452]

$$D_{ПЖ} = \frac{q \cdot d_э}{Re_{ж} \cdot \epsilon_{ж}} = \frac{q \cdot d_э}{2,193 \cdot Re_{ж}^{0,336} \cdot \epsilon_{ж}} \quad (11.23)$$

В табл. 11.1 приводится сравнение характеристик новой насадки и колец Рашига.

Зависимость коэффициента продольного перемешивания от плотности орошения представлена в табл. 11.2.

Видно, что новая насадка обладает лучшими гидравлическими свойствами, чем близкие ей по геометрическим характеристикам известные насадки. Установлено, что интервал устойчивой работы для новой насадки значительно шире, чем у многих известных насадок.

Таблица 11.1. Сравнительные характеристики насадочных элементов

Тип насадки	d_{\ominus} , мм	a_v , м ² /м ³	ϵ_{CB} , м ³ /м ³	Δp	$D_{ПЖ}$	ВЭТТ
Кольца Рашига	22,5	147	0,83	100 %	100 %	100 %
IRG	24	162	0,98	5–33 %	1–2 %	50–60%

Таблица 11.2. Зависимость коэффициента продольного перемешивания от плотности орошения

	Критерий Re_1		Критерий Re_2		Критерий Re_3		Коэффициент продольного перемешивания D_{II} , м ² /с	
	W=0 м/с	W=3,5 м/с	W=0 м/с	W=3,5 м/с	W=0 м/с	W=3,5 м/с	W=0 м/с	W=3,5 м/с
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Плотность орошения $q = 5$ м ³ /(м ² ч)	7,99	8,0	10,1	10,43	7,07	7,16	$0,29 \cdot 10^{-3}$	$0,301 \cdot 10^{-3}$
Плотность орошения $q = 8,5$ м ³ /(м ² ч)	6,81	8,85	8,32	10,6	7,09	8,73	$0,253 \cdot 10^{-3}$	$0,235 \cdot 10^{-3}$
Плотность орошения $q = 10$ м ³ /(м ² ч)	8,85	9,25	10,6	10,95	8,73	8,96	$0,25 \cdot 10^{-3}$	$0,243 \cdot 10^{-3}$

11.5. Результаты экспериментальных исследований нерегулярных насадок «Инжехим»

В инженерно-внедренческом центре «Инжехим» разработан ряд насадок, образованных двумя, тремя или четырьмя изогнутыми полосами, смещенными относительно друг друга [293,301,403,452]. Края насадки изогнуты для исключения плотного прилегания отдельных элементов друг к другу. Особенностью данной конструкции является то, что жидкость, омывающая элементы насадки, сходит преимущественно с них в виде пленки. Это происходит за счет того, что геометрия насадки имеет гладкий гидравлический профиль и не содержит ломаных поверхностей и торчащих деталей, которые могли бы быть центром образования отдельных капель и струй. Пленочный характер стока жидкости с элементов насадки обеспечивает высокие массообменные характеристики при минимальном значении уноса и способствует снижению гидравлического сопротивления. Геометрия насадки такова, что контакт ее соседних элементов имеет почти точечный характер, что препятствует блокированию поверхности насадки и образованию застойных зон, которые могут возникнуть при контакте поверхностей с большим радиусом кривизны. Это особенно важно в случае присутствия в газовой и жидкой фазах примесей, склонных к полимеризации и образованию слоя твердых отложений на поверхности насадки. В этом случае уменьшаются свободное сечение колонны, свободный объем и удельная поверхность насадки, что приводит к ухудшению ее рабочих характеристик.

Насадки «Инжехим» изготавливаются из листа с искусственной шероховатостью, что увеличивает механическую прочность элементов. Наличие шероховатости способствует большей турбулизации стекающей пленки жидкости, а это, в свою очередь, ведет к повышению коэффициентов массоотдачи в жидкой фазе. Кроме того, наличие шероховатости поверхности приводит к увеличению количества удерживаемой жидкости,

что особенно важно при проведении процессов с небольшой плотностью орошения. В то же время это практически не сказывается на гидравлическом сопротивлении насадки. Достаточно несложная конструкция насадки позволяет изготавливать ее методом листовой штамповки, что снижает себестоимость ее изготовления.

Ниже представлены результаты экспериментальных исследований разработанных насадок.

На рис. 11.18 представлен один из вариантов насадки «Инжехим–2000», а на рис. 11.19 – элементы, выполненные с шероховатой поверхностью (пуклевкой).



Рис. 11.18 Элемент насадки «Инжехим–2000».



Рис. 11.19 Нерегулярная насадка «Инжехим–2000» с шероховатой поверхностью.

Экспериментальные исследования насадочного слоя проводились на системе воздух – вода при высоте слоя 1 м. Фиктивная скорость газа в колонне достигала 5,82 м/с, плотность орошения составляла 20, 40, 60 и 80 м³/(м²ч). На рис. 11.20 и далее приведены результаты проведенных испытаний для насадочных элементов с номинальным размером 24 мм [293,423,446].

В результате анализа полученных результатов сделаны следующие выводы:

- новая насадка имеет широкий интервал рабочих скоростей по газовой и жидкой фазам при пленочном режиме;
- режим подвисяния начинается при скорости газа 1,5÷2,1 м/с в зависимости от плотности орошения (система воздух – вода);

- началу режима захлебывания соответствует перепад давления на 1 м слоя насадки около 1000 Па.

На рис. 11.21–11.23 приводится сравнение гидравлических характеристик исследуемой насадки с близкими по геометрическим размерам существующими насадками.

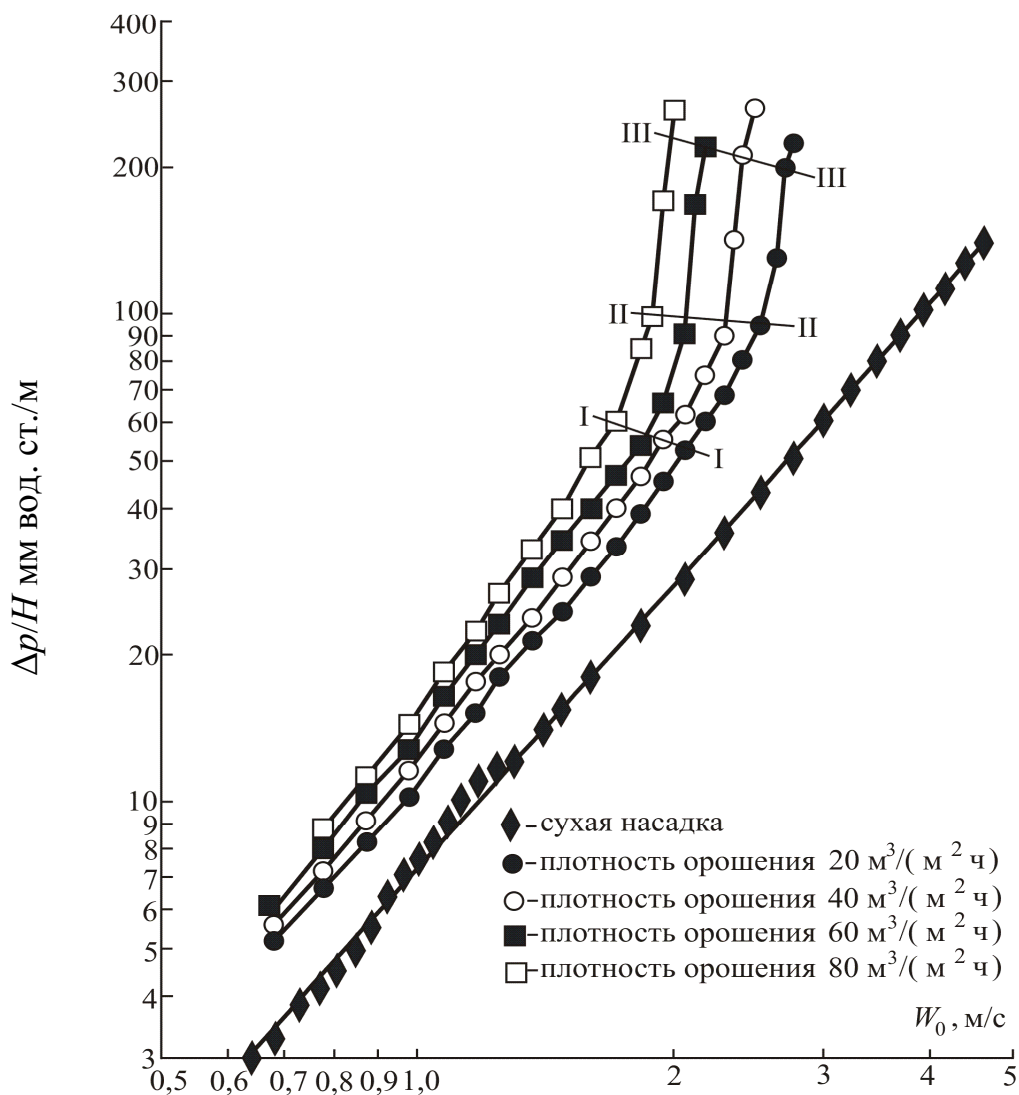


Рис. 11.20 Гидравлическое сопротивление слоя насадки в зависимости от фиктивной скорости газа. Линия I – I – начало режима подвисяния; линия II – II – начало режима захлебывания; линия III – III – начало режима уноса.

Из графика рис. 11.21 видно, что сопротивление сухого слоя новой насадки на 10–15 % ниже, чем у колец Палля размером 50×50 мм и более чем в 2 раза – нежели у колец Рашига. Это объясняется более высокой

порозностью новой насадки, а так же тем, что ее геометрия практически исключает образование застойных зон.

В результате обработки экспериментальных данных получено, что зависимость удельного сопротивления сухой насадки от фиктивной скорости газа описывается уравнением (Па)

$$\frac{\Delta p_{\text{сух}}}{H} = 71,22 \cdot W_0^{1,93}. \quad (11.24)$$

Максимальное отклонение расчетных и экспериментальных данных составляет не более 3 %.

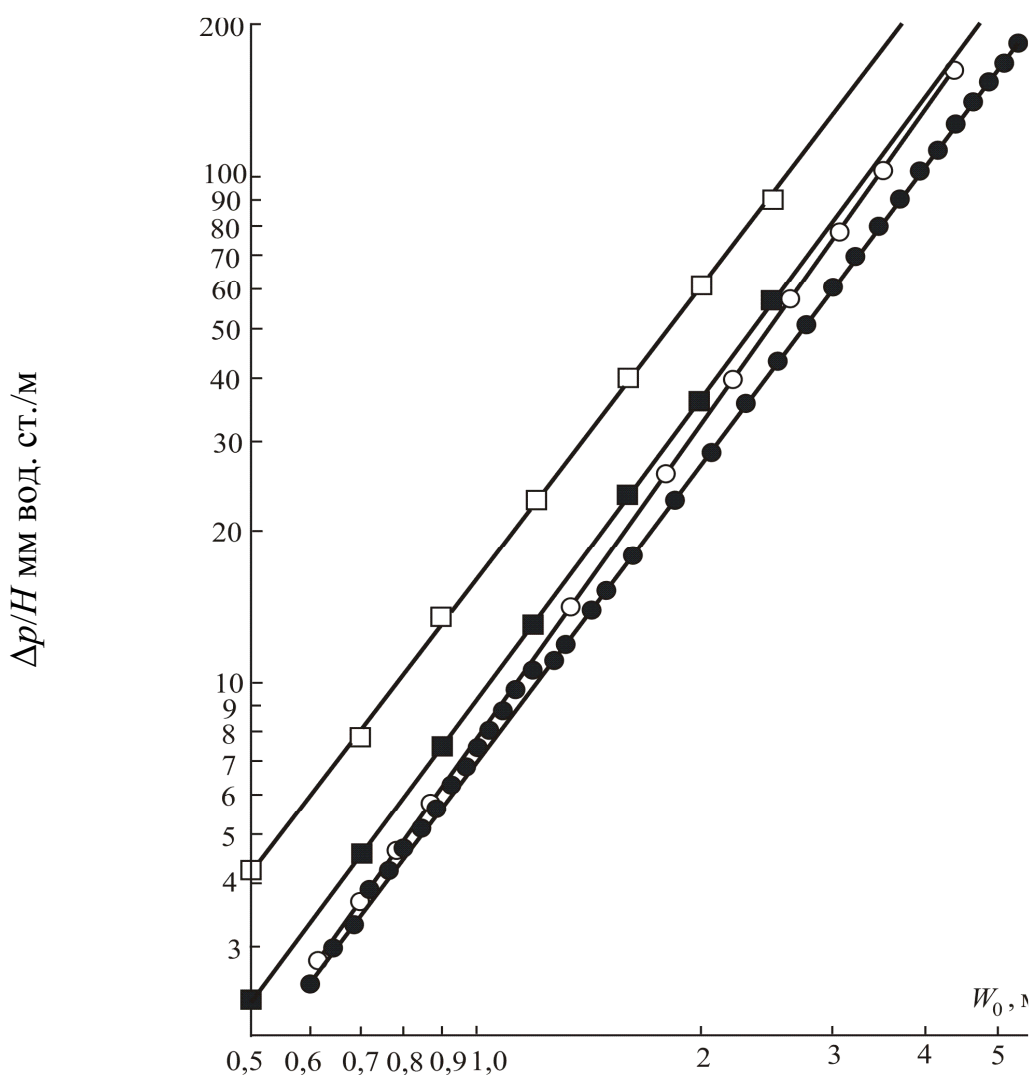


Рис. 11.21 Гидравлическое сопротивление слоя сухой насадки в зависимости от фиктивной скорости газа:

- – насадка «Инжехим–2000»; ■ – кольца Палля металлические 50×50 мм; ○ – кольца Палля полипропиленовые 50×50 мм; □ – кольца Рашига металлические 50×50 мм.

Потеря давления на 1 м высоты слоя насадки часто описывается уравнением [392]

$$\frac{\Delta p_{\text{сух}}}{H} = \frac{\xi_0 W_0^2 \rho_{\Gamma} a_{\nu}}{8 \epsilon_{\text{CB}}^3}. \quad (11.25)$$

Коэффициент сопротивления для насадки получен в виде [423,446]:

$$\xi_0 = 4,99 \text{Re}_{\Gamma}^{-0,04}, \quad (11.26)$$

где $\text{Re}_{\Gamma} = \frac{4W_0\rho_{\Gamma}}{a_{\nu}\mu_{\Gamma}}$.

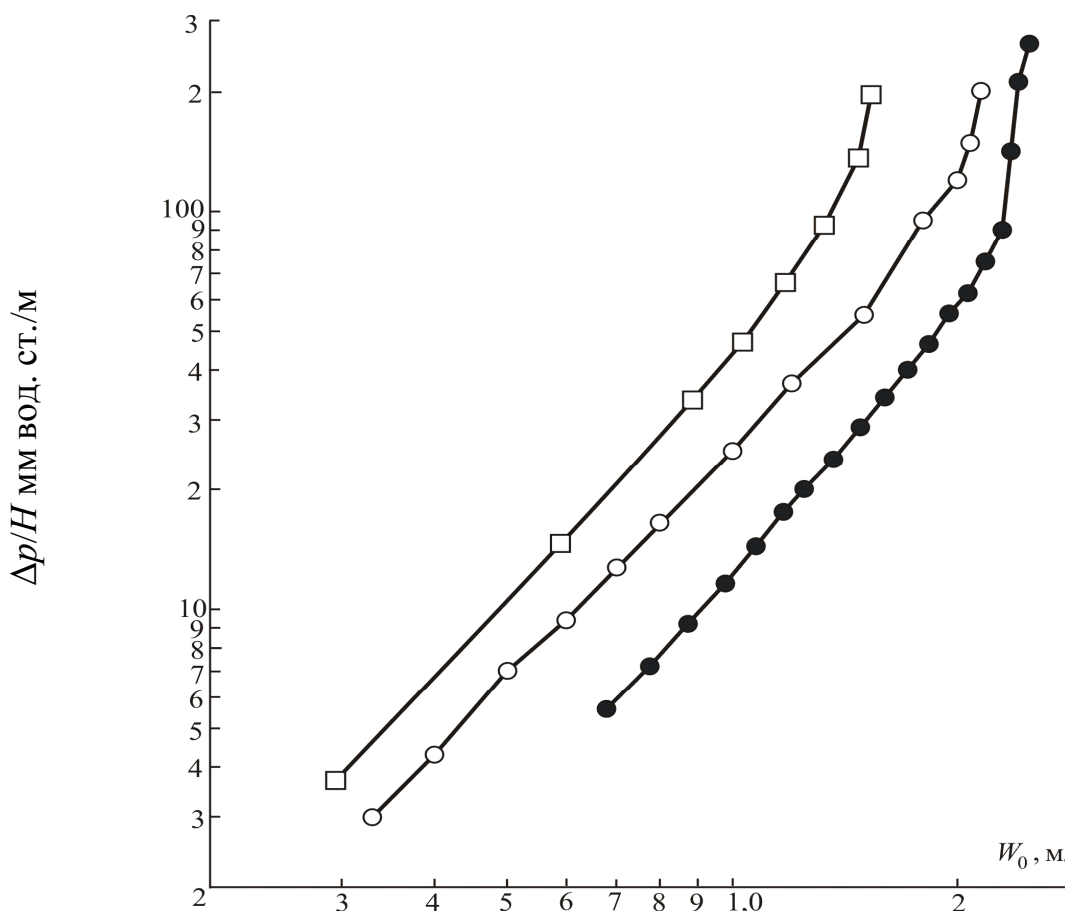


Рис. 11.22 Гидравлическое сопротивление слоя орошаемой насадки в зависимости от фиктивной скорости газа. Плотность орошения $40 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$.

● – насадка «Инжехим–2000»; ○ – кольца Bialecki металлические 50×50 мм [39]; □ – кольца Рашига металлические 50×50 мм.

Уравнение (11.26) справедливо при $\text{Re}_{\Gamma} > 500$. Максимальное отклонение экспериментальных и расчетных значений ξ_0 составляет 7 %.

Для расчета гидравлического сопротивления орошаемой насадки предлагается использовать уравнение аналогичное (11.16):

$$\frac{\Delta p_{\text{ор}}}{\Delta p_{\text{сух}}} = A q^c W_0^d. \quad (11.27)$$

Для нерегулярной насадки «Инжехим–2000»: $A = 0,708$; $c = 0,247$; $d = 0,198$; $q \sim \text{м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$.

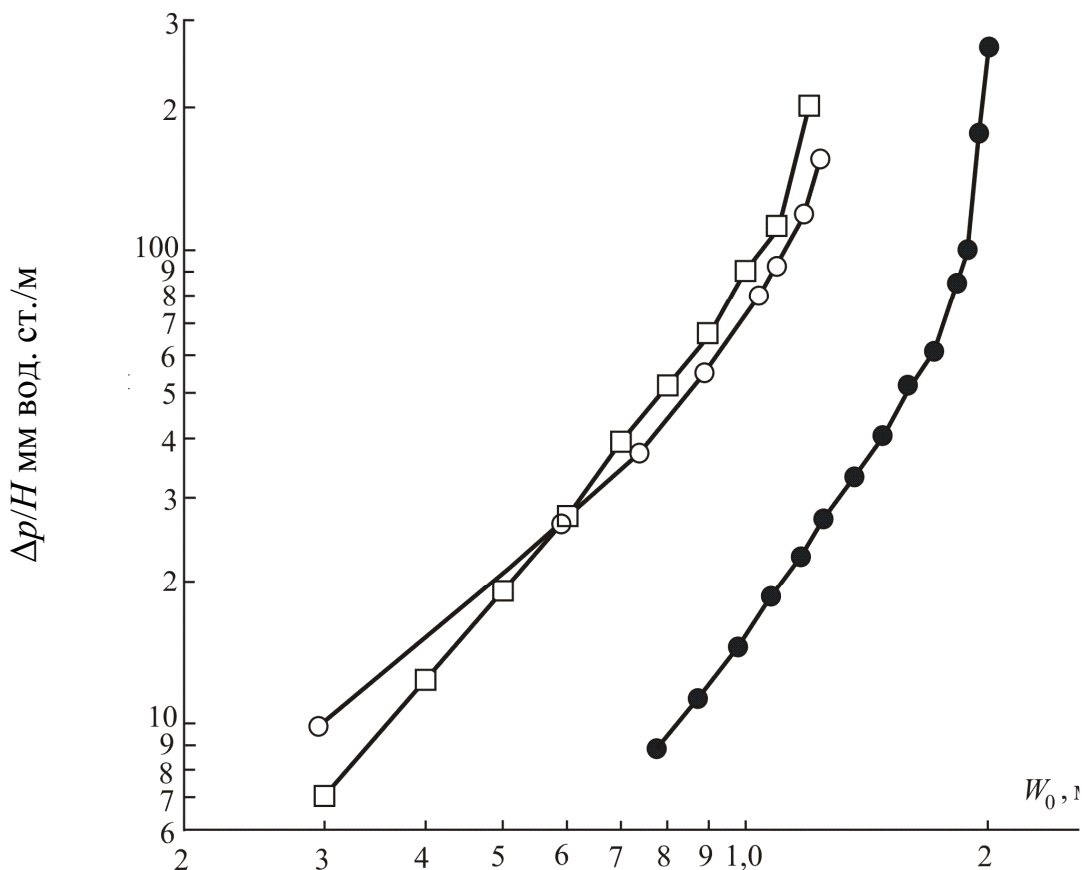


Рис. 11.23. Гидравлическое сопротивление слоя орошаемой насадки в зависимости от фиктивной скорости газа.

Плотность орошения $80 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$: ● – насадка «Инжехим–2000»; ○ – кольца Bialecki металлические $50 \times 50 \text{ мм}$ [49]; □ – кольца Рашига металлические $50 \times 50 \text{ мм}$.

Уравнение Бэйна и Хоугена для новой насадки получено в виде

$$\lg \left(\frac{W_3^2 a_v \rho_{\Gamma} \mu_{\text{ж}}^{0,16}}{g \epsilon_{\text{св}}^3 \rho_{\text{ж}}} \right) = -0,48 - 1,07 \left(\frac{L}{G} \right)^{0,25} \left(\frac{\rho_{\Gamma}}{\rho_{\text{ж}}} \right)^{0,125}, \quad (11.28)$$

где W_3 – критическая скорость захлебывания, м/с; $\mu_{\text{ж}}$ – коэффициент динамической вязкости жидкости, мПа·с; L, G – массовые расходы жидкости и газа, соответственно, кг/с.

Выражение для расчета динамической составляющей задержки жидкости получено в виде [191]

$$\varepsilon_{\text{жд}} = 0,704 \text{Re}_{\text{ж}}^{0,484} \text{Ga}^{-0,346}, \quad (11.29)$$

где $\text{Re}_{\text{ж}} = 4q / (a_v \cdot v_{\text{ж}})$; $\text{Ga} = (a_v \theta)^{-3}$; $\theta = (v_{\text{ж}}^2 / g)^{1/3}$.

Выражение (11.29) получено при $d_3 = 0,011 - 0,038$ м и плотности орошения от 2,5 до 30 м³/(м²·ч).

Исследование структуры потока жидкости в слое насадки проведено методом импульсного ввода трассера. В качестве трассера использован раствор NaCl. В поток жидкости на входе в слой насадки (центральное отверстие распределительной тарелки) вводилось 200 мл раствора соли с концентрацией 0,15 кг/кг. Плотности орошения изменялись от 4 до 10 м³/(м²·ч), скорость воздуха от 0,6 до 1,3 м/с. Концентрация индикатора на выходе из слоя насадки измерялась с помощью потенциометра. Вид кривой отклика на импульсное возмущение приводится на рис. 11.24.

Результаты исследования структуры потока жидкости в слое насадки обобщены известным критериальным уравнением:

$$\text{Pe}_{\text{ж}} = 2,348 \text{Re}_{\text{ж}}^{0,428}, \quad (11.30)$$

где $\text{Pe}_{\text{ж}} = qd_3 / (D_{\text{п}} \varepsilon_{\text{св}})$; $\text{Re}_{\text{ж}} = 4q\rho_{\text{ж}} / (a_v \varepsilon_{\text{св}} \mu_{\text{ж}})$.

Продольное перемешивание по газовой фазе для насадки, близкой по конструктивным характеристикам, описывается выражением

$$\text{Pe}_{\text{г}} = 88,6 \text{Re}_{\text{г}}^{-0,67}, \quad (11.31)$$

где $\text{Pe}_{\text{г}} = W_0 d_3 / D_{\text{п}}$.

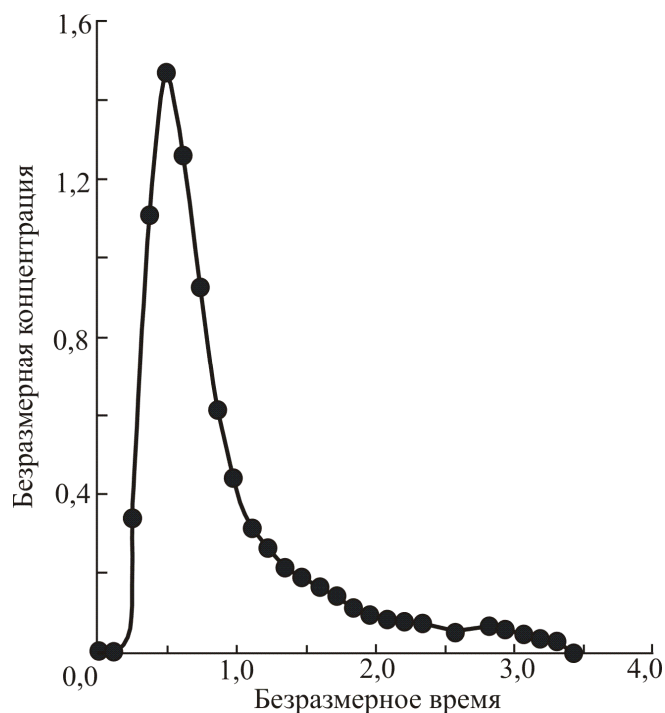


Рис. 11.24 Функция отклика на импульсное возмущение потока жидкости на входе в безразмерных координатах при различных плотностях орошения. $D_k = 600$ мм, высота слоя насадки 1 м, фиктивная скорость газа 0,7 м/с, плотность орошения $5 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$, нерегулярная насадка «Инжехим–2000».

Уравнение (11.31) получено в результате обобщения промышленных данных работы насадки.

В табл. 11.4 приводится сравнение характеристик новой насадки с известными. Видно, что новая насадка обладает лучшими гидравлическими и массообменными свойствами, чем близкие ей по размерам известные насадки.

На рис. 11.25 представлена зависимость коэффициента продольного перемешивания от плотности орошения в колонне с насадкой «Инжехим–2000».

Установлено, что интервал устойчивой работы для новой насадки шире, чем у известных колец Рашига, Палля и ГИАП.

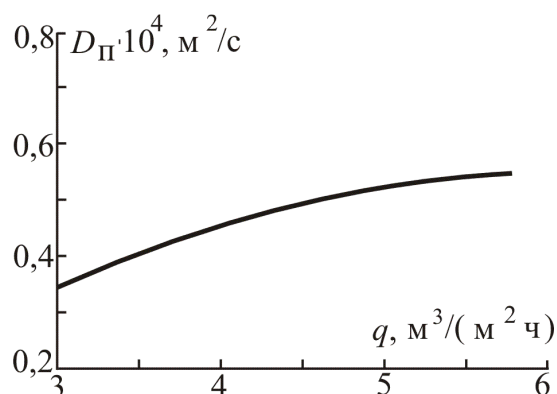


Рис. 11.25 Зависимость коэффициента продольного перемешивания от плотности орошения в колонне с насадкой «Инжехим–2000».

Таблица 11.4. Сравнительные характеристики промышленных насадок размером 50x50 мм

Тип насадки	$\epsilon_{св}$, $\text{м}^3/\text{м}^3$	a_v , $\text{м}^2/\text{м}^3$	Потеря напора, отн. %	Пропускная способность, отн. %	Эффективность, отн. %
Кольца Рашига	0,95	110	100	100	100
Кольца Палля	0,96	100	63	120	125
Хай – Пэк	–	–	65	120	150
Кольца Бялецкого	–	–	85	100	125
Седла Инталокс	–	–	32	44	132
Насадка Лева	0,97–0,98	118	47	–	158
Насадка ГИАП	0,96	101	47	133	137
Инжехим–2000	0,96	103	16–22	180–210	153

Насадка «Инжехим–2002»

Разработана конструкция нерегулярной насадки «Инжехим–2002».

Насадка (рис. 11.26) образована тремя изогнутыми полосами, смещенными относительно друг друга. Края насадки изогнуты для исключения плотного прилегания отдельных элементов друг к другу.

Достаточно несложная конструкция насадки позволяет изготавливать ее методом листовой штамповки, что снижает себестоимость ее изготовления.

Геометрические характеристики насадки «Инжехим–2002» представлены ниже:

материал насадки	листовая сталь 0,5 мм
размер элемента	50×40×35 мм
удельная поверхность a_v	200 м ² /м ³
удельный свободный объем $\epsilon_{св}$	0,95 м ³ /м ³
количество элементов в 1 м ³ , N	31000 шт./м ³
эквивалентный диаметр d_{\ominus}	0,019 м



Рис. 11.26 Элементы насадки «Инжехим–2002».

Исследовали слой новой насадки высотой 0,81 м [190]. Опыты проводились на системе вода-воздух. Фиктивная скорость газа в колонне достигала 3 м/с, плотность орошения составляла 5, 15, и 25 м³/(м²·ч). Каждую серию опытов повторяли по 30 раз для снижения ошибки эксперимента. На рис. 11.27 приведены результаты проведенных испытаний.

На основе результатов исследований установлено, что зависимость удельного сопротивления сухой насадки «Инжехим–2002» от фиктивной скорости газа описывается уравнением (Па):

$$\frac{\Delta p_{\text{сух}}}{H} = 213,86 \cdot W_0^{1,95}. \quad (11.32)$$

Максимальное отклонение расчетных и экспериментальных данных составляет не более 1%.

Потеря давления на 1 м высоты насадки имеет вид (11.25).

В работе [84] обработано большое количество экспериментальных данных по гидравлическому сопротивлению различных насадок и на их основе получена зависимость

$$\xi_0 = C_p \left(\frac{64}{Re_\Gamma} + \frac{1.8}{Re_\Gamma^{0.08}} \right), \quad (11.33)$$

где $Re_\Gamma = \frac{4W_0 \cdot \rho_\Gamma}{a_v \cdot \mu_\Gamma}$

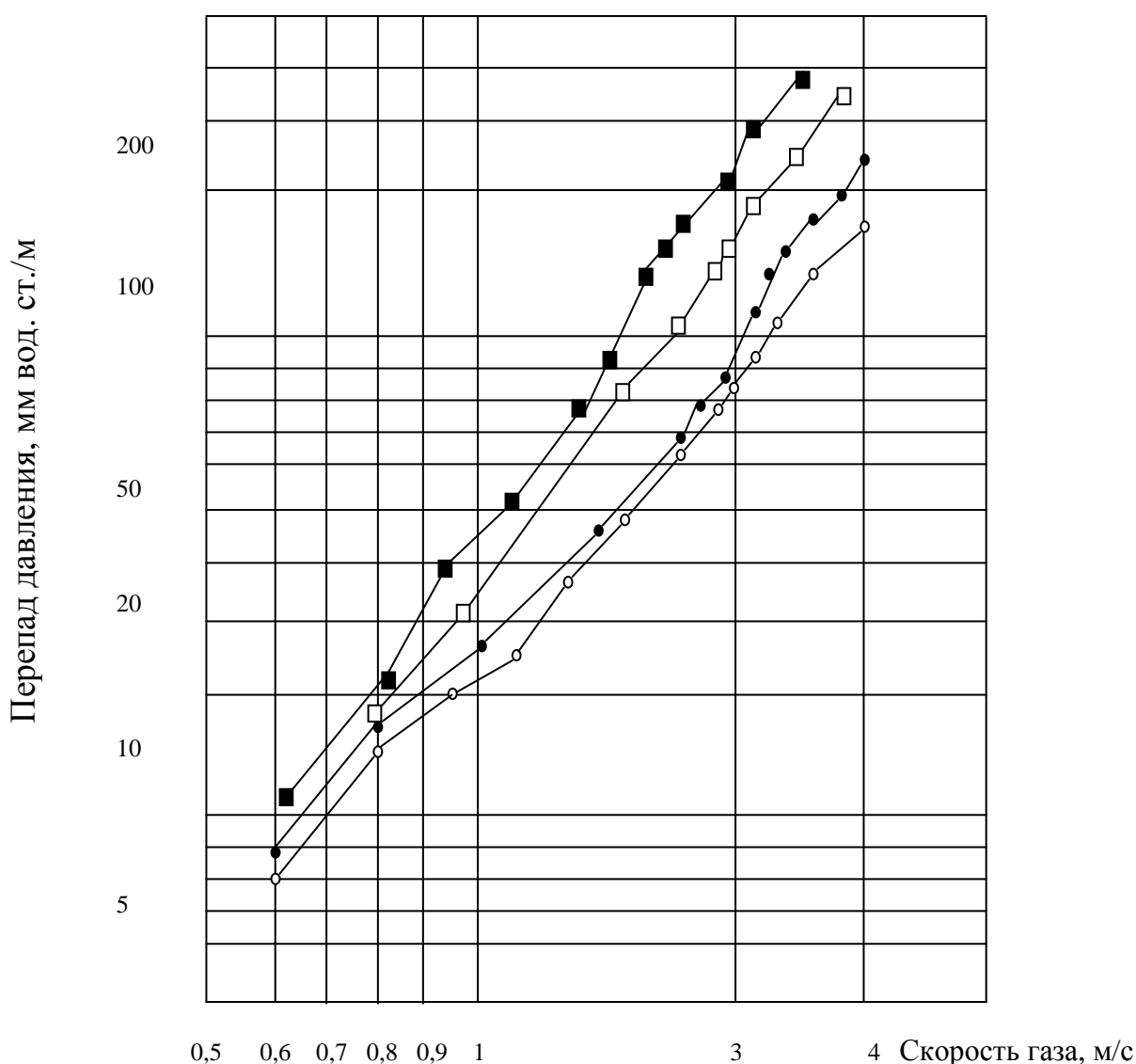


Рис. 11.27 Гидравлическое сопротивление слоя насадки в зависимости от фиктивной скорости газа: ○ – сухая насадка, ● – плотность орошения 5 м³/(м²·ч), □ – плотность орошения 15 м³/(м²·ч), ■ – плотность орошения 25 м³/(м²·ч) [5].

В формуле (11.33) форма и материал насадки учитываются коэффициентом C_p , который для каждого вида насадки определяется экспериментально. Для насадки «Инжехим–2002» коэффициент C_p равен 1,34 [5]. Максимальное отклонение экспериментальных и расчетных значений ξ_0 составляет 3%.

Сопротивление орошаемых насадок в пленочном режиме работы рассчитывается по формуле [84]

$$\frac{\Delta p_{\text{ор}}}{\Delta p_{\text{сух}}} = \exp \left[\frac{Re_{\text{ж}}}{200} \right] \left[\frac{\varepsilon_{\text{св}}}{\varepsilon_{\text{св}} - \varepsilon_{\text{ж}}} \right]^{3/2}, \quad (11.34)$$

где $Re_{\text{ж}} = \frac{q \cdot \rho_{\text{ж}}}{a_v \cdot \mu_{\text{ж}}}$; q - плотность орошения $\text{м}^3 / (\text{м}^2 \cdot \text{с})$.

Разработанная насадка может быть рекомендована для использования в массообменных аппаратах при проведении процессов разделения при малых плотностях орошения и низком гидравлическом сопротивлении.

Насадка «Инжехим 2003–М»

Разработана конструкция нерегулярной насадки «Инжехим 2003–М» (рис. 11.28).

Насадка образована четырьмя изогнутыми полосами, попарно через одну смещенными относительно друг друга.



Рис. 11.28 «Инжехим 2003–М»

Геометрические характеристики насадки «Инжехим 2003–М» представлены ниже:

материал насадки	листовая сталь 0,1 мм
размер элемента	8×7×5 мм
удельная поверхность a_v	745 м ² /м ³
удельный свободный объем $\epsilon_{св}$	0,91 м ³ /м ³
количество элементов в 1 м ³ N	5330000 шт./м ³
эквивалентный диаметр d_{\ominus}	0,0049 м

Исследовали слой новой насадки высотой 0,45 м [425]. Опыты проводились на системе воздух-вода. Фиктивная скорость газа в колонне достигала 0,7 м/с, плотность орошения составляла 0, 5, 10, 20, 30 и 40 м³/(м²·ч). На рис. 11.29 приведены результаты проведенных испытаний.

Установлено, что зависимость удельного сопротивления сухой насадки «Инжехим 2003–М» от фиктивной скорости газа описывается уравнением

$$\frac{\Delta p_{\text{сух}}}{H} = 8747,2 \cdot W_0^{1,7518}, \text{ Па.} \quad (11.35)$$

Потеря давления на 1 м высоты насадки имеет вид (11.25).

В работе [49] обработано большое количество экспериментальных данных по гидравлическому сопротивлению различных насадок и на их основе получена зависимость [425]

$$\xi_0 = 26,18 \cdot \text{Re}_{\Gamma}^{-0,2482} \quad (11.36)$$

$$\text{где } \text{Re}_{\Gamma} = \frac{4 \cdot W_0 \cdot \rho_{\Gamma}}{a_v \cdot \mu_{\Gamma}}.$$

Сопротивление орошаемых насадок в пленочном режиме работы рассчитывается по формуле

$$\frac{\Delta p_{\text{ор}}}{\Delta p_{\text{сух}}} = \exp\left(\frac{\text{Re}_{\text{ж}}}{200}\right) \left(\frac{\epsilon_{\text{св}}}{\epsilon_{\text{св}} - \epsilon_{\text{ж}}}\right)^{3/2}. \quad (11.37)$$

Результаты исследований были использованы при разработке коагулятора для отстойника метанольной воды от ШФЛУ (широкой фракции легких углеводородов) на Сургутском заводе стабилизации конденсата.

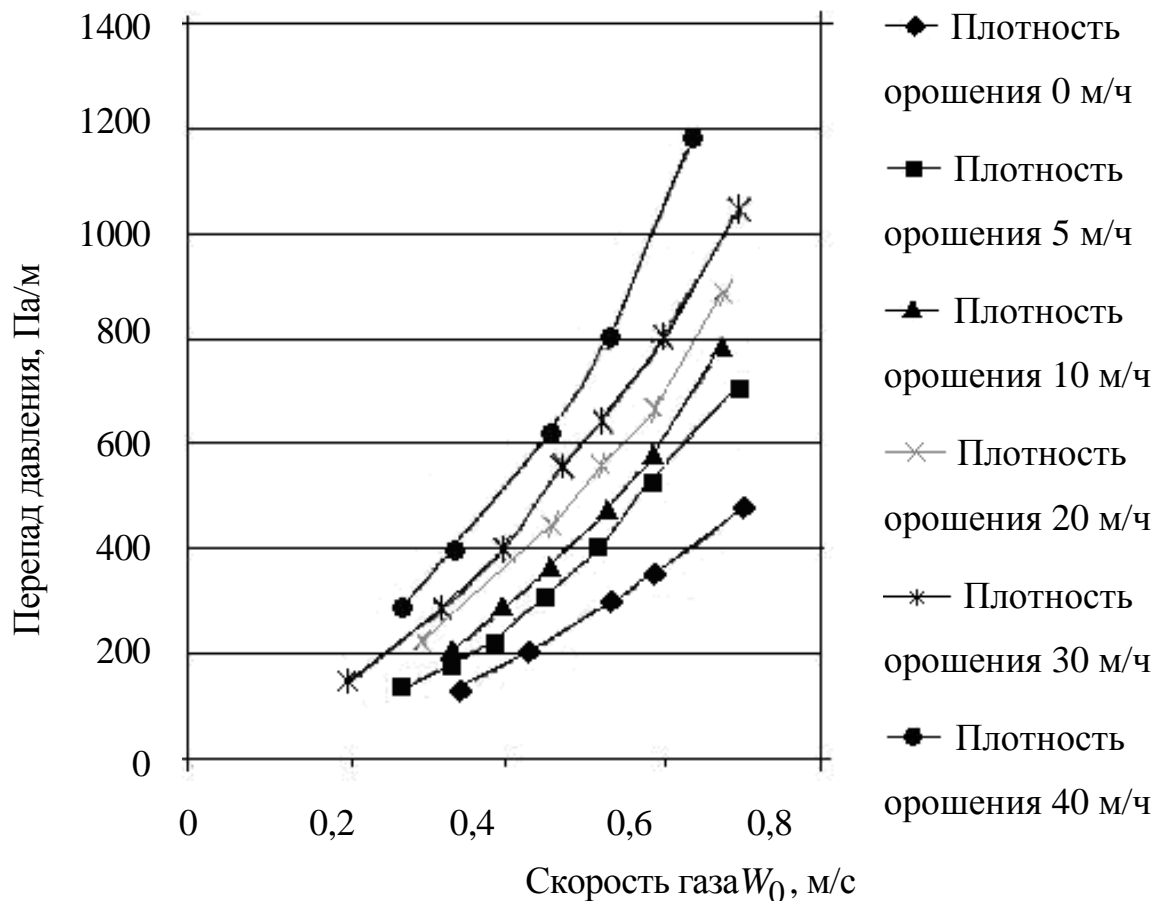


Рис. 11.29 Гидравлическое сопротивление слоя насадки в зависимости от фиктивной скорости газа.

Разработанная насадка также рекомендуется для использования в массообменных аппаратах при проведении процессов разделения при малых плотностях орошения и низком гидравлическом сопротивлении.

11.6. Характеристики регулярной насадки ВІМ

На рис. 11.30 приведена фотография регулярной металлической насадки ВІМ, представляющей собой пакеты гофрированных листов. Материалом насадки являются тонкие ленты из нержавеющей стали. Листы уложены в

смежных слоях перекрестно, на поверхности листов выполнены микрогофры и лепестки. Микрогофры имеют горизонтальную ориентацию, что способствует эффективному перераспределению жидкой фазы в слое насадки. Лепестки предназначены для турбулизации газовой фазы. Налажен выпуск трех типоразмеров насадки (В1М-32, В1М-15 и В1М-20) с высотой гофров, равной соответственно 12, 15 и 20 мм.

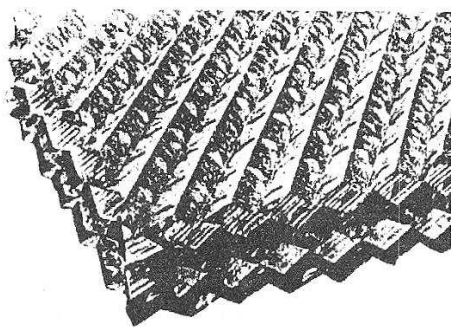


Рис. 11.30 Насадка В1М («Инжехим»).

Конструктивной особенностью насадок В1М является многооперационная обработка поверхности насадки, выполненной из тонкой фольги из нержавеющей стали, включающая:

- нанесение микрорельефа в виде горизонтальных микрогофров, обеспечивающего максимальное растекание жидкости по поверхности насадки;
- выполнение лепесткообразных элементов, обеспечивающих интенсивную турбулизацию газовой и жидкой фаз, дополнительное формирование пленки жидкости;
- гофрирование фольги с целью обеспечения высокого свободного объема насадки и механической прочности.

На рис. 11.31 приведены зависимости гидравлического сопротивления от фактора скорости ($W_0\sqrt{\rho_{\Gamma}}$) и плотности орошения.

В табл. 11.5 даны характеристики насадки В1М.

Таблица 11.5. Характеристики насадки ВМ

Номинальный размер, мм	Свободный объем, м ³ /м ³	Удельная поверхность, м ² /м ³	Эквивалентный диаметр, мм	ВЭТС, м
20	0,98	115	0,035	0,4–0,55
15	0,97	152	0,026	0,35–0,45
12	0,96	190	0,021	0,3–0,4

На рис. 11.32 приведен график зависимости высоты эквивалентной теоретической тарелки (ВЭТТ) насадки ВМ-15 от скорости газа. ВЭТТ определялась по усредненным данным, полученным методами десорбции кислорода из воды и адиабатического увлажнения воздуха.

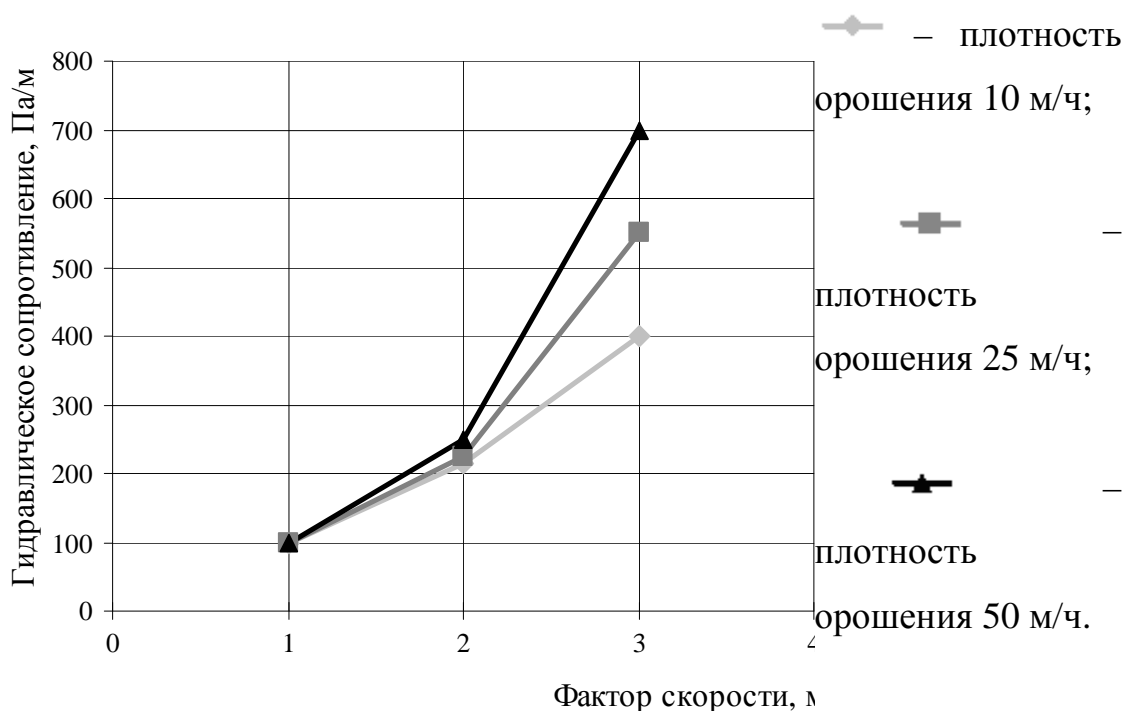


Рис. 11.31 Зависимости гидравлического сопротивления насадки ВМ от фактора скорости и плотности орошения.

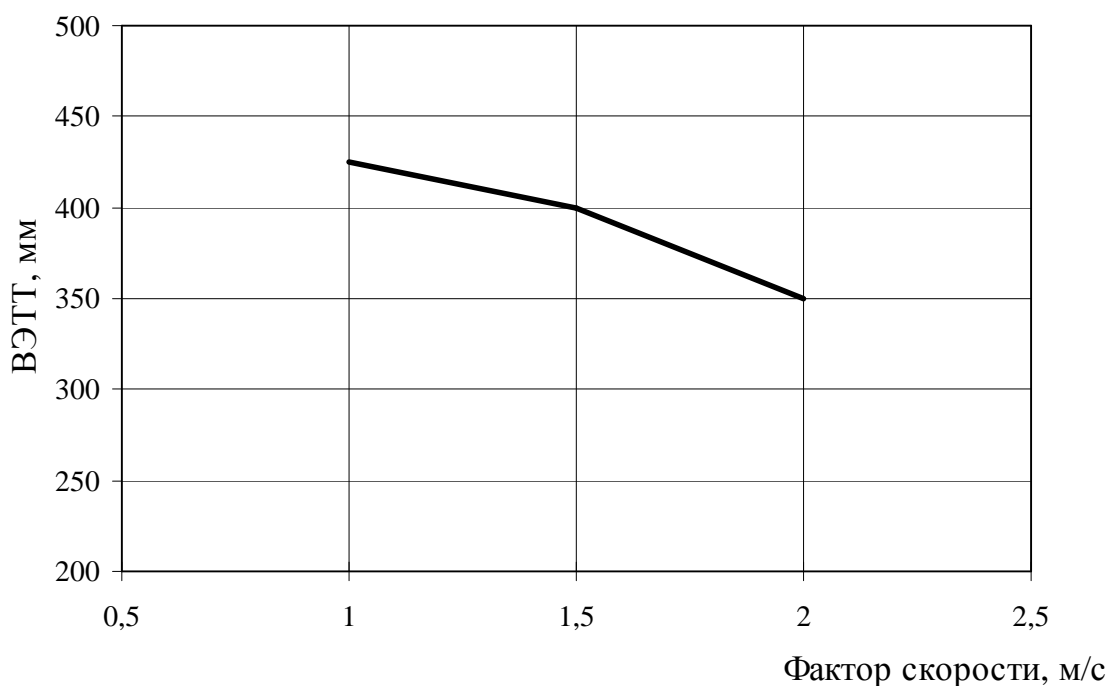


Рис. 11.32 Зависимость ВЭТТ насадки ВІМ от фактора скорости.

Как видно из графиков, характеристики насадки отвечают самым высоким требованиям потребителей.

Область применения:

- атмосферные и вакуумные колонны для перегонки нефтяного и газового сырья;
- стабилизаторы, деэтанизаторы, дебутанизаторы, декарбонизаторы;
- колонны разделения предельных и ароматических углеводородов;
- колонны ректификации спиртов;
- колонны разделения гликолей;
- абсорбционные колонны различных типов.

Предлагаемая насадка может использоваться также для работы с жидкими многофазными средами: для оснащения экстракционных колонн, перемешивания и разделения гетерогенных систем. Принцип ее работы в этих случаях аналогичен вышеприведенному, при этом роль газовой играет более легкая фаза.

На основе результатов исследований установлено, что зависимость удельного сопротивления сухой насадки «ВІМ–15» от фиктивной скорости газа описывается уравнением (Па):

$$\frac{\Delta p_{\text{сух}}}{H} = 34,97 \cdot W_0^{2,04}. \quad (11.38)$$

Потеря давления на 1 м высоты насадки наиболее часто описывается уравнением вида

$$\frac{\Delta p_{\text{сух}}}{H} = \frac{\xi_0 \cdot W_0^2 \cdot \rho_{\Gamma} \cdot a_v}{8 \cdot \epsilon_{\text{св}}^3}. \quad (11.39)$$

Обрабатывая данные экспериментов по уравнению, получили зависимость коэффициента сопротивления слоя сухой насадки «ВІМ–15» от критерия Рейнольдса по газовой фазе ($500 < \text{Re}_{\Gamma} < 2000$):

$$\xi_0 = 0,856 \cdot \text{Re}_{\Gamma}^{0,04}. \quad (11.40)$$

Достаточно несложная конструкция насадки позволяет изготавливать ее методом листовой штамповки, что снижает себестоимость ее изготовления.

11.7. Численные исследования регулярной насадки

В данном разделе приведено сравнение экспериментального и численного подходов для решения задач проектирования насадочных контактных устройств типа IRG (разд. 11.4). Описана методика проведения численного эксперимента с использованием программного продукта PHOENICS-3.3 [194,196,321,452].

Описание численного метода исследования

Возможность численного расчета гидродинамики насадочных аппаратов позволяет существенно сократить затраты времени на проведение экспериментальных исследований и оптимизировать геометрию насадочных

элементов, что является актуальным при разработке новых высокоэффективных массообменных аппаратов. Проведение подобных исследований открывает новые возможности для более точного проектирования аппаратов разделения, так как это дает возможность получать как традиционно используемые осредненные характеристики гидравлического сопротивления, так и ряд характеристик, которые затруднительно измерить опытным путем.

Наиболее известной является стандартная K - ϵ модель турбулентности, однако она в ряде случаев дает завышенные параметры турбулентности, вдобавок к этому K - ϵ модель турбулентности плохо работает при наличии зон циркуляции, неблагоприятного градиента давлений, сильной нестационарности при угловатых твердых поверхностях. Значительно лучшие результаты должны получаться при использовании моделей Chen и Kim и ренормализованной K - ϵ модели, специально разработанных для отрывных течений и течений с циркуляционными зонами, а также для работы со сложной геометрией твердых поверхностей. Несмотря на то, что в исследуемой области каналов течение происходит преимущественно вдоль желобков, что у краев пакета происходит перекачивание через желоб и у стенки наблюдается более сложный характер течения, выбор был сделан в пользу ренормализованной K - ϵ модели турбулентности.

Для однофазного течения несжимаемой жидкости, а воздух в условиях наших экспериментов может рассматриваться как несжимаемая жидкость, уравнения движения сплошной среды, заложенные в программный комплекс PHOENICS-3.3, без учета влияния силы тяжести выглядят следующим образом:

$$\sum_j \frac{\partial U_j}{\partial x_j} = 0,$$

$$\rho \frac{\partial U_i}{\partial t} + \rho \sum_j \frac{\partial (U_i U_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \rho \sum_j \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\nu \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) - \overline{u_i u_j} \right], \quad (11.41)$$

где U_i – компоненты вектора средней скорости, а $\overline{u_i u_j}$ – осредненные произведения компонентов пульсационной скорости. Для ламинарного течения $\overline{u_i u_j} = 0$, а для турбулентного режима движения $\overline{u_i u_j}$ в приведенном выше уравнении заменяется выражением согласно гипотезе турбулентной вязкости:

$$-\overline{\rho u_i u_j} = \mu_T \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) - \rho K \frac{2\delta_{ij}}{3}, \quad (11.42)$$

где K – удельная кинетическая энергия турбулентности, $\mu_T = \rho \nu_t$ – коэффициент турбулентной вязкости, зависящий от гидродинамических условий, определяемый по модели турбулентности, среди которых наибольшее распространение получило K - ϵ замыкание. В этой модели μ_T связывается с удельной кинетической энергией турбулентности K и ее диссипацией ϵ по определенному закону. Для ренормализованной K и ϵ модели турбулентности записываются соответствующие дифференциальные уравнения переноса:

$$\nu_m = \frac{C_m K^2}{\epsilon}, \quad (11.43)$$

$$\frac{\partial(\rho K)}{\partial t} + \sum_{i=1}^3 \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\rho U_i K - \left(\frac{\rho \nu_m}{C_k} \right) \frac{\partial K}{\partial x_i} \right) = \rho (P_k + G_b - \epsilon), \quad (11.44)$$

$$\frac{\partial(\rho \epsilon)}{\partial t} + \sum_{i=1}^3 \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\rho U_i \epsilon - \left(\frac{\rho \nu_m}{C_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i} \right) = \left(\frac{\rho \epsilon}{K} \right) (C_1 P_k + C_3 G_b - C_2 \epsilon) + S_\epsilon, \quad (11.45)$$

где P_k – скорость генерации кинетической энергии турбулентности, за счет сдвиговых сил:

$$P_k = \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 \nu_t \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial U_i}{\partial x_j}, \quad (11.46)$$

где G_b – скорость генерации кинетической энергии турбулентности за счет силы тяжести, вызванная пространственной неоднородностью плотностей:

$$G_b = \frac{-v_t \sum_{i=1}^3 g_i \left(\frac{\partial \rho}{\partial x_i} \right)}{(\rho C_h)}. \quad (11.47)$$

В нашем случае влиянием силы тяжести пренебрегаем, ввиду отсутствия неоднородности плотностей, поэтому $G_b = 0$; $C_k = 0,7194$; $C_\varepsilon = 0,7194$; $C_1 = 1,42$; $C_2 = 1,68$; $C_m = 0,0845$.

S_e – дополнительное слагаемое в уравнении переноса скорости диссипации кинетической энергии турбулентности, которое отличает ненормализованную K – ε модель от стандартной:

$$S_e = \frac{-\rho \alpha \varepsilon^2}{K}, \quad (11.48)$$

$$\alpha = \frac{C_m \eta^3 \left(1 - \frac{\eta}{\eta_0} \right)}{1 + \beta \eta^3}, \quad (11.49)$$

$$\eta_0 = 4,38; \beta = 0,012.$$

Безразмерный параметр η определяется как:

$$\eta = \frac{S K}{\varepsilon}, \quad (11.50)$$

где

$$S^2 = 2 \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 (S_{ij})^2,$$

$$S_{ij} = 0,5 \left(\frac{\partial U_i}{\partial X_j} + \frac{\partial U_j}{\partial X_i} \right).$$

При работе с PHOENICS эти уравнения в явном виде записывать не нужно, так как они уже заложены в программный комплекс.

Граничные условия на твердых поверхностях ставятся заданием известных пристеночных функций, выражающих логарифмический профиль скорости у стенки.

Влияние расчетной сетки на результат расчета проверяется следующим образом:

1. Решение не должно зависеть от количества ячеек расчетной сетки.

2. Нужно контролировать величину Y_+ на ячейках прилегающих к стенке, должно соблюдаться условие: $30 < Y_+ < 130$, причем если $Y_+ \gg 130$, то сгущается сетка у стенки, и наоборот.

В результате для случаев обтекания газовым потоком двух элементов насадки и пакета из нескольких насадочных элементов получены поля давления и скорости.

Все численные эксперименты проводились по следующей схеме. Выбиралась геометрия насадки, принятая из условия, что все три характерных параметра изменяются независимо (рис. 11.33).

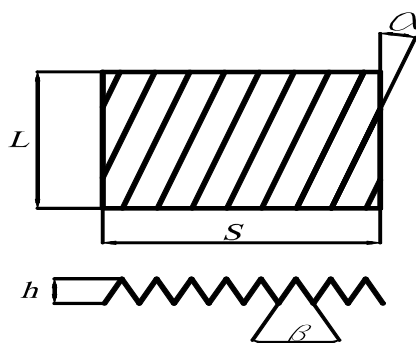


Рис. 11.33 Геометрическая схема регулярной насадки irg:

α – угол к вертикальной оси аппарата, град; β – угол в основании гофра, град; S – ширина полотна насадки, мм; L – высота насадки, мм; h – высота гофра, мм

Результаты расчета зависимости гидравлического сопротивления насадки от угла α представлена на рис. 11.34, от высоты гофра на рис. 11.35 и от угла β на рис. 11.36.

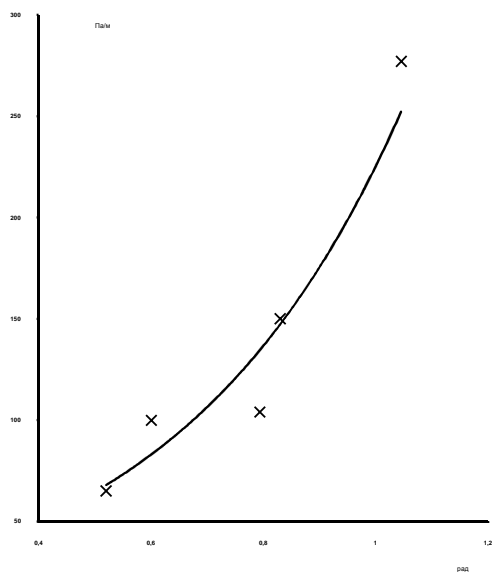


Рис. 11.34 Зависимость гидравлического сопротивления насадки от угла α .

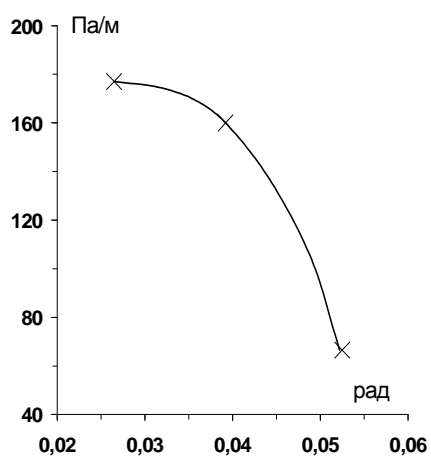


Рис. 11.35 Зависимость гидравлического сопротивления насадки от высоты гофра.

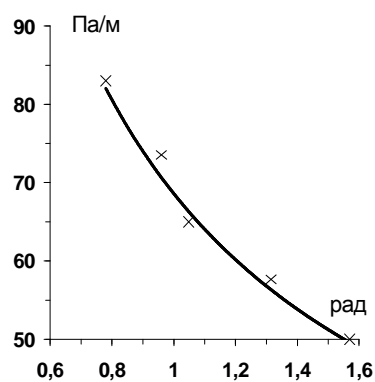


Рис. 11.36 Зависимость гидравлического сопротивления насадки от угла β .

При обработке результатов по влиянию гидравлического сопротивления насадки от угла α получена зависимость следующего вида [321]:

$$F(\alpha) = 13,5e^{2,77^* \alpha}, \quad (11.51)$$

причем $0^\circ < \alpha < 90^\circ$.

При обработке результатов по влиянию угла β на гидравлическое сопротивление насадки получена зависимость следующего вида:

$$F(\beta) = \beta^{-0,726}. \quad (11.52)$$

Обобщая данные численного моделирования, получено уравнение со скорректированными числовыми параметрами [194,321]:

$$\Delta p = 59,98 \beta^{-0,6244} e^{2,644\alpha} (1 - 17,78H)^{11,3578} \text{Re}^{-0,22} \frac{\rho \omega^2}{2}$$

где $H = h/S$; S – длина ламели, м; $I \ll S$ или $h/S \ll 0,5$ ($\text{ctg}\beta/2$); I – шаг гофра, м.

Проведенное сравнение данных численного и физического экспериментов показывает удовлетворительную сходимость.

ГЛАВА 12

ПЕРСПЕКТИВЫ ИНТЕНСИФИКАЦИИ РАБОТЫ АППАРАТОВ С НАСАДКОЙ

12.1. Возможные дальнейшие пути совершенствования конструкций насадок

В разных разделах этой книги неоднократно говорилось о влиянии характеристик насадок на показатели процессов, осуществляемых в насадочном слое. Можно с сожалением констатировать, видимо неизбежное, но объективно закономерное, снижение темпов прироста эффективности и других показателей при разработке новых конструкций насадок. Поэтому следует приветствовать каждую новую насадку, если она обеспечивает прирост хотя бы одного показателя при сохранении неизменными других. Так снижение гидравлического сопротивления, обеспечит снижение расходных коэффициентов на электроэнергию, увеличение пропускной способности позволит уменьшить диаметр колонны, т.е. его металлоемкость. К тому же эффекту приведет увеличение эффективности из-за снижения высоты насадочных слоев и, соответственно, колонны. Естественно лучше, если новая насадка при близкой стоимости обеспечит увеличение сразу двух и, тем более, трех показателей. Как это было, например, при создании в

России в середине 80-х годов новой нерегулярной металлической насадки ГИАП-НЗ, которая превзошла по всем своим показателям наиболее распространенную в то время в мире промышленную насадку – кольца Палля.

Сказанное выше стимулирует усилия по созданию новых насадок. Несомненно, эти работы будут продолжаться с положительными результатами.

В каком направлении предпочтительно двигаться при разработке новых конструкций насадок?

Для обеспечения высоких технологических показателей, как уже говорилось выше, насадки должны иметь: - по возможности бóльшую долю свободного объема, что имеет решающее значение для достижения высоких гидродинамических показателей (низкого ΔP , большой пропускной способности) и развитую геометрическую поверхность. Последнее является обязательным условием для получения высоких массообменных характеристик. Однако в этом состоит сложность, поскольку конструкция насадки должна нести в себе, как бы два противоречивых начала: стремление обеспечить хорошие массообменные характеристики, что возможно за счет развития поверхности, а также бóльшей турбулизации обеих фаз на или вблизи поверхности их контакта, неминуемо ведет к ухудшению гидродинамических характеристик и наоборот. Поэтому при разработке новых конструкций насадок необходимо стремиться к достижению оптимального соотношения ε и a . Сложность задачи подтверждается всем историческим ходом развития конструкций насадок: путь от одной из первых промышленных насадок – колец Рашига [342], изобретенных в 1914 г., до создания распространенной современной промышленной насадки – колец Палля [343] занял более 40 лет, причем массообменные характеристики удалось улучшить всего на $\sim 20\%$. Поэтому обеспечение прироста каждого процента эффективности (не в ущерб другим показателям) следует считать весьма трудной задачей.

Опыт показывает, что целесообразно работать над новыми насадками в следующих направлениях.

1. Анализ известных конструкций нерегулярных и, в первую очередь, металлических насадок убеждает [182,233], что базисной, по-видимому, должна быть кольцевая форма насадки, наиболее благоприятная с точки зрения гидродинамики. Поэтому перспективным представляется движение по пути совершенствования насадок кольцевой формы.

2. Возможности развития поверхности ограничены неизбежным усложнением конструкции, поэтому для достижения хороших массообменных характеристик должна быть обеспечена высокая (близкая к предельной) степень смачивания геометрической поверхности контактирующими потоками. Для оценки эффективности смачивания поверхности кольцевой насадки весьма важным является вопрос об ориентации колец в слое. По данным работы [46] при хаотической загрузке 45% колец располагается вертикально или наклонно и 55% горизонтально. Кольца с вертикально расположенными осями представляют собой открытую для потоков структуру, что обуславливает лучшие условия для омывания поверхности элемента, а также бóльшую пропускную способность. В тоже время снижается турбулизация потока, способствующая росту эффективности массопередачи. Если расположить оси колец горизонтально, то можно несколько увеличить эффективность массопередачи, в расчете на единицу омываемой поверхности, но одновременно уменьшается доля использования a , повышается ΔP и снижается пропускная способность.

Из приведенного анализа следует, что простейшая кольцевая насадка – кольца Рашига при нерегулярной укладке, в принципе, не может обеспечить хороших массообменных характеристик при одновременно высокой пропускной способности и низком ΔP . Как известно, в слое из колец Рашига наблюдаются: экранирование элементов, малая доступность для омывания жидкостью их внутренней поверхности, значительное перераспределение

жидкости к стенкам аппарата по мере ее перемещения в слое вне зависимости от характера начального распределения.

Перфорация, как инструмент совершенствования насадки, многое улучшает и, в первую очередь, гидродинамические характеристики, а также внутреннее омывание кольца. Однако при этом снижается удельная поверхность. В кольцах Палля, которые, как известно, представляют собой кольца Рашига с прямоугольной перфорацией и лепестками, отогнутыми во внутрь кольца, удалось сохранить величину a и при этом дополнительно интенсифицировать массообмен во внутренней полости насадки за счет турбулизации потоков, обусловленной воздействием лепестков. В итоге по сравнению с кольцами Рашига массообменные характеристики, как уже упоминалось, выросли на $\sim 20\%$, а ΔP снизилось в среднем в ~ 2 раза. Однако оно оказалось более высоким, чем для просто перфорированных (без лепестков) колец Рашига.

Более высокие показатели по сравнению с кольцами Палля были достигнуты для принципиально новой конструкции кольцевой насадки - ГИАП-НЗ [118]. Элементы этой насадки представляют собой два полукольца, соединенных квадратной перегородкой и повернутых друг относительно друга на 90° . Зазор в середине полуколец и, главным образом, перфорация полуколец и перегородки, выполненная в виде круглых отверстий, обеспечивают лучше, по сравнению с кольцами Палля, условия для омывания внутренней поверхности насадки. В результате при практически совпадающих значениях ε и a насадка ГИАП-НЗ по сравнению с кольцами Палля обладает на $\sim 15\%$ более высокой эффективностью и на $20\div 25\%$ более низким ΔP .

Из сказанного выше следует, что более равномерное распределение жидкости и газовой фазы, более полное использование геометрической поверхности насадки, а также более полное обновление поверхности контакта фаз, ведущее в конечном итоге к повышению эффективности массопереноса, обеспечивается перфорацией элементов насадки. Поскольку в

настоящее время практически отсутствуют обоснованные данные об оптимальной площади перфорации, размере отверстий и месте их расположения (такого рода достаточно полные исследования были осуществлены только применительно к насадке ГИАП-НЗ [232,339]), весьма важным следует считать проведение дальнейших исследований в этом направлении.

3. Всевозможные завихрители, лопасти, выступы и прочие конструктивные детали, способствуют турбулизации жидкости, ее диспергированию, завихрению потоков газа. При этом, однако, неминуемо возрастает гидравлическое сопротивление и снижается предельная нагрузка. Поэтому работы следует вести в направлении поиска таких оптимальных конструктивных решений, которые, максимально увеличивая интенсивность процесса массообмена, одновременно минимально увеличивали бы ΔP .

4. В этом же направлении должен вестись поиск таких конструктивных приемов, как нанесение на поверхность элементов гофр или ее рифление с целью удлинения пути потоков, т.е. развития поверхности контакта фаз, дополнительной турбулизации потоков. Используя эти и другие приемы, была создана эффективная, нерегулярная насадка «Инжехим», превосходящая по своим показателям другие известные насадки [295].

5. Такой конструктивный прием, как снабжение элементов насадки перегородками и другими дополнительными внутренними поверхностями, ведет к увеличению прочности элементов, развитию поверхности контакта фаз. При этом, как правило, растет ΔP , снижается пропускная способность. Рост эффективности может быть достигнут только в том случае, если коэффициент использования внутренней поверхности будет в достаточной степени велик. Это должно быть задачей данного направления разработок.

6. При разработке конструкций насадок новых форм, или совершенствовании существующих конструкций, следует уделить особое внимание созданию возможностей для наиболее полного омыwania и активного использования внутренней поверхности насадки обеими потоками,

вне зависимости от ориентации элемента по отношению к оси аппарата. При этом должны быть найдены и использованы другие приемы, помимо нанесения перфорации. Упомянутый выше пример колец Рашига показывает сколь много можно потерять в эффективности, если хорошее омывание внутренней поверхности не обеспечивается.

7. Нам представляется, что соответствующее внимание должно быть уделено увеличению прочности элементов, что может привести к снижению возможности их разрушения при загрузке и гидроударах, а, главное удлинению времени их пробега. Для металлических насадок это возможно достигнуть путем нанесения зиг на элементах насадки при их штамповке (без изменения толщины металла) или использовании других приемов. Зиговка одновременно даже может позволить, в определенных случаях, снизить толщину стенок элемента, т.е. вес насадки в единице объема.

8. Важной проблемой для насадок является повышение их коррозионной стойкости. Для насадок из пластмасс в первую очередь необходима разработка новых полимерных материалов с повышенной коррозионной и термостойкостью и отработка технологии изготовления из них элементов насадки. Используемые в настоящее время в России для изготовления насадок полиэтилен низкого давления высокой плотности, полипропилен и несколько более стойкий композит не могут полностью удовлетворять запросы потребителей нерегулярных насадок. Можно ожидать, что в самое ближайшее время для изготовления насадок будут освоены новые полимерные материалы, в том числе кремнеорганические.

Для снижения стоимости металлических насадок интересные возможности открывают новые электрохимические способы нанесения на изделия из углеродистых сталей защитных покрытий из легированной стали [218]. Благодаря диффузии молекул в толщу тела изделия из углеродистой стали они создают покрытие высокой прочности. При этом исключается нарушение этого покрытия в результате трения элементов друг о друга при их загрузке в аппарат, а также при транспортировке.

9. Что касается регулярных насадок, то для каких бы целей не предполагалось их использовать, нам представляется бесперспективным совершенствование конструкций, образующих параллельные, не сообщающиеся между собой сплошные замкнутые каналы. Гидродинамическая обстановка в аппарате, загруженном насадкой с такого рода каналами, не позволит обеспечить достаточно высокую эффективность процессов тепло-массообмена. Это будет иметь место даже, если насадка будет выполнена из сетки, но со столь мелкими ячейками, что пленка жидкости на ней не допустит прохода через нее газа. По-видимому, только наличие перетоков обеих фаз в горизонтальном направлении, контакты и перемешивание потоков, протекающих в соседних каналах, могут обеспечить высокую эффективность переноса. Причем необходимость в такого рода контактах возрастает с увеличением площади поперечного сечения аппарата.

Наряду с дальнейшим развитием конструкций регулярных насадок из сетки (как металлической, так и полимерной) представляется перспективным совершенствование регулярных насадок для испарительного охлаждения воды в градирнях, основой которых являются винтовые элементы, изготовленные из полимерного материала. В этом убеждает имеющийся опыт разработки [120] и эксплуатации оросителей из винтовых элементов в градирнях разного масштаба [239]. Повышение эффективности оросителей на основе винтовых элементов по сравнению с существующими конструкциями, как нам кажется, может быть достигнуто совершенствованием, как способов укладки винтовых элементов в блоки, так и совершенствованием геометрии самого винта, а также, возможно, его перфорацией.

10. Наконец важен еще один – экономический аспект – стоимость насадки. Поэтому представляется, что сегодня необходимо вести также поиск таких новых конструктивных решений, которые, при сохранении или некотором улучшении основных показателей насадки, обеспечили бы большую простоту и ее более низкую стоимость при массовом изготовлении.

Опыт показывает, что затраты времени, а также материальные затраты на отработку каждой новой конструкции насадки, или на совершенствование известной конструкции, могут быть значительно сокращены, если первым шагом в исследовании будет продувка и изучение аэродинамических характеристик опытного образца в аэродинамической трубе. Лишь после внесения соответствующих коррективов в конструкцию и достижения оптимальных показателей на элементе насадки, следует приступить к изготовлению опытной партии насадки и к проведению гидродинамических и массообменных испытаний на опытных установках.

Перечисленные направления работ, разумеется, не охватывают всех возможных путей совершенствования конструкций насадок.

12.2. Увеличение рабочей скорости газа

Многие годы при проектировании аппаратов с насадочными контактными устройствами для осуществления в первую очередь, процессов абсорбции, в качестве предельно допустимой (максимальной) рабочей нагрузки по газу (пару) - w_m , в большинстве случаев принималось их значение, равное 60÷80% от скорости начала захлебывания w_z [28,182,330,358,392]. Это обусловлено рядом причин. Во-первых, указанная w_m меньше скорости начала подвисяния - $w_{Д}$, т.е. лежит в области пленочного режима, в котором гидродинамические и массообменные характеристики наиболее стабильны, а закономерности их изменения лучше всего изучены. Во-вторых, (глава 4) при скоростях, превосходящих скорость начала подвисяния, резко увеличивается влияние скорости газа (пара) на гидравлическое сопротивление насадочного слоя. В-третьих, и это, наверное, самое главное – необходимость обезопаситься от захлебывания аппарата при некоторых сбоях режима – увеличении нагрузок сверх регламентированных.

Указанные выше опасения в полной мере были оправданы на том уровне техники контроля и автоматизации производства, когда в управлении

работой аппаратов превалировала роль оператора. В настоящее время, и тем более в перспективе, когда управление процессами и отдельными аппаратами, в особенности в крупномасштабных агрегатах автоматизировано и осуществляется с помощью ЭВМ, что гарантирует надежное поддержание заданного режима, представляется целесообразным и возможным большее приближение значений w_m к w_z по отношению к указанным выше.

Но каким должно быть оптимальное соотношение w_m/w_z ?

Рассмотрим представленные на рис. 12.1 зависимости: ΔP_{nm} (кривая I), $\beta_{жв}$ (кривая II) и $\Delta P_{nm}/\beta_{жв}$ (кривая III) от скорости газа (пара). Эти данные получены при испытаниях нерегулярной металлической насадки ГИАП-НЗ [232,339].

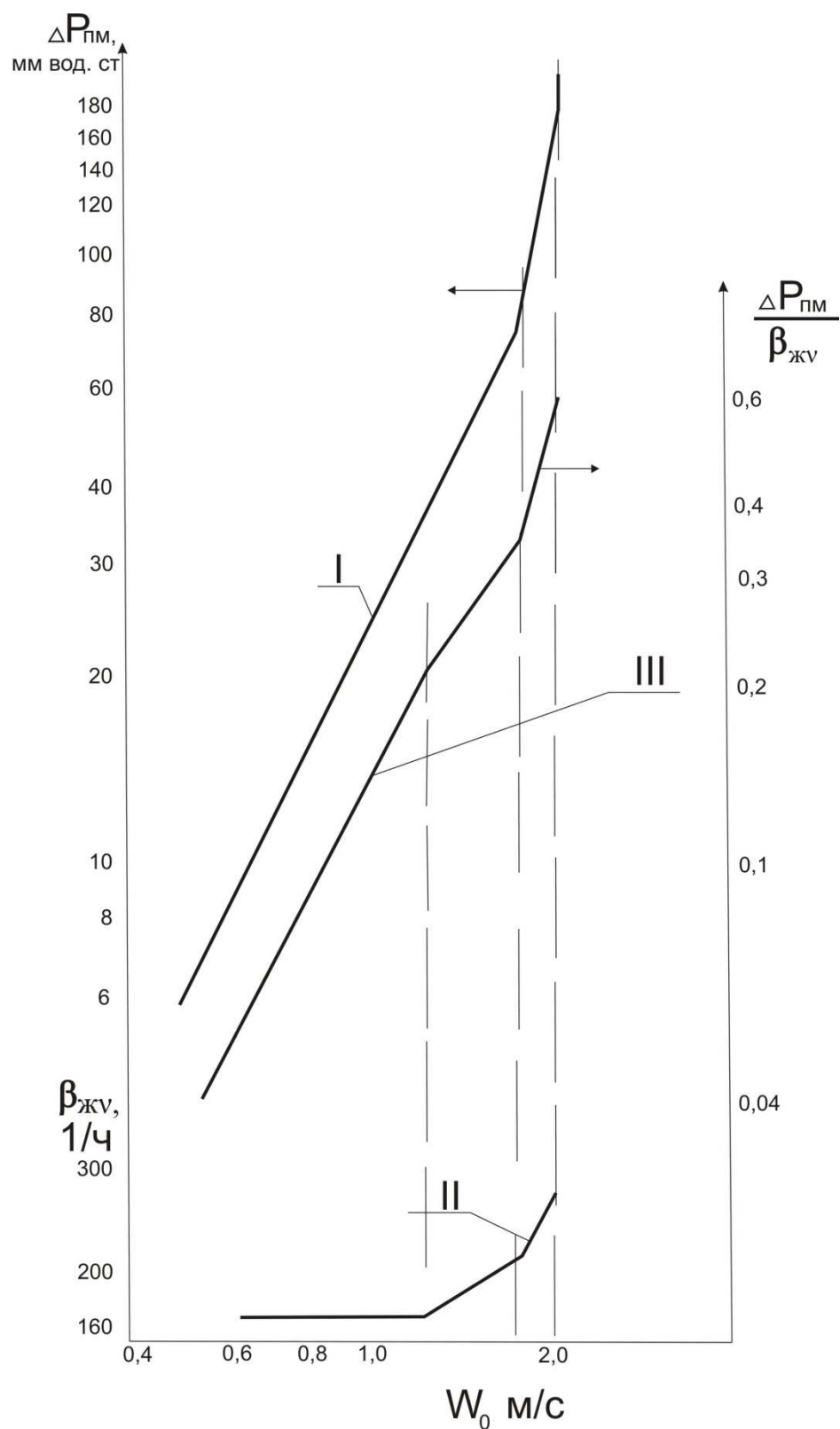


Рис. 12.1 Зависимость показателей процесса абсорбции CO_2 водой от скорости газа: насадка ГИАП-НЗ, 50 мм, $Lop=100 \text{ м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{час}$; I - $\Delta P_{nm}=f(w_0)$; II - $\beta_{жв}=f(w_0)$; III - $\Delta P_{nm}/\beta_{жв}=f(w_0)$.

Кривая I имеет характерный для такого рода зависимостей вид $\Delta P \sim w^{2,0}$ в области пленочного режима течения и $\Delta P \sim w^{5,4}$ в области режима подвисяния. $W_{II} = 0,855w_3$.

Кривая II, характеризующая зависимость $\beta_{жсв} = f(w_0)$, также имеет типичный вид: на начальном участке ниже определенного значения скорости (обозначим w_{II}'), лежащей в области пленочного режима течения, $\beta_{жсв}$ не зависит от скорости газа (кривая параллельна оси абсцисс). При значениях $w_{II}' < w < w_{II}$ наблюдается возрастание $\beta_{жсв}$, которое становится еще более резким в диапазоне скоростей $w_{II} - w_3$. Таким образом, принимая во внимание различную зависимость $\beta_{жсв}$ в диапазоне скоростей ниже w_{II} , можно говорить о существовании переходной области между ярко выраженным пленочным режимом течения и режимом подвисяния, лежащей в диапазоне скоростей $w_{II}' - w_{II}$. Как установлено в [21], в пределах переходной области имеют место следующие зависимости: $\beta_{жсв} \sim w^{0,7}$ и $\Delta P \sim w^{2,0}$, т.е. практически та же зависимость ΔP от w , что и в пленочном режиме. В режиме подвисяния $\beta_{жсв} \sim w^{2,0}$. О возможности существования переходной области говорится также в [263]. Установленная в [236] нижняя граница переходной области $w_{II}'/w_3 = 0,59$; в [22] $w_{II}'/w_3 = 0,45$.

Рассмотрим теперь кривую III рис. 12-1 - $\Delta P_{nm}/\beta_{жсв} = f(w_0)$, которая является результирующей кривых I и II. На начальном участке (при значениях $w < w_{II}'$) кривая параллельна кривой $\Delta P_{nm} = f(w)$, поскольку на этом участке $\beta_{жсв} = const$. Правее точки w_{II}' на участке $w_{II}' - w_{II}$, как уже говорилось выше, $\beta_{жсв} \sim w^{0,7}$ а $\Delta P \sim w^{2,0}$. В результате имеем $\Delta P_{nm}/\beta_{жсв} = f(w^{1,3})$. При значениях $w > w_{II}$ вплоть до w_3 , где $\Delta P \sim w^{5,4}$, а $\beta_{жсв} \sim w^{2,0}$, в итоге имеем $\Delta P_{nm}/\beta_{жсв} = f(w^{3,4})$.

Учитывая смысл симплекса $\Delta P_{nm}/\beta_{жсв}$, наиболее выгодны энергетически условия, когда его значения минимальны. Однако стремление иметь по возможности меньшие габариты аппарата с насадкой, и в первую очередь его диаметр, приводит к необходимости работать при нагрузках близких к предельным. Таковым является диапазон нагрузок $w_{II}' - w_{II}$, где, как уже

говорилось, зависимость симплекса $\Delta P_{пм}/\beta_{жв}$ от w наименьшая. Таким образом, на участке $w_{п}$ - w рост значений $\Delta P_{пм}$ с увеличением скорости газа в наибольшей мере по сравнению с участком $w_{п}$ - w_3 компенсируется снижением высоты насадного слоя за счет роста $\beta_{жв}$. Из сказанного следует, что предельные максимальные нагрузки w_m , учитывая интересы в минимизации диаметра аппарата, должны лежать на границе переходной области и режима подвисяния, т.е. $w_m=w_{п}$.

Принимая во внимание изложенное в разделе 4.2. относительно ширины диапазона скоростей $w_{п}$ - w_3 , можно констатировать, что для большинства промышленных насадок при высоких плотностях орошения предельно допустимые скорости газа (пара) могут приближаться к $w_m=w_{п}=0,9w_3$.

Что практически может дать использование в качестве рабочей скорости $w_m=w_{п}$ иллюстрируется данными, приведенными в таблице 12.1.

Таблица 12.1

Влияние изменения скорости газа на габариты абсорбера и показатели процесса абсорбции CO_2 водой для насадки ГИАП-НЗ размером 50 мм при $Lop=100 м^3/м^2 \cdot час$

Скорость газа (пара)	Показатели процесса				Изменение показателей по сравнению с $w_m=w_{п}$.					Изменение D при неизменном количестве газа, %
	w_m , м/с	$\Delta P_{пм}$, мм H_2O	$\beta_{жв}$, 1/ч	$\Delta P_{п}$, м/ $\beta_{ж}$	w_m или производит. при D=const, %	ΔP , %	$\Delta P_{пм}$, %	$\beta_{жв}$, %	H, %	
$w_m=0,6w_3$	1,26	37,5	170	0,22	70	60,2	48,7	76,0	124	118,6
$w_m=0,8w_3$	1,68	69	208	0,332	93	96	89,6	93,0	107	102,6
$w_m=w_{п}=0,855w_3$	1,8	77	224	0,344	100	100	100	100	100	100
$w_m=0,9w_3$	1,9	100	245	0,408	106	117,8	130	109,4	90,6	97,3
$w_m=0,95w_3$	2,0	135	275	0,491	111	135	175,3	123	77	94,6

Как это видно, с приближением w_m к w_3 при $G=const$ сокращаются капзатраты (уменьшаются D и H), а при $D=const$ увеличивается производительность. При этом важно отметить, что если в интервале скоростей $w_m < w_{II}$ рост эффективности превалирует над увеличением ΔP , то при $w_m > w_{II}$ имеет место обратная картина. Это еще раз свидетельствует в пользу $w_m = w_{II}$. Однако всесторонне обоснованную величину рабочей скорости для конкретного процесса при использовании конкретной насадки можно установить только на основании расчета экономической эффективности (см. главу 11).

12.3. Использование колонн различного диаметра по высоте

Довольно часто в колонных насадочных аппаратах имеет место, обусловленное технологией процесса, заметное изменение количества газа и жидкости по высоте аппарата (отбор и подпитка газа или жидкости, значительные изменения температуры, переход больших количеств извлекаемого компонента из одной фазы в другую). Если при этом диаметр аппарата остается неизменным по всей его высоте, то указанные изменения величины потоков неминуемо приводят к увеличению или снижению (на соответствующих участках) скорости газа и плотности орошения. Поскольку D аппарата рассчитывается исходя из максимальных нагрузок по газу, то на участках аппарата, где количество газа уменьшается, будет иметь место снижение скорости по отношению к w_m , при котором обеспечивается максимальная эффективность массообмена. К снижению $\beta_{жсв}$ также приводит уменьшение Lop , на участках, где произошел отбор жидкости.

Из сказанного следует вывод, что для обеспечения максимальной эффективности массопереноса по всей высоте аппарата, его диаметр должен варьироваться по высоте с тем, чтобы на всех участках аппарата обеспечивалась $w = w_m = w_{II}$.

меньше, нужно размещать более мелкую насадку, обладающую бóльшей эффективностью.

Следует отметить, что указанные очевидные приемы уже используются в ряде производств и дают положительный результат. При создании новых производств не следует упускать благоприятные возможности использования в одном аппарате насадок разного размера.

12.4. Создание многослойных колонных насадочных аппаратов из коротких слоев, соответствующих участку гидродинамической и тепловой стабилизации в насадочном слое

Ранее в разделе 4.2.5 обсуждался круг вопросов, связанных с участком гидродинамической стабилизации в насадочном слое. На этом участке наблюдается не только повышенное гидродинамическое сопротивление, но и повышенная эффективность теплопереноса. Причем, протяженность участков тепловой стабилизации практически совпадает с участком гидродинамической стабилизации.

Учитывая аналогию между тепло- и массообменом, допустимо существование на участках гидродинамической стабилизации и более эффективного массопереноса. Отсюда и предполагаемая возможность организации массообменных колонн с короткими слоями насадки.

Однако при этом возникают вопросы, требующие ответа.

1. Если на участках гидродинамической стабилизации имеет место бóльшая интенсивность массопереноса, чем за его пределами, то это должно привести к сокращению высоты слоя насадки в аппарате. Из уравнения материального баланса:

$$M = M_{н.м.} \cdot H = M_{н.м.}^k \cdot H^k, \text{ т.е. } H = \frac{H \cdot M_{н.м.}}{M_{н.м.}^k}$$

Здесь: M – количество переносимого вещества в аппарате; $M_{п.м.}$ – количество вещества, переносимого в расчете на 1 п.м. высоты насадочного

слоя в аппарате с большей высотой засыпки; H – высота слоя насадки в этих условиях; $M_{п.м.}^k$ – количество переносимого вещества в расчете на 1 п.м. короткого слоя; H^k – совокупная высота слоев насадки в указанном случае.

Поскольку $M_{п.м.}^k > M_{п.м.}$, $H^k < H$. Существенным является на сколько $H^k < H$. Если речь идет о десятках процентов, то в создании таких аппаратов есть смысл.

2. Существенным также является вопрос как изменится потеря напора в аппарате – ΔP при переходе к коротким слоям, учитывая, что потеря напора в расчете на 1 п.м. – $\Delta P_{п.м.}^k$ в коротком слое выше, чем в слое за его пределами $\Delta P_{п.м.}^k$. Предельно допустимым может быть сохранение без изменения величины ΔP . Однако желательно, чтобы $\Delta P^k < \Delta P$. Здесь ΔP^k – совокупная потеря напора аппарата с короткими слоями. Такое может иметь место, если кратность увеличения $M_{п.м.}'$ в коротком слое будет превосходить кратность увеличения $\Delta P_{п.м.}^k$. Для предельно допустимого ΔP^k ($\Delta P^k = \Delta P$) можно записать: $\Delta P = \Delta P^k = \Delta P_{п.м.} \cdot H = \Delta P_{п.м.}^k \cdot H^k$, откуда $H^k = \frac{\Delta P_{п.м.} \cdot H}{\Delta P_{п.м.}^k}$.

3. Какова должна быть высота межслоевого пространства в короткослоевом насадочном аппарате? Следует полагать, что она должна быть существенно меньше, чем в обычных насадочных аппаратах. В короткослоевых аппаратах, надо думать, нет необходимости размещения перераспределительных устройств, поскольку в коротком слое жидкость не успеет оттесниться к периферии и на входе в нижележащий слой сохранит свое распределение, имеющее место на выходе из вышележащего слоя. Распределение газа, надо полагать, будет близким к его распределению на входе в самый нижний слой насадки высокослойного насадочного аппарата, что и обусловит гидродинамическую стабилизацию.

4. При организации короткослойных аппаратов следует иметь в виду еще одно обстоятельство. Нужно чтобы в этих аппаратах совокупное межслоевое пространство, равное $n-1$, где n – число коротких слоев, не

превышало совокупное межслоевое пространство в насадочных аппаратах обычной конструкции. Если они будут одинаковы, то суммарная высота аппарата, приходящаяся на насадочные слои и межнасадочные пространства – $H_{нс}$, сократится всего на величину $H-H^k$. Если совокупное межнасадочное пространство будет меньше, то $H_{нс}$ снизится в большей степени.

Для окончательного решения о целесообразности создания аппаратов с короткими слоями насадки необходимо осуществление определенного объема исследований по изучению эффективности массопереноса и гидравлического сопротивления на участках стабилизации, а также оценка оптимальной высоты разрыва между короткими слоями.

Необходима также конструкторская проработка, поскольку создание многополочного аппарата может вызвать конструктивные трудности. Это несмотря на то, что опорные решетки в таком аппарате должны быть существенно легче, т.к. будут нести значительно меньшие весовые нагрузки.

Обнадеживают полученные в МГУИЭ [52] экспериментальные данные, которые показали, что в коротких слоях из регулярной насадки в процессе охлаждения воды эффективность теплопереноса оказалась примерно на 34% выше по сравнению с промышленным аналогом [43].

12.5. Снижение отрицательного влияния масштабного фактора

Создание агрегатов большой единичной мощности обуславливает возрастание габаритов колонных насадочных аппаратов. Для некоторых технологических процессов диаметр колонн в настоящее время достигает 8÷10 м.

Чтобы обеспечить высокую эффективность промышленных насадочных аппаратов нужно обеспечить условия для сохранения в них эффективности, достигнутой на опытных установках. Существующий опыт показывает, что эффективность, установленная на моделях, размер которых,

как правило, не превышает $0,5 \div 0,8$ м, не достигается в промышленных аппаратах, диаметр которых намного больше [444]. Причиной этому является изменение гидродинамической обстановки в промышленных аппаратах по сравнению с опытными.

При создании промышленных насадочных аппаратов, прежде всего, должны быть сохранены исходные условия, в том числе нагрузки по газу и жидкости, аналогичное начальное распределение обоих потоков.

Для преодоления возникающего увеличения неоднородностей потоков газа и жидкости по сечению аппарата, усиления продольного перемешивания, ухудшающего массообмен, байпасов и других гидродинамических неоднородностей, следует использовать практические рекомендации, приведенные в разделе 4.2.6.

Выполнение указанных рекомендаций усложняется с увеличением диаметра колонн. Тем не менее, некоторые из них уже реализуются в промышленных аппаратах. Для их реализации в полном объеме требуется определенное усложнение конструкций колонны. Однако, полученный эффект от снижения необходимой высоты насадочного слоя, а значит, и всей колонны, а также связанного с этим снижения гидравлического сопротивления, т.е. энергозатрат, надо полагать, компенсирует с лихвой затраты на дополнительные элементы колонн.

Для того, чтобы точно оценить достигаемый эффект необходимы: проведение специальных исследований, инженерно-конструкторская проработка, а также испытания в промышленном масштабе.

Представляется, что эта проблема может найти свое решение в ближайшее время.

12.6. Организация различных направлений движения потоков

Из уравнения массопередачи (4.34) $M = K_v V_{cl} \Delta u_{cp}$ следует, что количество перенесенного вещества, определяется не только коэффициентом

массопередачи, но и движущей силой процесса – разностью между рабочей и равновесной концентрацией переносимого вещества (или наоборот). Из этого вытекает, что один из возможных путей интенсификации аппаратов с насадкой, например, для процессов абсорбции, связан с изысканием путей увеличения $\Delta u_{ср}$.

На рис. 12.3б и 12.3в показан характер изменения концентраций извлекаемого компонента по высоте насадочного слоя в абсорбере и десорбере с противоточным движением газа и жидкости по схеме рис. 12.3а.

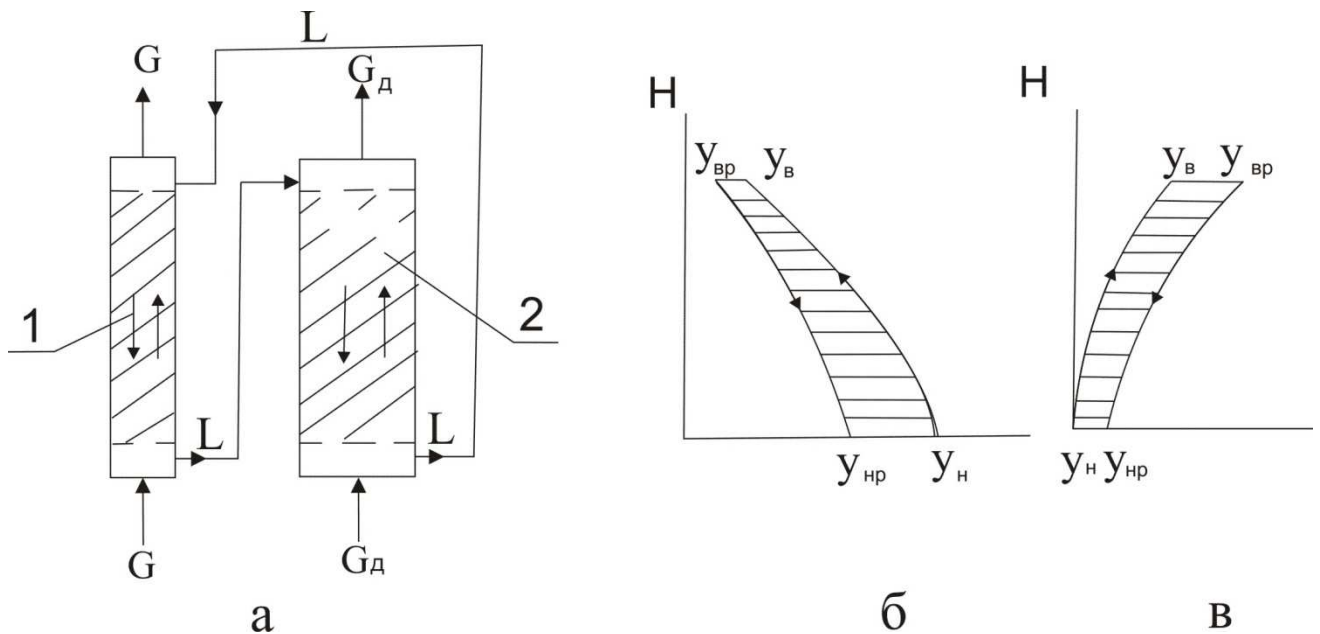


Рис. 12.3 Противоточное движение фаз в абсорбере и десорбере:
 а – схема с противоточным движением фаз: 1 – абсорбер, 2 – десорбер,
 G – газ на абсорбцию, G_d – газ на десорбцию, L – абсорбент;
 б – распределение концентраций по высоте абсорбера: y_n и y_v –
 концентрация извлекаемого компонента в газе на входе и выходе,
 u_n и $u_{вр}$ – равновесные концентрации на входе и выходе;
 в – то же в десорбере.

На рис. 12.4б показано изменение концентраций по высоте в абсорбере с дополнительным вводом свежего абсорбента по схеме, приведенной на рис. 12.4а.

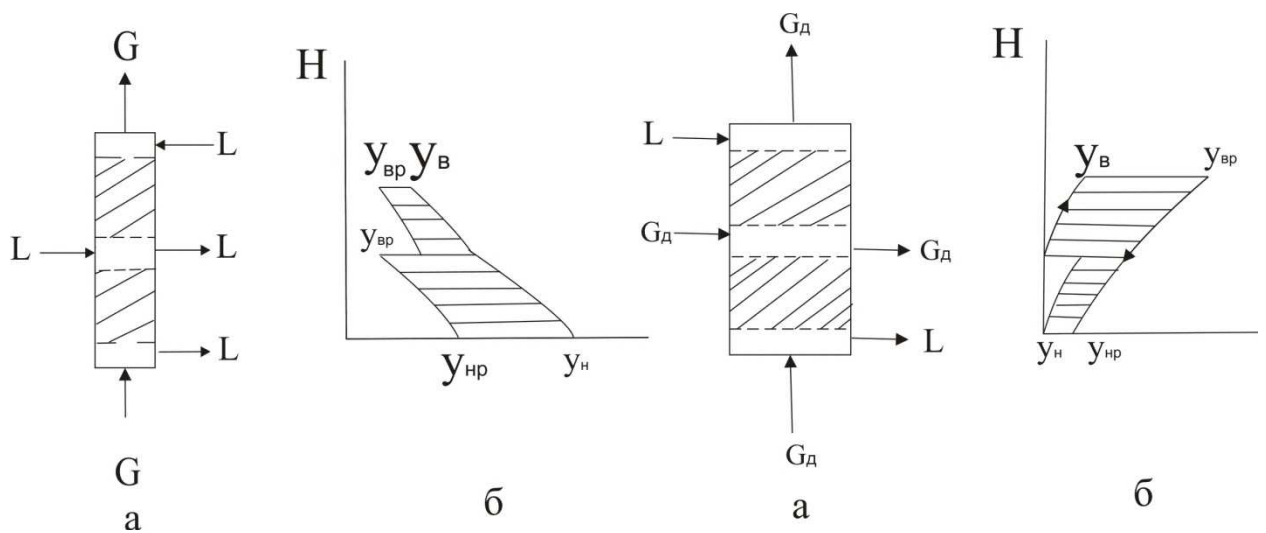


Рис. 12.4 Противоточный абсорбер с подпиткой свежим абсорбентом:
 а – схема движения потоков;
 б – распределение концентраций по высоте абсорбера.

Рис. 12.5 Противоточный десорбер с подпиткой свежим десорбирующим газом:
 а – схема движения потоков;
 б – распределение концентраций по высоте абсорбера.

На рис. 12.5б показано изменение концентраций в десорбере при дополнительном вводе в него свежего газа по схеме 12.5а.

Как это видно (рис. 12.4б) в верхней части абсорбера движущая сила остается практически неизменной по сравнению с рис. 12.3б. В нижней части абсорбера (ниже точки ввода дополнительного абсорбента) Δy значительно увеличивается, соответственно снижая высоту этой части аппарата и всего абсорбера в целом.

Дополнительный ввод свежего десорбирующего газа в десорбер может соответственно увеличить движущую силу в верхней его части (рис. 12.5б) и сократить высоту всего аппарата. Однако экономическая целесообразность таких схем, в которых увеличиваются потоки абсорбента или десорбирующего газа, проблематична, хотя не исключено, что в некоторых частных случаях они могут быть приемлемыми.

Возможен целый ряд вариантов схем с сохранением G и $L = const.$, но со ступенчатым вводом одного или другого потока. Оценка экономической целесообразности от организации ступенчатых вводов газа и жидкости

должна осуществляться для каждого конкретного случая. При этом должна быть определена оптимальная высота слоя насадки в точках дополнительных вводов, концентрации извлекаемого компонента в точках вводов и т.д. Для достижения максимально возможных экономических показателей в руках проектировщиков в данном случае имеются широкие возможности для маневрирования.

Еще большего снижения габаритов аппаратов можно ожидать при прямоточном движении фаз. В таких аппаратах, работающих с большими скоростями газа (до 10 м/с), не достижимыми при противотоке из-за захлебывания, интенсифицируется процесс переноса, уменьшаются габариты аппаратов, гидравлическое сопротивление значительно ниже, чем при противотоке [23,108,370]. Применение насадочных аппаратов с прямотоком целесообразно в тех случаях, когда направление движения фаз не влияет заметно на движущую силу [392].

Рассмотрим одну из возможных схем организации прямотока в насадочных аппаратах (рис. 12.6).

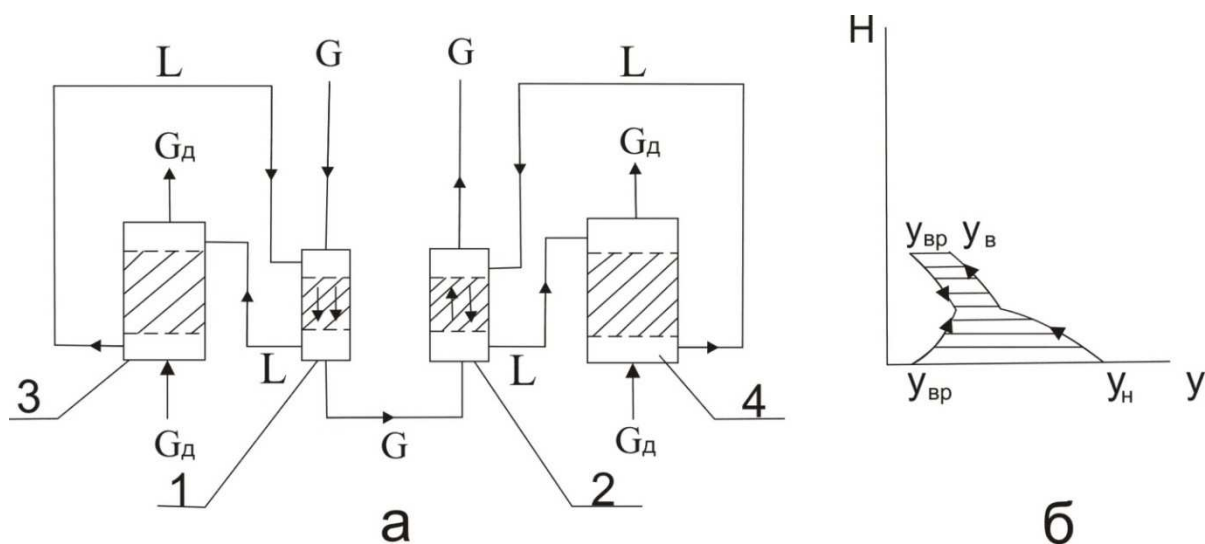


Рис. 12.6. Прямоточно-противоточный абсорбер с подпиткой свежим абсорбентом: а – схема абсорбционно-десорбционной установки: 1 – нижняя часть абсорбера, работающая при прямотоке; 2 – верхняя часть абсорбера, работающая при противотоке; 3 – десорбер, обслуживающий нижнюю часть абсорбера; 4 – десорбер, обслуживающий верхнюю часть абсорбера.

Соотношение потоков: $G_d' + G_d'' = G_d$, $L' = L'' = L$ б – распределение концентраций по высоте абсорбера.

Здесь в верхней части абсорбера осуществляется противоток, а в нижней параллельный ток газовой и жидкой фазы при одновременной подаче в нижнюю часть аппарата свежего абсорбента. Однако организация этих двух режимов движения в одном корпусе затруднительна. Поэтому абсорбер, также впрочем, как десорбер, видимо, следует разбить на два аппарата (рис. 12.6а). Высота слоя насадки и распределение концентраций в верхней части абсорбера, где осуществляется противоток, приблизительно сохраняется аналогичным тому, как показано на рис. 12.3а и 12.3б. Однако высота насадки в прямоточной части абсорбера снижается по сравнению с высотой насадки в той же части абсорбера при работе по схемам рис. 12.3а и 12.4а из-за возросшей движущей силы (сравним Δu на рис. 12.3б, 12.4б и 12.6б). Кроме того, этому будет способствовать и значительное увеличение в нижней части аппарата значения K_v , при котором обеспечивается более длительный контакт каждого элементарного объема жидкости и газа. В результате суммарная высота насадки в 2-х абсорберах (рис. 12.6а) будет существенно меньше высоты в абсорбере по схеме рис. 12.3а. Кроме того, в той части абсорбера, где осуществляется противоток, существенно уменьшится и диаметр аппарата.

При работе по этой схеме количество газа, подаваемого в каждый из десорберов, будет меньше, чем поступает в десорбер по схеме рис. 12.3а ($G_{д'} + G_{д''} = G_{д}$), т.к. в обоих вместе взятых десорберах будет десорбироваться столько же газа, как в одном по вышеупомянутой схеме. По этой причине при сохранении в десорберах той же скорости газа, т.е. при снижении их диаметра, возрастает L_{op} , а следовательно, и K_v , что должно привести к сокращению совокупной высоты насадки в двух десорберах по схеме рис. 12.6а по сравнению с высотой насадки в десорбере по схеме рис. 12.3а. Указанное снижение совокупной высоты насадки во всех аппаратах приведет к снижению в них ΔP , которое в определенной мере сможет скомпенсировать дополнительные энергозатраты на перемещение потоков абсорбента.

Еще раз подчеркиваем – для достижения оптимальных экономических показателей имеются большие возможности для маневрирования: величинами, количеством и расположением дополнительных вводов, как газа, так и жидкости, направлениями движения потоков в аппаратах, а также технологическими схемами.

12.7. Работа в режиме инверсии фаз

В соответствии с рядом исследований [264,265,356,357] режим инверсии фаз или эмульгирования соответствует максимально возможной эффективности насадочной колонны. Причиной этому является бóльшая поверхность соприкосновения фаз, которая в этом режиме определяется в основном условиями барботажа. Роль насадки в режиме инверсии фаз сводится к раздроблению газовых вихрей на большое число более мелких, которые пронизывают жидкость. Она также способствует их распределению по всему сечению колонны, увеличению длины их пути. Одновременно насадка способствует завихрению самой жидкости. В этом случае, как уже указывалось выше, практически вся колонна по высоте будет заполнена завихренной жидкостью, которая пронизывается газовыми вихрями. Все это в совокупности приводит к увеличению массопередачи.

Наиболее выгодным в отношении интенсификации процесса массопередачи является режим инверсии фаз на участке близком к точке D [260] см. рис. 12.7.

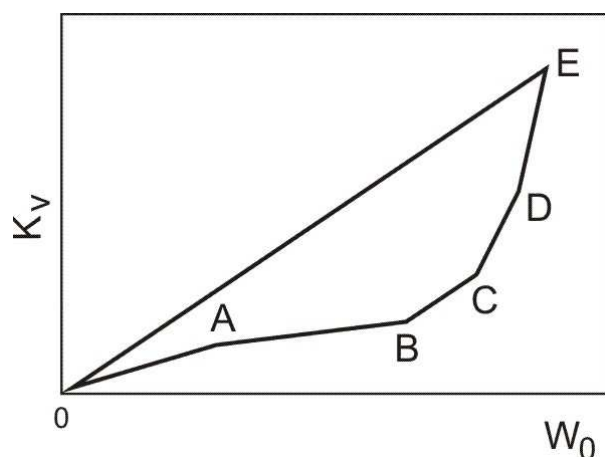


Рис. 12.7 Зависимость эффективности массопередачи от скорости газа в насадочных колоннах: OA – предшествующий формированию пленки режим; AB – пленочный режим; BC – переходный режим; CD – режим подвисяния; DE – режим захлебывания; D – начало инверсии фаз; E – начало выброса жидкости из колонны.

Однако режим эмульгирования можно осуществить и при любой скорости газа ниже точки инверсии фаз. Для этого колонна должна быть заполнена жидкостью, а ее отвод осуществляться через U-образную трубу-затвор (рис. 12.8).

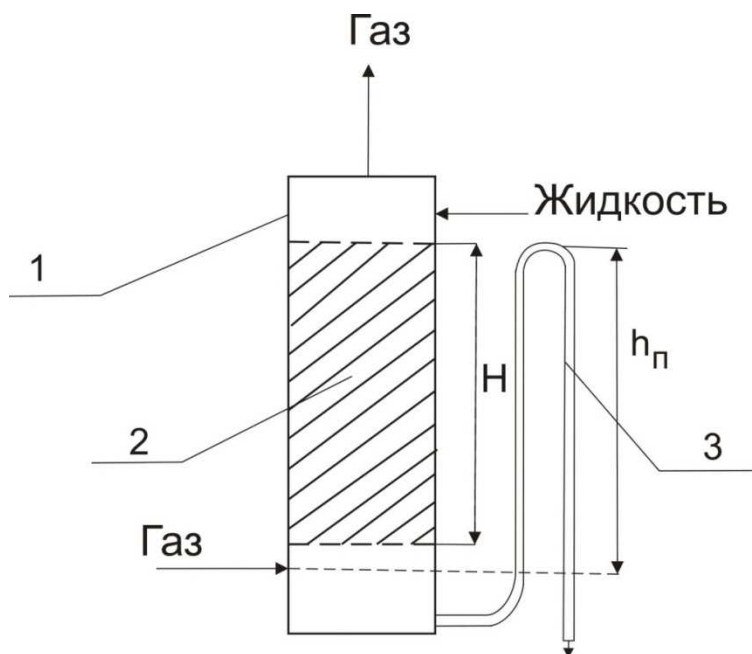


Рис. 12.8. Схема устройства эмульгационной насадочной колонны: 1 – колонна; 2 – насадка; 3 – переточная трубка.

В такой эмульгационной колонке почти при любой скорости газа скорость массопередачи всегда выше, чем в насадочной колонне незаполненной жидкостью (линия ОЕ на рис. 12.7). Из сказанного следует, что режим эмульгирования является наиболее выгодным по производительности насадочных колонн и позволяет значительно интенсифицировать их работу не только при осуществлении процессов абсорбции, но также и ректификации и экстракции.

Несмотря на то, что результаты исследования эффективности насадочных колонн в режиме эмульгирования известны достаточно давно, практическое их использование до настоящего времени остается весьма ограниченным. Применяются в небольшом количестве лишь абсорберы с искусственно затопленной насадкой. Объясняется это тем, что работа производственных аппаратов в режиме захлебывания неустойчива. Даже при небольшом изменении расхода газа происходит переход либо к режиму подвисания (при понижении скорости), либо к режиму уноса (при повышении w_0). И то и другое ведет к снижению эффективности и одновременно сопровождается значительными колебаниями ΔP .

Как для аппаратов с искусственно затопленной насадкой, так и для работающих в режиме захлебывания, характерно также повышенное гидравлическое сопротивление и увеличенные гидростатические нагрузки, требующие усиления конструкции насадочных аппаратов.

Однако вопреки сказанному все же следует рассматривать возможность работы насадочных аппаратов в режиме эмульгирования. Как уже говорилось выше, современный уровень автоматизации, как нам думается, позволяет преодолеть трудности, связанные с колебанием расходов газа. Что касается увеличения ΔP в расчете на 1 п. м высоты слоя насадки в затопленном режиме, то из-за увеличения эффективности снизится H и в каждом конкретном случае нужно оценивать, что более выгодно. Это же касается стоимости колонны, поскольку дополнительные затраты на усиление ее

конструкции, компенсируются, в определенной мере, сокращением ее высоты и уменьшением требуемого количества насадки.

Таким образом, экономическая целесообразность работы в режиме эмульгирования должна быть оценена для каждого конкретного случая, и перспективностью этого инструмента повышения эффективности работы насадочных колонн не следует пренебрегать.

12.8. Комбинирование различных контактных устройств

12.8.1. Комбинирование тарельчатого и насадочного контактного устройства

Прежде всего, попытаемся рассмотреть, что может дать комбинация тарелки и насадки для улучшения работы каждого из этих двух контактных устройств в отдельности. Начнем с тарелки.

В разделе 12.7 рассматривалась гидродинамическая обстановка в барботажном слое в присутствии насадки, ее положительное воздействие на эффективность массопереноса. Поскольку на тарелках любой конструкции контакт фаз осуществляется в барботажном слое, то нет сомнения в том, что размещение насадки на тарелке в пределах ее барботажного слоя должно повысить эффективность.

Недостатком тарелок является более низкая пропускная способность, в первую очередь по газу (пару), по сравнению с насадкой. Это обуславливается вынужденным ограничением скорости газа в межтарельчатом пространстве во избежание уноса жидкости на вышеупомянутую тарелку, что может привести при определенных величинах уноса к значительному снижению эффективности [187,447]. Размещение в межтарельчатом пространстве насадки, выполняющей функции сепарирующего устройства, приводит к снижению уноса и возрастанию эффективности тарелки. Это наблюдалось в работах [187,213,242,419,449].

С другой стороны, размещение насадки в межтарельчатом пространстве может одновременно способствовать повышению эффективности массопереноса, активизируя его во второй (дополнительной) зоне контакта фаз, и увеличению, таким образом, КПД тарелки. Особенно ощутимого эффекта от присутствия насадки в межтарельчатом пространстве следует ожидать для провальных тарелок. При этом следует иметь в виду, что присутствие насадки на тарелке лишь незначительно увеличивает ее ΔP . Возможные варианты размещения насадки на тарелках см. на рис. 12.9.

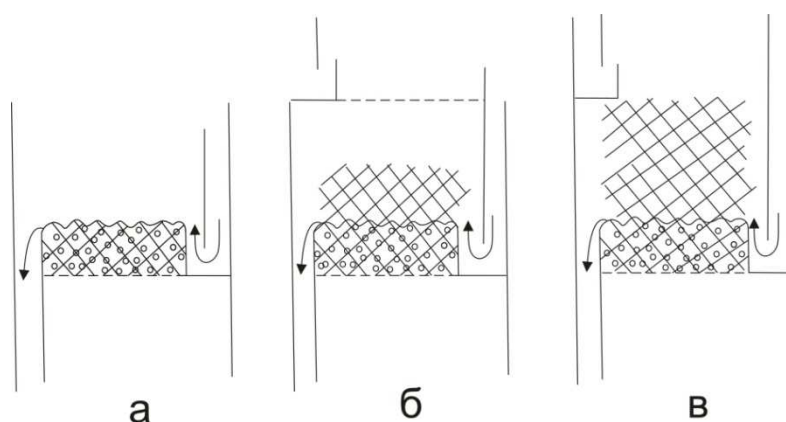


Рис. 12.9 Варианты размещения насадки на тарелках:
 а – заполнение барботажного слоя (БС);
 б – заполнение БС и частичное заполнение межтарельчатого пространства; в – заполнение БС и полное заполнение межтарельчатого пространства.

Что дает для насадки ее объединение с тарелкой? Часть насадки, размещенная в барботажном слое, работает в условиях, когда обеспечивается максимально возможная для насадок эффективность. В межтарельчатом пространстве она работает не столь эффективно. Лишь для провальных тарелок в ней будет иметь место режим близкий к пленочному. В тоже время при комбинации с тарелкой в насадке можно ожидать более организованного, присущего тарелкам, движения потоков, что позволяет в определенной мере избежать, характерной для насадок неравномерности распределения потоков и других факторов, снижающих ее эффективность. В

случае использования комбинации насадки с секционированной тарелкой можно ожидать и значительного снижения отрицательного воздействия масштабного фактора.

Таким образом, можно утверждать, что от комбинирования тарелки с насадкой выигрывает каждое из массообменных устройств в отдельности и, разумеется, комбинация в целом.

Но насколько выгодна такая комбинация для реализации ее в промышленных колоннах? Увеличатся ли капвложения на изготовление тарельчатой колонны? Или стоимость, подлежащей сокращению части колонны, обусловленной увеличением эффективности, будет превалировать над стоимостью загружаемой насадки? Это можно будет оценить только после проведения соответствующих проектно-конструкторских проработок. Им должны предшествовать исследования, которые установят: тарелку какой конструкции, какую насадку и какого размера наиболее целесообразно использовать для комбинации контактных устройств, каков межтарельчатый унос и другие показатели, а, главное, какова эффективность и каково влияние на нее масштабного фактора.

Представляется, что комбинация высокоэффективной насадки (возможно и регулярной) с высокоэффективной секционированной тарелкой типа «безградиентной» [350] может оказаться перспективной. В [314] предлагается комбинация регулярной насадки из ПВХ с провальной тарелкой. Возникающую возможность сокращения высоты массообменной колонны для осуществления процессов ректификации или абсорбции не следует оставлять без внимания.

12.8.2. Комбинирование насадочных контактных устройств

Возможные определенные перспективы увеличения эффективности насадочных контактных устройств могут возникнуть от комбинации насадок различной конструкции и различного размера. Так, например, увеличение

эффективности можно ожидать, если размещенная в верхней части насадочного слоя насадка будет способствовать лучшему распределению поступающей жидкости или в результате разумной комбинации насадок удастся снизить негативно влияющее продольное перемешивание. Предметом изучения в данном случае может быть выявление наилучшим образом взаимодействующих насадок, поиск оптимального взаимного расположения насадок, а также соотношения высот слоев из насадок различной конструкции.

Все сказанное выше в равной степени относится, как к нерегулярным, так и регулярным насадкам.

12.9. Использование движущихся насадок

Характер противоточного движения двухфазного потока в колоннах с насадкой в наиболее часто употребляемом на практике режиме близком к подвисанию показывает, что одним из факторов, снижающих эффективность массопередачи, является недостаточно высокая степень турбулизации стекающей по насадке пленки жидкости, возможное скопление достаточно больших количеств жидкости в застойных зонах (удерживающая способность насадки) без хорошего перемешивания с основным потоком жидкости и контакта с газом. Особенно сильно это снижает эффективность массопереноса в процессах абсорбции, где лимитирует перенос в жидкой фазе.

Частичное устранение этих узких мест в процессе массопереноса представляется возможным при использовании движущейся сплошным слоем насадки.

Движение насадки, параллельно-точное по отношению к жидкости, при большей скорости движения по ней жидкости и противоточное им обоим движение газа, как нам кажется, должно способствовать разрушению застойных зон жидкости, сведение к минимуму количества удерживаемой жидкости, утонению пленки жидкости на поверхности насадки, лучшему

перемешиванию и дополнительной турбулизации и жидкости и газа. В результате это должно привести к повышению эффективности массообноса и сокращению высоты насадки и аппарата в целом, при практически незначительном увеличении ΔP в расчете на 1 п. м насадки.

Однако следует отдавать себе отчет в том, что осуществление движения насадки в массообменной колонне потребует значительных усложнений ее конструкции. Оно практически не осуществимо в колоннах, работающих под давлением, т.е. в абсорберах. В работающих без повышенного давления десорберах – аппаратах наиболее крупных габаритов, осуществление движения насадки наиболее вероятно и дало бы бóльший эффект. Возможная схема такого аппарата представлена на рис. 12.10.

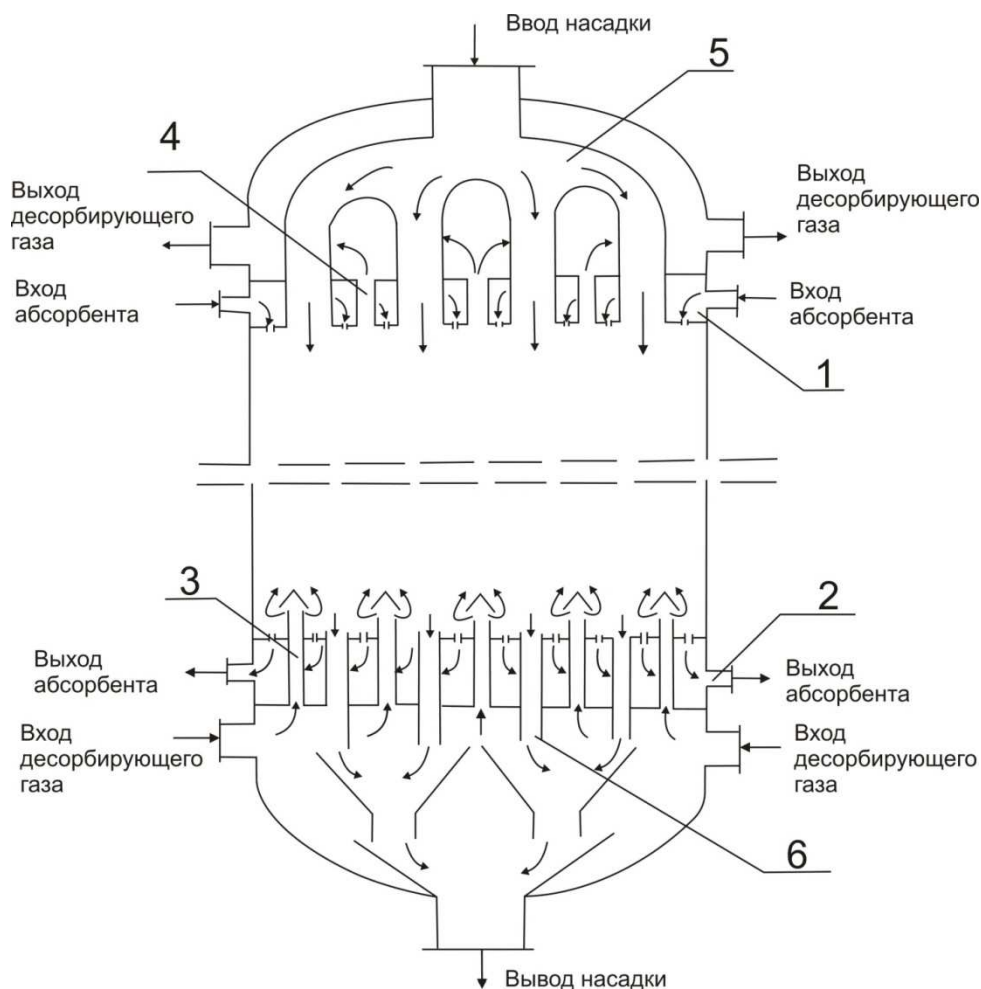


Рис. 12.10 Вариант схемы десорбера с движущейся насадкой:
 1 – устройство для ввода в слой абсорбента; 2 – устройство для вывода абсорбента из слоя; 3 – устройство для ввода десорбирующего газа; 4 – устройство для вывода десорбирующего газа; 5 – устройство для распределения насадки; 6 – то же для вывода насадки.

Как это видно, такой аппарат конструктивно достаточно сложен, поскольку в нем существует необходимость не только в устройствах для равномерного распределения газа и жидкости в поперечном сечении колонны, но также в верхнем и нижнем устройстве для выравнивания насадки. Также необходимы: подъемное устройство, обеспечивающее возврат насадки в колонну и ряд других. Возникают проблемы, связанные с эрозией корпуса аппарата и самой насадки. Возможно, для данной технологии необходима разработка специальных насадок, в которых будет исключено сцепление элементов и обеспечена пониженная эрозионная способность. Хотя при решении этих проблем может быть использован положительный опыт разработки и эксплуатации аппаратов с движущимся слоем катализаторов и адсорбентов [179,314], тем не менее, эту задачу следует признать достаточно сложной. Началу работ по созданию такого рода аппаратов должны предшествовать исследования, позволяющие оценить увеличение эффективности массопередачи при использовании движущейся насадки, влияние на эффективность различных факторов, в том числе скорости перемещения насадки в колонне и т.д.

12.10. Некоторые другие способы интенсификации процессов массопереноса

Одним из таких способов, возможность осуществления которого реальна на существующем колонном оборудовании для процессов массообмена, является организация продольной пульсации давления в газовом потоке. При этом в потоке возникают чередующиеся замедления и ускорения. Явления, происходящие при замедлении потока, аналогичны наблюдающимся в расширяющемся диффузоре, где происходит отрыв пограничного слоя от стенки канала и образование вихрей в зоне отрыва. В этих условиях следует ожидать уменьшения термического сопротивления и сопротивления массообмену в пограничном слое, т.е. интенсификацию

процессов тепло-массопереноса. В следующей фазе при ускорении потока происходит формирование пограничного слоя, которое однако не успевает закончиться к моменту начала повторного замедления потока, если частота пульсаций достаточно велика. На этой стадии, благодаря тому, что толщина пограничного слоя еще относительно невелика, также можно ожидать более интенсивного тепло-массопереноса через погранслои.

Продольная пульсация газа при противоточном двухфазном движении потоков в аппарате с насадкой должна привести к снижению сопротивления массопереносу погранслоя газа на границе газ-жидкость, что особенно существенно для процессов, где лимитирует сопротивление в газовой фазе. Одновременно она должна способствовать дополнительной турбулизации жидкости, стекающей навстречу газу по насадке. Таким образом, физические явления, сопровождающие пульсацию давления, должны способствовать интенсификации массопереноса.

Исследования влияния пульсации на эффективность переноса в основном проводились применительно к процессу теплопередачи. Так в [276] для случая турбулентного пограничного слоя потока газа было установлено увеличение коэффициентов теплоотдачи газа – α , достигающее до 50%. В [109] при нагреве воды в трубе достигали увеличения α на 60-80%. В [25] установили, что при умеренных значениях чисел $Re=5000$ α увеличивается на 130%, а при $Re=20000$ всего на 30%.

Учитывая аналогию между процессами тепло- и массообмена, следует ожидать, что воздействие пульсации приведет также к повышению эффективности массопереноса, в том числе, и в аппаратах с насадкой. Однако пульсация давления потока неминуемо приводит к повышению гидравлического сопротивления. В [63] изучалась взаимосвязь роста эффективности теплопередачи и ΔP . Авторы говорят о целесообразности использования метода пульсации давления для интенсификации теплообмена в тех случаях, когда требования компактности аппарата возобладают над

энергозатратами. Следует также иметь в виду, что требуется некоторый дополнительный расход энергии на возбуждение пульсации.

Тем не менее, представляется, что ожидаемая возможная значительная интенсификация массопереноса в аппаратах с насадкой, особенно учитывая исключительно крупные размеры абсорбционно-десорбционных аппаратов в некоторых производствах, делает необходимым проведение капитальных исследований по использованию пульсации давления в массообменных аппаратах с насадкой.

Можно ожидать, что определенное воздействие на эффективность массопереноса, в том числе в насадочных аппаратах, может оказать вибрация. Она может привести к снижению количества удерживаемой жидкости, снижению толщины газового и жидкостного пограничного слоя. Вибрация, как и пульсация, должна способствовать усилению поперечного перемешивания, снижению неравномерности распределения потоков в поперечном сечении насадочных аппаратов, что должно привести в конечном итоге к уменьшению отрицательного воздействия масштабного фактора в насадочных аппаратах. Однако организация вибрации в крупногабаритных аппаратах представляется достаточно трудной задачей.

Другим возможным методом интенсификации массопереноса могут являться ультразвуковые колебания. Как и в случае воздействия пульсации, влияние ультразвуковых колебаний в основном исследовалась применительно к интенсификации теплоотдачи. Так в [420] при нагреве жидкости в трубе установлено увеличение α на 30% при одностороннем воздействии и на 80% при двухстороннем воздействии ультразвуковых колебаний. При этом на степень увеличения α влияют расход и физические свойства жидкости, геометрия и материал канала, а также частота и интенсивность колебаний. Аналогичные результаты получены в [89]. Результаты воздействия пульсации звука сверхзвуковой частоты на теплопередачу в условиях свободной и вынужденной конвекции проанализированы в [57].

Учитывая упомянутую аналогию между процессами тепло- и массопереноса, следует ожидать положительного воздействия ультразвуковых колебаний и на процессы массопередачи в насадочных колонных аппаратах. Существенно, что организация воздействия ультразвука в аппаратах, осуществляющих процессы химической технологии, представляется технически возможной. Принципы такого рода оборудования рассмотрены в [116].

Следует полагать, что положительное воздействие на массоперенос не ограничится в перспективе указанными выше способами. Нет сомнения в том, что по мере развития прикладных исследований, будут найдены пути интенсификации направленного движения молекул извлекаемого компонента, как в жидкой, так и в газовой фазе, а также на границе их раздела с помощью уже достаточно хорошо исследованных на сегодняшний день физических явлений таких как, например, электромагнитные поля и др. По мере развития фундаментальных исследований и углубления знаний о существующих физических явлениях, а также, возможно, и открытия новых физических явлений, горизонты возможностей интенсификации процессов массопереноса будут расширяться и человечество, как в этой области, так и в других областях техники, будет неуклонно двигаться в сторону минимизации оборудования и снижения энергозатрат.

Литература

1. 1998 Saint-Gobain NorPro Corporation 03/01 PTP-2.
2. Andersson A.S., Lindgren P. NORDISK ENERGI, 2004, № 5, s. 67.
3. Bain W., Hougen O.A. Trans. Am. Inst. Chem. Eng., 1944, Vol. 40, № 1, p.2.
4. Benenati R.F., Brosilow C.B.A. Void Fraction. Variation in Beds of Spheres // American Institute of Chemical Engineers Journal , 1962, Vol. 8, № 3, p.p.359-361.
5. Billet R., Packed Column Analysis and Design, Ruhr-universitat Bochum, 1989.
6. Billet R., Mackowiak J. World Congr. 3 Chem. Eng. Tokyo, Sept. 1986, p. 21.
7. Billet R., Schultes M. INZYNIERIA CHEMICZNA I PROCESOWA, 1990, T.1, s. 17.
8. Brauer H. Chem. Eng. Techn., 1960, Bd.32, № 11, p.719.
9. Bravo J.L., Rocha J.A. Hydrocarbon Processing, 1985, 64, № 1, p. 91.
10. Bucklin J.M., Laphorn J.C., Ginoux J.J. Hot spots in active packed beds. // Verfahrenstechnik, 1977, 11, Jahrgang (10), p. 620-624.
11. Bucklin J.M., Reithmuller M., Ginoux J.J. A Fluorescence Method for the Measurement of the Local Voidage in Random Packed Beds // Chem. Eng. Sci, 1977, Vol. 32, № 9. p. 1116-1119.
12. Bundy R.D. Velocity and Mass Diffusion Measurements for Beds of Large Uniform Diameter Spheres Randomly Packed in a Full Scale Model of a Pebble Bed Nuclear Reactor Core. Oak Ridge National Laboratory, Report, NORNL-TM-1075, 1966, p.307.
13. Cairns E.J., Prausnitz J.M. Velocity Profiles in packed and Fluidised Beds // Ind.Eng.Chem. (Sydney), 1959, Vol. 51, № 12, p.1441-1444.

14. Calderbank P.H., Pogorski L.A. Heat Transfer in Packed Beds. // *Transaction Inst. Chem. Ing.*, Vol. 35, № 1, 35(1), p.195-207.
15. Carman P.C. Fluid Flow Through Granular Beds.// *Transactions Institution of Chemical Engineers*, 1938, № 16, p.p. 168.
16. Carman P.C. Fluid flow through granular beds.// *Transactions Institution of Chemical Engineers*, 1937, № 15, p.p. 150-166.
17. Ceramic Tower Packing (каталог фирмы «Norton»), 1988.
18. Chu Y.C., Storrow J.A. *Chem. Eng. Sci.*, № 1, 230(1952).
19. Collins M. Velocity Distributions in Packed Beds: Thesis (B.Ch.E.). *University of Delaware*, 1968, 120 p.
20. Corps de remplissage Germania (насадки) (каталог фирмы «Germania»), 1991.
21. Davies J.T., Warner K.V. The effect of large-scale roughnes in promoting gas absorption // *Chem. Eng. Sci.* 1969, Vol.24, № 2, P.231-238.
22. Dauckwerst P.V., Gileham A.J. *Trans. Inst. Chem. Eng.*, 1966, Vol. 44, № 2, p.T42.
23. Dodds W.S., Stutzman L.F. at all. *AIChE Journal*, 1960, Vol. 6, № 2, p. 19.
24. Dolan M.I., Strigle R.F. *Chem. Eng. Progr.*, 1980, Vol. 76, № 11, p.78.
25. Doraiswamy L.K., Patel N.B. *Journ. Sci. and Industr. Res.*, 1959, A. 18, № 11, p. 522.
26. Dorweiler V.P., Fahien R.W. Mass Transfer at Low Flow Rates in a Packed Column // *Amer. Inst. Chem. Eng. Journal*, 1959, Vol. 5, № 2, p.139-144.
27. Drahos J., Cermak J. etc. Statistical analysis of local gas velocities at the exit from a packed bed // *Chem. Eng. Journal*, 1982, 24(1), pp.71-80.
28. Eckert I.S. at all. *Chem. Eng. Progr.*, 1958, Vol.45, № 1, p.70.
29. Eduljee H.E. *Brit. Chem. Eng.*, 1960, Vol.5, № 5, p.330.
30. Ergun S. Fluid low through packed columns. // *Chemical Engineering Progress* , 1952, Vol. 48, № 2, p.p. 89-94.

31. Flexi ring from KOCH (каталог фирмы Koch. Eng., 1986).
32. Flexigrid structured packing (каталог фирмы «Koch Eng.», N KEG-2).
33. Fullkörper – Technologie, packing Technology, Technologie de garnissage (каталог фирмы VEF), 1994.
34. Fullkörper für die Cbwasserreinigung (каталог фирмы «Munters Incontive Group», 1989).
35. Fullkörper für Kdonnew (каталог фирмы Raschig GmbH).
36. Fullkörper für Kolonnen (каталог фирмы «Raunschert GmbH»).
37. Furnas C.C. US Bureau of Mines, 1929, Bull., p.307.
38. Ganzinov I. Modeling of packed bed scrubber. TUT, 2005, Tampere. Finland. Diplomityö TTKK.
39. Gelperin I., Kagan A. III Internat. Heat. Transfer Conference Chicago, USA, 1966, Report № 147, p.38.
40. Gupte R.A. Die Struktur von Packungen aus Kugeln: Zufallskriterien und Testmethoden im Hinblick auf die Porensiromunoj. // Chemie - Ingenieur - Technik, 1971, 43, Jabrgang № 13, A.897-A.900.
41. Hessel D., Schmidt H. Beitrag zur Bestimmung der Yerteilung des Lückenvolumens.// Chemische Technik, 1967, 19 Jabrgang, Heft 7, s. 411-413.
42. Hikita H., Kataoka T., Nakanish K., Kagaku Kogaku, 1960, Vol. 24, № 1, p. 2.
43. <http://www.chladici veze praha> a.s. Copyright 2007-2013.
44. <http://www.zchua-chem.com/packing/>.
45. In use around the world tower packing and internal by RASCHIG (каталог фирмы «Rachig GmbH»), 1990.
46. Information Chemic, 1978, №180, p.141.
47. Intalox High-Performance wire Gauze packing (каталог фирмы «Norton», 1988).
48. Intalox High-Performance Structured Packing (инф.фирмы Norton, 1987).

49. Intalox High-Performance Snowflake packing, (каталог фирмы «Norton»).
50. Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology (4th Edition, vol. 8, p. 172.
51. Kirschbaum E. Destillier and Rektifizier technik, III Aufl., Berlin, 1960
52. Kling G. Chem. Eng. Techn., 1959, 31, № 11, p. 705.
53. Koch Engineering Co Inc FleximaxTM, Product Bulletin KFM-1.
54. KOCH-GLITSCH. Публикация KGMRP-1 2M0303B, Copyright 2003 Koch-Glitsch, LP.
55. Koziol K., Broniarz L. Badanie procesow przenoczenia w aparatach warstewkowych. 11. Wplyw systematycznego bowkowania powierzchnina wartose wspolozynnika wnikania masy w splywajacym grawitacyjnie filmie cieczy // Inzynieria chemiczna, 1978, 8 , № 2, P.319-333.
56. Lamourelle A.P., Sandal O.C. Gas absorption into a turbulent liquid // Chem. Eng. Sci, 1972, V.27, №5, P.1035-1043.
57. Lemlich R., Chem. Engng., 1961, Vol. 68, № 10, p. 171 and 176.
58. Lerou J.J., Froment G.F. Velocity, Temperature and Conversion Profiles in Fixed Bed Catalytic Reactors // Chem. Eng. Sci, 1977, Vol. 32, № 8, pp.853-861.
59. Leva M. Correlations in Fixed Bed Systems. // Chemical Engineering , 1957, Vol. 64, N 9, p.p.245-248.
60. Leva M. Tower Packing and Packed Tower Desigion., 2nd Edition, Akron, Ohio, US, Stoneware Co., 1953.
61. Leva M., Packed-Tube Heat Transfer // Ind. Eng. Chem., 1950, Vol. 42, № 12, pp.2498-2501.
62. Leva M., Weintraub M., Ind. Eng., 40, 1948, № 4, 747.
63. Linke W., Hufschmidt W. Chem. Ingr. Technik, 1958, Vol. 30, № 3, p. 19.
64. Lobo W.E. e.a. Trans.Am.Inst.Chem. Eng., 1945, Vol. 41, № 1, p. 693.

65. Lyczkowski R.W. Modeling of Flow Nonuniformities in Fissured Porous Media // The Canadian Journ. of Chem. Eng., Vol. 60, № 1, p. 61-75.
66. Mehmetcik B. DISA Information, 1976, № ,p.26.
67. Meir W. Sulzer Columns for Rectification and Absorption.
68. Mersmann A., Deixler A. Germ. Chem. Eng. 1986, 9, № 5, 265.
69. Morales M., Spinn C.W., Smith T.M. Velocities and Effective Thermal Conductivities in Packed Beds // Ind. Eng. Chem., 1951, Vol. 43, № 1, p.225-232.
70. Moscicka I., Badowska I., Morawska B. Rozklad predkosci w rurze z wypelnieniem riarnistym // Inzynieria chemiczna, 1976, 6(1), 187-201.
71. Moscicka I., Badowska I., Morawska B.II. Wlyw srednicy ziarna na profil predkosci w rurze z wypelnieniem // Inzynieria chemiczna, 1976, 6(2), 389-400.
72. Newell R., Standish N. Velocity Distribution in Rectangular Packed Beds and Non Ferrous Blast Furnaces // Metallurgical Transaction, 1973, Vol. 4, August, p.18511857.
73. Norton Chemical Process Products, Проспект фирмы.
74. Nutter Ring Random Packing (каталог фирмы Nutter Eng.).
75. Perry John Chemical Engineering Handbook, First Edition, NY & London, 1934.
76. Pillai K.K. Voidage variation at the wall of a packed bed of spheres.// Chemical Engineering Science, 1977, Vol. 32, № 1, p.p. 59-61.
77. Plastic Flexirings (каталог фирмы Koch.Eng.) 1986.
78. Plastic Tower Packing (каталог фирмы Norton).
79. Pratt H.R.C. Trans. Inst. Chem. Eng., 1951, Vol. 29, № 2, p.195.
80. Price J., The Distribution of Fluid Velocities for Randomly Packed Beds of Spheres // Mechan. Chem. Eng. Trans., The Inst. of Eng., Australia, Sidney, 1968, V. МСЧ, № 1, p.7-14.
81. Rablee L.H.S., Baird B.M., Thierney J.W. Am.Inst. et Chem. Eng. Journal, 1958, Vol. 4, № 4, p.460.

82. Ralu-Pak (каталог фирмы Raschig GmbH, 1988).
83. Raudom Packing (каталог фирмы Koch Engineering Co., Inc) Bulletin KRP-2.
84. Reinhard Billet. Packed towers in processing and environmental technology. VCH. – New York, 1995.
85. Ridgway K., Tarbuck K.J. The Random Packing of Spheres // British Chemical Engineering, 1967, Vol. 12, № 3, p.p. 384-388.
86. Ridgway K., Tarbuck K.J. Voidage Fluctuations in Randomly Packed Spheres Adjacent to a Containing Wall // Chemical Engineering Science, 1968, Vol. 23, № 9, pp. 1147-1155.
87. Ridwau K., Tarbuck K.J. The Random Packing of Spheres // British Chemical Engineering 1967, Vol. 12, № 3, pp.384-388.
88. Ridway K., Tarbuck K.J. Voidage Fluctuations in Randomly Packed Spheres Adjacent to a Containing Wall // Chem. Eng. Sci., 1968, Vol. 3, № 9, pp.1147-1155.
89. Robinson G.C., Mc.Clure C.M., Hendriacs R.T. Amer. Ceram. Soc. Bull, 1958, Vol. 37, № 9, p. 399.
90. Roblee L.H.S., Baird R.M., Tierney J.W. Radial Porosity Variations in Packed Beds. // American Institute, of Chemical Engineering Journal, 1958, Vol. 4, № 4, p.p. 460-464.
91. Schumacher R. Chem. Ing. Techn., 32, 594 (1960).
92. Schuter J., Vortmeyer D. Geschwindigkeitsverteilung in gasdurchstramten isothermen Kugelschuttungen // Chem. Eng. Technik, 1981, Vol. 53, № 10, 806-807.
93. Schwartz C.E., Smith J.M. Flow Distribution in Packed Beds // Ind. and Eng. Chemistry, 1953, Vol. 45, № 6, p.1209.
94. Seko M., Takeuchi H., Inada I. Scale-up for chromatographic separation of p-Xylen and Ethylbenzene // 1982, Ind. and Eng. Chem. Product Research and Development, 21(4), pp.656-661.

95. Senol Aynur, Dramur Umur. Эксплуатационное испытание и обсуждение конструкций насадочной колонны с новой керамической насадкой // Chim. Acta turc, 1995, 23, №2, С.145-155.

96. Seze M., Nishimura Y., Sakohara S. etc. The analysis of flow of rarefied gases through hacked beds by Monte-Carlo method // Journal Chemical Engineering Japan, Vol. 10, № 5, pp. 360-365.

97. Sherwood T.K., Ryan J.M. Chem. Eng. Sci., 1959, Vol. VII, № 2, p. 81

98. Sherwood T.K., Shipley G.H., Holloway F.A. Ind. Eng. Chem., 1938, Vol. 30, № 7, p.765.

99. Sonntag G. Einfluss des Lückenvolumen auf den Druckverlust in gasdurchströmten Füllkörpersäule // Chemie-Ingenieur-Technik, 1960, 32 Jahrgang, № 5, 317-329.

100. Staneck V., Szekely J. The Effect of Non-Uniform Porosity in Causing Flow Maldistributions in Isothermal Packed Beds. // The Canadian Journal of Chemical Engineering, 1972, Vol. 50, № 1, p.p. 9-14.

101. Svozda L., Dyduzynski J. Absorpcji warstew cieczy sciekajacej po sciankach rur z nowych tworzyw j rornej. Chepowatosci powierzchni // Prezm. Chem., 1965,44, №11, P.235-240.

102. Tesser G.W., Elgin T.C. Trans. Am. Insr. Chem. Eng. 1943, Vol. 39, № 3, p. 277.

103. Thadani M.C., Peebles F.N. Variation of local void fraction in randomly packed beds of equal spheres // Ind. Eng. Chem., 1966, Vol. 5, № 3, pp.265-268.

104. Tringate G.A. Some Geometrical Properties of Packings of Equal Spheres in Cylindrical Vessels. - Nuclear Engineering and Design, 1973, Vol. 24, № 1, p.p. 153-179.

105. Uchida S., Fujita S. J.Soc. Chem. Ind. (Japan), 1937, Vol. 40, № 7, p.238; 1938. Vol. 41, № 9, p.275.

106. Verschoor H., Schuit G.C.A., Appl. Sci. Res., A-2 № 2, 97(1950).

107. Vortmeyer D., Winter R.P. Improvements in Reactor Analysis Incorporating Porosity and Velocity Profiles.// German Chemical Engineering, 1984, Vol. 7, n 1, p.p.19-25.

108. Wen C.Y., O'Brien at all. J.Chem. Eng. Data, 1963, Vol. 8, № 1, p.42

109. West F.B., Taylor A.T. Chem. Eng. Progr., 1952, Vol.48, № 1, p.39

110. Ziolkowska I. e.a. Wplyw wysokosci warstwy zloza na profil predkosci w rurze z wypelnieniem ziarni stym // Inzynieria Chemiczna i Procezowa, Wroclaw, 1980, T.1, № 2, 393-405.

111. Ziolkowska I., Badowska I., Flejter B. Meryfikacja storhastycznego modelu przeplywu gazu przez kolumne z wypelnieniem na przykladzie zloz pierscieni Rashiga i Intalox // Inzynieria Chemizna i Procesowa, 1984, t. 5, № 4, 773-792.

112. Ziolkowska I., Faron-Lewandowska E. etc. Weryfikacja stochastycznego modelu przeplywu gazu przez kolumne z wypelnieniem ziarnistym // Inzynieria chemiczna i procesowa, 1983, t.4, № 3, 595-612.

113. Ziolkowska L., Badowska I., Morawska B. Metoda wyznaczania skladowych wektora predkosce w kolumne z wypelnieniem ziarnistym // Inzynieria chemiczna, 1976, 6(3), 693-712.

114. Абаев Г.Н., Попов Е.К., Крестинин А.К. и др. Методы управления структурной неподвижного зернистого слоя в книге: Всесоюзная конференция по аэрогидродинамике химаппаратов «АЭРОХИМ-1», 1981, Северодонецк, ч.2, секц.2-3, с.94-6-99.

115. Абаев Г.Н., Попов Е.К., Лукьяненко И.О. и др. Неоднородности течения реагентов в реакторах с неподвижным слоем катализатора, в книге: 7 Всесоюзная конференция по химреакторам, ч.III, 1980, Баку: Элм, с. 135-140.

116. Абрамов О.В., Зубов В.П. Тезисы докладов Международного симпозиума «Новейшие технологии и продукция в области органической и неорганической химии – 95», 1995, М., с.16.

117. Абрамович Г.Н. Прикладная газовая динамика. М.: Наука, 1969.

118. Авторское свидетельство СССР № 101 1207 (1983).
119. Авторское свидетельство СССР № 1375302 (1987).
120. Авторское свидетельство СССР № 17603304 (1992).
121. Авторское свидетельство СССР № 1765682 (1992).
122. Авторское свидетельство СССР № 1797991 (1992).
123. Авторское свидетельство СССР № 696654 (1979).
124. Авторское свидетельство СССР № 899049; Патент США № 4304738 (1981).
125. Авторское свидетельство СССР № 899049 (1981).
126. Айнштейн В.Г. Общий курс процессов и аппаратов химической технологии. М.: Логос, Высшая школа, 2002, 912 с.
127. Аксельрод Ю.В. Газожидкостные хемосорбционные процессы. Кинетика и моделирование. М.: Химия, 1989, 240 с.
128. Алекперова Л.В., Аксельрод Ю.В., Дильман В.В. и др. Хим. пром., 1974, № 5, 60 с.
129. Александров И.А. Ректификационные и абсорбционные аппараты, М., Химия, 1978, 280 с.
130. Алекперова Л.В., Аксельрод Ю.В., Дильман В.В., Струнина А.В., Морозов А.И. Гидродинамические исследования седловидных насадок и колец Палля, Хим. пром., 1974, № 5, с. 380-384.
131. Амелин А.Н., Кашников А.М., Титкова О.П. «Характеристика промышленных насадок для ректификации термически нестойких веществ», М.: НИИТЭХиМ, 1972.
132. Андреев Г.М., Зельвенский Я.Д., Катальников С.Г. Тяжелые изотопы водорода в атомной энергетике. М.: Изд.АТ, 2000, 344 с.
133. Аэров М.Э. Некоторые вопросы аэродинамики и теплообмена в каталитических реакционных аппаратах: Автореф. дисс. д-ра техн. наук, М.: 1951, с.38.
134. Аэров М.Э. Химия и технология топлив и масел, 1962, № 10, с. 9.

135. Аэров М.Э., Завелев Е.Д. и др. Реф. сборник: Азотная промышленность, 1978, с. 24.
136. Аэров М.Э., Завелев Е.Д., Семенов В.П., Вакк Э.Г. Некоторые закономерности формирования стационарного зернистого слоя. // Реферативный сборник: Азотная промышленность, 1978, № 3, с 24 – 31.
137. Аэров М.Э., Тодес О.М. Гидравлические и тепловые основы работы аппаратов со стационарным и кипящим зернистым слоем. Ленинград: Химия, 1968, 512 с.
138. Аэров М.Э., Тодес О.М., Наринский Д.А. Аппараты со стационарным зернистым слоем. Гидравлические и тепловые основы работы. Л.: Химия. 1979, 176 с.
139. Аэров М.Э., Умник Н.Н. Измерение скорости газа в реальном зернистом слое // Журнал прикладной химии, 1950, 23(10), с. 1009-1017.
140. Аюкаев Р.И., Кивран В.К., Аэров М.Э. Исследование физико-структурных свойств пористых тел на ЭЦВМ. - В кн.: Моделирование пористых материалов, Новосибирск: 1976, Институт катализа СО АН СССР, с.143-171.
141. Багатуров С.А. Основы теории и расчет перегонки и ректификации, М., Химия, 1974, 440 с.
142. Багатуров С.А. Основы теории расчета перегонки и ректификации, Химия, М., 1978, 280 с.
143. Бадатов Е.В., Лахмостов В.С., Слинько М.Г. Пористость слоя катализатора // Хим. пром., 1968, № 10, с. 42-44.
144. Башаров М.М. Энергоресурсосберегающая модернизация теплоиспользующих установок в производстве фенола: дис. ...канд. техн. наук. – Казань: КГЭУ, 2011.
145. Башаров М.М. Энергосберегающая модернизация ректификационной установки выделения фенола // Электронный научный

журнал «Нефтегазовое дело», 2011, №2.-С.136-146. URL: http://www.ogbus.ru/authors/Basharov/Basharov_1.pdf.

146. Башаров М.М., Лаптев А.Г. Энергосбережение в производстве фенола // Вестник КГЭУ, 2010, №3.-С.8-14.

147. Башаров М.М., Лаптев А.Г., Сайтбаталов М.В. Математическая модель тепломассопереноса в противоточных газо- (паро-) жидкостных аппаратах // Вестник КГЭУ, 2011. – №2. – С. 12-21.

148. Бельцер И.И., Олевский В.М. и др., Тр.ГИАП, 1975, вып. 37, с. 67; Oil&Gas Journal, Dec. 9, 1996, p. 70.

149. Бесков В.С., Абаев Г.Н. Аэродинамика промышленных реакторов с неподвижным слоем катализатора // Хим. пром., 1980, № 11, с.33-35.

150. Боресков Г.К., Риттер Д.Г. Гидравлическое сопротивление контактных массообменных устройств // Хим. пром., 1946, № 6, с. 5-7.

151. Браво Х.Л. и др. Нефть, газ и нефтехимия, 1986, № 4, с. 78.

152. Вальдберг А.Ю., Полиенова Е.В., Пушнов А.С. Очистка и охлаждение газов в насадочных скрубберах. М.: МГУИЭ, 2011, 144 с.

153. Ведерникова М.И., Старцева Л.Г., Юрьев Ю.Л., Орлов В.Г. Примеры и задачи по массообменным процессам химической технологии. Справочное пособие. Часть IV. Основные физические, химические и теплофизические свойства веществ. Екатеринбург: Уральский гос. лесотехнический университет, 2009, 154с.

154. Ведьгаева И.А. Математическое моделирование, исследование и повышение эффективности работы промышленных градирен с сетчатой насадкой: дис. ...канд. техн. наук. – Казань: КГЭУ, 2003.

155. Винтовая пластмассовая насадка НП-1 для тепло и массообменных процессов (каталог ГИАП, изд. «НИИТЭХИМ»).

156. Витковская Р.Ф. Разработка и исследование полимерных волокнистых катализаторов и контактных элементов для ресурсосбережения

и охраны окружающей среды. Диссертация на соиск. уч. степени доктора технических наук. СПб: СПГУТД, 2005, 366 с.

157. Войнов Н.А. Процесс ферментации кормового белка в пленочных биореакторах; способы интенсификации методы расчета. Дис...д-ра техн.наук, Красноярск, 1995.

158. Войнов Н.А., Сугак Е.В., Николаев Н.А. Пленочные биореакторы. Красноярск: БОРГЕС, 2001.

159. Войнов Н.А., Николаев Н.А. Пленочные трубчатые газо-жидкостные реакторы (гидродинамика и тепло- и массообмен). – Казань: Отечество, 2008, 272 с.

160. Волков В.И., Мухин В.А. и др. Исследование поля скоростей в пористой среде с помощью лазерного доплеровского измерителя скорости // Автометрия: 3, 1982, с. 82-86.

161. Волков С.А., Зельвенский В.Ю., Резников В.И. Влияние длины хроматографических колонн большого диаметра на размывание полосы // Журнал физической химии, 1981, 55(5), с. 1250-1254.

162. Волков С.А., Зельвенский В.Ю., Резников В.И. и др., Автометрия: 3, 1982, с. 87-91.

163. Волков С.А., Резников В.И. и др., О неоднородности поля скоростей газового потока в хроматографических колоннах // ТОХТ, 1979, 13(3), с. 455-459.

164. Вольфович С.И., Егоров А.П., Эпштейн Д.А. Общая химическая технология, М-Л, Госхимиздат, 1953.

165. Воробьев Г.А. Коррозионная стойкость материалов в агрессивных средах химических производств, изд. 2, М., Химия, 1975.

166. Воронцов Е.Г. Влияние вида и размеров упорядоченной шероховатости на течение пленки жидкости // Журнал прикладной химии, 1978, Т.51, №4, с. 773-779.

167. Гельперин Н.И. Дистилляция и ректификация, М., Госхимиздат, 1947.
168. Гельперин И.И., Каган А.М., Дильман В.В., Пальмов А.А., Аксельрод Ю.В., Крапивцева И.Е. Новая насадка ГИАП для осуществления тепло-массообменных процессов в агрегатах большой единичной мощности, Всесоюзная Конференция по аэрогидродинамике химических аппаратов, «Аэрохим-1», Ч. 3, Северодонецк, 1981, с. 20.
169. Гельперин И.И., Каган А.М., Пушнов А.С., Наумов Ю.Б., Платонов В.В., Ролофф В.Ю., Новиков Э.А. Расчет профиля скорости газового потока в трубчатых аппаратах с неподвижным зернистым слоем. - Химическая промышленность, 1984, № 8, с. 500-504.
170. Гельперин И.И., Каган А.М. Аппараты с неподвижным зернистым слоем. Обзорная информация. Серия: Азотная промышленность. - М.: НИИТЭХИМ 1978, с. 2-16.
171. Гельперин И.И., Каган А.М. Хим. пром., 1963, № 2, с.52.
172. Гельперин И.И., Каган А.М. Хим. пром., 1984, № 12, с.741.
173. Гельперин И.И., Каган А.М., Дильман В.В. и др. Всесоюзная конференция по аэродинамике химических аппаратов, Северодонецк, 1981, ч.Ш, с. 29.
174. Гельперин И.И., Каган А.М., Креницина Г.И. Гидравлическое сопротивление и удельная поверхность зернистых материалов // Хим. пром. 1977, № 2, с. 147-148.
175. Гельперин И.И., Каган А.М., Пушнов А.С. Некоторые закономерности газораспределения в неподвижном зернистом слое // Хим. пром., 1982, № 8, С. 481-485.
176. Гельперин И.И., Каган А.М., Пушнов А.С., Роллофф В.Ю. Оценка стабилизации профиля скорости газового потока в неподвижном зернистом слое // Хим. пром., 1983, № 8, с. 470-473.

177. Гельперин Н.И., Аэров М.Э., Каган А.М. Гидравлическое сопротивление неподвижного зернистого слоя // Химия и технология топлив и масел, 1969. - №3, с. 37-41.
178. Гельперин Н.И. Основные процессы и аппараты химической технологии, М., Химия, 1981.
179. Гельперин Н.И., Айнштейн В.Г., Кваша В.Б. Основы техники псевдооживления, М., Химия, 1967.
180. Генкин В.С. Исследование гидродинамики радиальных реакторов конверсии окиси углерода. Дисс. на соиск. уч. ст. канд. техн. наук, М.: ГИАП, 1972, 150 с.
181. Гильденблат И.А. Канд. дисс. М.: МХТИ им. Д.И. Менделеева, 1961.
182. Гладильщикова С.В., Щелкунов В.А., Круглов С.А., Молоканов Ю.К. Насадки массообменных аппаратов для нефтепереработки и нефтехимии», ЦИНТИХИМНЕФТЕМАШ, М., 1983.
183. Гладков В.А., Арефьев Ю.И., Пономаренко В.С. Вентиляторные градирни. М., Стройиздат, 1976.
184. Голубев И.Ф., Морозов А.С. Гидравлическое сопротивление насадки таблетированного катализатора гидрирования бензола, в книге: Химия и технология продуктов органического синтеза (полупродукты для синтеза полиамидов), М.: Госхимиздат, 1963, с.127-135.
185. Дмитриева Г.Б., Беренгартен М.Г., Каган А.М. и др. Химическое и нефтегазовое машиностроение. 2007, № 1, с. 9.
186. Дмитриева Г.Б., Беренгартен М.Г., Клюшenkova М.И., Пушнов А.С. Эффективные конструкции структурированных насадок для процессов тепломассообмена // Химическое и нефтегазовое машиностроение, 2005, № 8, с. 15-17.
187. Добровольский А.А., Дытнерский Ю.И. и др. Хим. пром., 1977, № 19, с. 791.

188. Дурнов В.К., Бабушкин Н.М. Влияние степени шероховатости ограждающих стенок и геометрического симплекса слоя на структуру и потери напора в неподвижном и движущемся зернистом слоях. - Инженерно-физический журнал, 1974, т. 26, № 6, с. 1014-1023.

189. Дытнерский Ю.И. Процессы и аппараты химической технологии. 4 ч. Массообменные процессы и аппараты. М., Химия, 1995, с. 368.

190. Дьяконов Г.С., Фарахов М.И., Маряхин Н.Н. Гидродинамические исследования нерегулярной насадки «Инжехим-2002» // Теплообменные процессы и аппараты химической технологии: Межвуз. темат. сб. науч. тр. , 2002, с.118-121.

191. Дьяконов Г.С., Фарахов М.И., Лаптев А.Г. Новый метод определения количества удерживаемой жидкости в насадочных колоннах // Теплообменные процессы и аппараты химической технологии: Межвуз. темат. сб. науч. тр. , 2001, с.193-197.

192. Дьяконов Г.С., Фарахов М.И., Маряхин Н.Н. Разработка новой нерегулярной насадки и ее гидродинамические исследования // Теплообменные процессы и аппараты химической технологии: Межвуз. темат. сб. науч. тр. , 2000, с.239-248.

193. Дьяконов Г.С., Фарахов М.И., Маряхин Н.Н. Экспериментальная установка для исследования насадочных контактных устройств // Теплообменные процессы и аппараты химической технологии: Межвуз. темат. сб. науч. тр. , 2000, с. 235-239.

194. Дьяконов Г.С., Ясавеев Х.Н., Маряхин Н.Н. Применение программного продукта Phoenics 3.3 для исследования регулярных гофрированных насадок // Теплообменные процессы и аппараты химической технологии: Межвуз. темат. сб. науч. тр. , 2002, с.185-189.

195. Дьяконов С.Г., Елизаров В.В., Фарахов М.И. Гидродинамические и массообменные характеристики рулонной насадки //Изв. вузов. Химия и химическая технология , 2003, Т. 46, Вып.5, с.143-147.

196. Дьяконов Г.С., Фарахов М.И., Лаптев А.Г. Определение ВЭТТ для насадочных колонн при ректификации газового конденсата // Газовая промышленность, 1998, №10, с.20-22.

197. Дьяконов С.Г., Елизаров В.И., Лаптев А.Г. Теоретические основы и моделирование процессов разделения веществ. Казань: Издательство Казан. ун-та, 1993, 427 с.

198. Дьяконов С.Г., Елизаров В.В., Елизаров В.И. Теоретические основы проектирования промышленных аппаратов химической технологии на базе сопряженного физического и математического моделирования. – Казань, КГТУ, 2009, 456с.

199. Дьяконов С.Г., Елизаров В.И., Лаптев А.Г. Моделирование массотеплопереноса в промышленных аппаратах на основе исследования лабораторного макета // ТОХТ. – 1993. – Т.27, №1. – с.4-18.

200. Дьяконов С.Г., Елизаров В.И., Лаптев А.Г. Модель массоотдачи в газовой фазе при разделении газожидкостных систем в насадочных колоннах // Изв. вузов. Химия и хим. технол. – 1990. – Т.33, №4. – с.108-111.

201. Егоров Н.Н. Охлаждение газа в скрубберах, М., Госхимиздат, 1954, 140 с.

202. Елизаров В.В. Технология проектирования тарельчато-насадочных аппаратов разделения водных растворов: Дис... канд. техн. наук. – Казань: КГТУ (КХТИ), 2004.

203. Жаворонков Н.М. Гидравлические основы скрубберного процесса и теплопередачи в скрубберах, М.: Советская наука, 1944.

204. Жаворонков Н.М. и др. Труды МХТИ им. Менделеева, 1961, вып. 33, с.

205. Жаворонков Н.М. Теоретические основы химической технологии. М.: Наука, 2007, 351с.

206. Жаворонков Н.М. Хим.пром., 1948, № 9, с.269.

207. Жаворонков Н.М., Аэров М.Э. и др., Хим. пром., 1949, № 3, с.68.

208. Жаворонков Н.М., Аэров М.Э., Умник Н.Н. Гидравлическое сопротивление и плотность упаковки зернистых материалов. Журнал физической химии. 1949. Т. 23. Вып. 3, с. 342-360.
209. Жаворонков Н.М., Гильденблат И.А., Рамм В.М. ЖПХ, 1960, т. 33, № 8, с. 179.
210. Жаворонков Н.М., Гильденблат И.А., Рамм В.М. ЖПХ, 1960, Т. 33, № 1, с.33; Тр.МХТИ им. Д.И. Менделеева, вып. 33, 1961, с. 52.
211. Жаворонков Н.М., Гильденблат И.А., Рамм В.М. Труды МХТИ им. Д.И. Менделеева, 1963, вып. 40, с. 5.
212. Жаворонков Н.М., Гильденблат И.А., Рамм В.М. Труды МХТИ им. Д.И. Менделеева, 1963, вып. 40, с. 19.
213. Жаворонков Н.М., Малюсов В.А., Дытнерский Ю.И. и др., ТОХТ, 1977, т. XI, № 4, с. 503.
214. Завелев Е.Д. Исследование зернистых слоев катализаторов конверсии углеводородов: диссерт. на соиск. уч. степени кандидата технических наук, М.: ГИАП, 1981.
215. Завелев Е.Д., Семенов В.П., Аэров М.Э. и др. Труды ГИАП, М.: 1978, вып.41, с. 24.
216. Завелев Е.Д., Семенов В.П., Аэров М.Э., Вакк Э.Г. , Бабушкин Б.И. Распределение порозности в слое промышленных гранул катализаторов. - В кн.: Производство азотных удобрений. Труды ГИАПа, М.: 1978, вып. 49, с. 57-64.
217. Завелев Е.Д., Семенов В.П., Мейтин И.В., Аэров М.Э., Вакк Э.Г., Бабушкин Б.И. Влияние геометрических параметров зернистого слоя гранул катализатора на порозность. - В кн.: Химия и технология азотных удобрений. Производство синтез-газа и аммиака. Труды ГИАПа, М.: 1976, вып. 41, с. 24-30.
218. Заец И.И., Каган А.М., Бурцева И.К. и др. Конгресс «Защита 92», РАН, расширенные тезисы докладов, 1992, т. I, часть III, с. 193.

219. Закгейм А.Ю. Диссертация на соискание ученой степени к.т.н. М.: МХТИ им. Д.И. Менделеева, 1963.

220. Зверева Э.Р., Фарахов Т.М., Исхаков А.Р. Очистка дымовых газов ТЭС насадочными абсорберами // Энергетика Татарстана, 2010, - С. 46-49, (декабрь).

221. Зданавичюс Г.Б., Сурвила В.Ю. Гидравлическое сопротивление цилиндрических каналов с шаровой насадкой // Труды АН Литовской ССР. Серия Б. 1980-Т.2 (117), с. 41-47.

222. Зельвенский Я.Д. Насадочные ректификационные колонны для глубокой очистки летучих веществ // Химическая промышленность. – 1987. – №7.– с. 425-427.

223. Зельвенский Я.Д., Торопов Н.Н. Гидродинамика противотока жидкость-пар в насадочной колонне при низкотемпературной ректификации под давлением // Химическая промышленность, 2002, №8, с.21-23.

224. Зиберг Г.К., Ключко В.В., Феоктистова Т.М. Результаты промышленных испытаний новых типов регулярных насадок // Наука и техника в газовой промышленности, 2002, № 3, с.16-19.

225. Идельчик И.Е. Аэродинамика технологических аппаратов (подвод, отвод и распределение потоков по сечению аппаратов). М.: Машиностроение, 1983, 351 с.

226. Идельчик И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям. Изд. 2-е, переработанное и дополненное. М.: Машиностроение, 1983.

227. Информационные каталоги фирмы «Newsmart (Nantong) Chem-Spec-IND» (China).

228. Ильиных А.А., Мемедляев З.Н., Кулов Н.Н. Массообмен в орошаемой насадке в режимах подвисяния и эмульгирования // ТОХТ, 1989, Т.23, №5, с.569-574.

229. Иордан П. Экономия энергии путем переоснащения имеющихся колонн упорядоченными насадками (каталог фирмы «Зульцер», 1990).

230. Ишмурзин А.В. Повышение эффективности и снижение энергозатрат на установках разделения в водоподготовке и получения топлив из углеводородного сырья: дис. ...канд. техн. наук. – Казань: КГЭУ, 2002.

231. Ишмурзин А.В., Лаптев А.Г., Минеев Н.Г., Фарахов М.И., Мальковский П.А. Применение насадочных элементов для модернизации колонн разделения углеводородных смесей // Деп. в ВИНТИ №1589-В2002 от 19.09.2002.

232. Каган А.М., Гельперин И.И., Дильман В.В., Юдина Л.А., Пальмов А.А., Пушнов А.С. Высокоэффективное контактное устройство для процессов абсорбции и ректификации - нерегулярная металлическая насадка - ГИАП-НЗ // Хим. пром., 1992, №8, с. 468.

233. Каган А.М., Пальмов А.А., Гельперин И.И. Нерегулярные металлические насадки для тепло-массообменных процессов. М.: НИИТЭХИМ, 1985, 18 с.

234. Каган А.М., Пальмов А.А., Юдина Л.А., Алексеюк В.Ф., Струнина А.В., Волкова О.А. Исследование массообменных характеристик нерегулярной металлической насадки ГИАП-НЗ. Сб.: Работы в области массообменных процессов за период 1986-1990 гг. по координационному плану головного предприятия, Северодонецк, 1989, с. 160.

235. Каган А.М., Пушнов А.С. Сравнительные характеристики промышленных насадок для процессов тепло-массообмена // Химическое и нефтегазовое машиностроение, 2008, №4, с. 5.

236. Каган А.М., Юдина Л.А., Пушнов А.С. Нерегулярная металлическая насадка ГИАП- НЗ и некоторые аспекты ее промышленного использования // Хим. пром., 2001, №4, с. 46.

237. Каган А.М. и др. Журнал ВХО им. Д.И. Менделеева, 1991, т. 36, № 2, с. 208.

238. Каган А.М. Исследование конвективного переноса тепла газами в трубах с зернистыми материалами. Дисс. на соиск. уч. степени к.т.н. М., ГИАП, 1966.

239. Каган А.М., Буравлев В.М., Мызенков Г.Б. и др. XVI Менделеевский съезд по общей и прикладной химии, рефераты сообщений и докладов, М., 1998, № 2, с. 21.

240. Каган А.М., Дильман В.В., Пальмов А.А. и др. Всесоюзное совещание «Тепломассообменное оборудование 88», М.: ЦИНТИХИМНЕФТЕМАШ, 1988, с.94.

241. Каган А.М., Пальмов А.А. и др. Хим. пром., 1982, № 6, с.369

242. Каган А.М., Пальмов А.А., Юдина Л.А. и др. Сб. Работы в области массообменных процессов за период 1986-90гг по координационному плану головного предприятия, Северодонецк, 1989, с. 162

243. Каган А.М., Пищик Л.Я., Пушнов А.С. и др. Заявка на изобретение, СССР, № 2691440/25(162583) от 01.12.78.

244. Каган А.М., Чиж К.В., Тимонин А.С., Пушнов А.С. Сравнительные характеристики нерегулярных металлических насадок // Хим. пром., 2012, № 1, с. 39-47.

245. Каган А.М., Пушнов А.С. Шилин М.В. Влияние площади перфорации нерегулярных тепло-массообменных металлических насадок на их массообменные и гидродинамические характеристики // Энергосбережение и водоподготовка, 2012, № 2(76), с. 64-66.

246. Каган А.М., Пушнов А.С. Заявка на изобретение, СССР, № 1626246/26-25 от 04.03.71.

247. Каган А.М., Пушнов А.С. О влиянии диаметра отверстий перфорации на показатели работы нерегулярных тепло-массообменных насадок // Хим. пром., 2011, № 8, с.402-406.

248. Каган А.М., Пушнов А.С. Хим. пром. сегодня, 2006, № 11, с.30.

249. Каган А.М., Пушнов А.С., Рябушенко А.С. Материалы для изготовления насадочных контактных устройств для тепло- и массообменных процессов // Химическая технология, 2007, т. 8, № 5, с. 232-240.

250. Каган А.М., Пушнов А.С., Юдина Л.А. Сравнение характеристик промышленных насадок кольцевой и седлообразной формы из полимерного материала для осуществления процессов абсорбции и ректификации в колонных аппаратах химической технологии// Химическая промышленность, 2008, Т. 85, № 6, с. 294-299.

251. Каган А.М., Пушнов А.С., Юдина Л.А. Активная поверхность элементов нерегулярных тепло- и массообменных насадок // ТОХТ, 2012, Т. 46, № 2, с. 199-206.

252. Каган А.М., Пушнов А.С., Юдина Л.А. Об активной поверхности элементов нерегулярных тепло- массообменных насадок // Хим. пром., 2011, № 7, с. 345-353.

253. Каган А.М., Сергеев Ю.А., Пушнов А.С., Гельперин И.И. Профиль скорости газового потока в аппаратах с неподвижным зернистым слоем // ТОХТ, 1987, Т. 26, № 1, с. 130-133.

254. Каган А.М., Юдина Л.А., Пушнов А.С. Гидравлическое сопротивление и удельная поверхность нерегулярных насадок// Химическая промышленность, 2008, Т. 85, №3, с. 147-152.

255. Каган А.М., Юдина Л.А., Пушнов А.С. Хим. пром. 1997, № 11, с. 783.

256. Каган А.М., Юдина Л.А., Пушнов А.С., Чиж К.В. Совершенствование конструкций нерегулярных металлических насадок//Химическая промышленность, 2008, Т. 85, №1, с. 44-48.

257. Кан С.В., Олевский В.М. Хим. пром., 1965, № 10, с.770.

258. Каралин Э.А., Ксенофонтов Д.В., Харлампиди Х.Э. Расчет скорости движения жидкой фазы в реакторе гидрирования с неподвижным

слоем катализатора//Химическая промышленность сегодня, 2007, № 10, с. 40-42.

259. Каретников Ю.П., Жиделева К.П. Хим. наука и пром., 1957, т.2, № 6, с. 795.

260. Касаткин А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии. 11-е изд. «Альянс», 2005, 829с.

261. Касаткин А.Г., Цыпарис И.Н. Массопередача в жидкостной пленке в абсорбционных насадочных колоннах // Химическая промышленность. – 1952. – №7. – с.203-210.

262. Каст В., Кришер О., Райнике Г., Винтермантель А. Конвективный тепло- массоперенос. Перевод с немецкого, М.: Энергия, 1980, 49с.

263. Кафаров В.В. Основы массопередачи, М., Высшая школа, 1972, 267 с.

264. Кафаров В.В., Бляхман Л.И., ЖПХ, 1950, т.23, № 3, с.244; 1951, т. 24, № 12, с. 1274.

265. Кафаров В.В., Трофимов В.И. ЖПХ, 1957, т.30, № 2, с.211; 1958, т. 31, № 12, с. 1809.

266. Квурт Ю.П., Холпанов Л.П., Малюсов В.А., Жаворонков М.И. О закономерностях пленочного течения в каналах с регулярной шероховатостью // Докл. АН СССР, 1984, Т.274, №4, с.882-884.

267. Квурт Ю.П. Гидродинамические закономерности течения по шероховатости поверхности пленки жидкости с различной вязкостью и тепломассообмен: Дис. ..канд. техн. наук. – М.: ИОНХ., 1986.

268. Кириллов В.А. и др. О профиле скорости в неподвижном зернистом слое // ДАН СССР, 1979, т. 245, № 1, с. 159-162.

269. Кленов О.П., Матрос Ю.Ш. Распределение потока в неподвижном слое катализатора, в книге: Аэродинамика химических реакторов с неподвижными слоями катализатора, 1985, Новосибирск: Наука, с.46-51.

270. Ключко В.В., Холпанов Л.П. Исследование и расчет гидродинамических характеристик регулярных контактных устройств массообменных колонн // Химическая техника, 2004, №5, с.10-12.

271. Коган В.Б., Харисов М.А. Оборудование для разделения смесей под вакуумом. Л: Машиностроение, 1976.

272. Колев Н., Винклер К., Дракичев Р., Брош З. Создание эффективных насадок для колонных аппаратов на основе теории массообменных процессов//Химическая промышленность, 1986, № 8, с.489-493.

273. Колескин В.Н., Штерн П.Г., Турунтаев С.В., Абаев Г.Н., Попов Е.К. Влияние ограничивающих поверхностей на распределение порозности зернистой среды. // Инженерно-физический журнал, 1982, т. 42, № 4, с.578-582.

274. Комарович Т., Магера Я., Баранов Д.А., Беренгартен М.Г. Высокоэффективные кольцево-структурные насадки // Химическое и нефтегазовое машиностроение, 2001, № 8, с. 8-19.

275. Королев В.Н., Сыромятников Н.И., Толмачев Е.М. Структура неподвижного и псевдосжиженного слоя зернистого материала вблизи погруженной в него поверхности (стенки). // Инженерно-физический журнал, 1971, т. 21, № 6, с. 973-978.

276. Костерин С.И., Кожин И.А., Леонтьев А.И. Теплоэнергетика, 1959, № 3, с. 66.

277. Краткая химическая энциклопедия, М., 1964, м. 3, с. 363.

278. Кремнев Т.В. Технологии нефти и газа, 2006, № 3, с. 66.

279. Кукарин А.С., Бакин С.В., Китаев Б.И. Распределение скоростей газа в слое шихты доменной печи // Известия ВУЗов, Черная металлургия, 1965,6, С. 33-37.

280. Кулов Н.Н., Максимов В.В., Малюсов В.А. Массоотдача в стекающих пленках жидкости // ТОХТ. – 1983.– Т.17, №3 – с.291-305.

281. Кулов Н.Н., Воротилин В.П., Малюсов В.А. Свободное стекание турбулентной пленки жидкости // ТОХТ. – 1973. – Т.7, №5. – с.717-726.

282. Кулов Н.Н., Бажиров Т.С. Массоотдача в жидкой фазе в орошаемой колонне с искусственной регулярной шероховатостью // Всесоюз. конф. «Современные машины и аппараты химических производств», химтехника-88, Т.2, Ч.2, с. 164-165.

283. Кутателадзе С.С., Стырикович М.А. Гидравлика газожидкостных систем, М., Госэнергоиздат, 1958.

284. Лаптев А. Г. Моделирование элементарных актов переноса в двухфазных средах и определение эффективности массо- и теплообмена в промышленных колонных аппаратах : дис. ... док. тех. наук / Лаптев Анатолий Григорьевич. — Казань, КГТУ, 1995.

285. Лаптев А.Г. Математическое моделирование и модернизация установки получения моторных и котельных топлив Сургутского ЗСК. Сообщение 2. Модернизация колонны И-1, К-1 и К-3 / А.Г. Лаптев, П.А. Мальковский, Н.Г. Минеев, В.Ф. Баглай, М.И. Фарахов // Изв. вузов. Проблемы энергетики. – 2002. - №7-8. – С.17-21.

286. Лаптев А.Г. Модели пограничного слоя и расчет тепломассообменных аппаратов. Казань: изд-во Казанского университета, 2007, 500 с.

287. Лаптев А.Г. Модель сепарации аэрозолей в аппаратах с насадочными элементами / А.Г. Лаптев, М.И. Фарахов // Химическая промышленность. – 2008. - №3. – С.156 – 162.

288. Лаптев А.Г. Проектирование и модернизация аппаратов разделения в нефте- и газопереработке. – Казань: Печатный двор, 2002, 202 с.

289. Лаптев А.Г., Ведьгаева И.А. Устройство и расчет промышленных градирен. – Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2004. – 180 с.

290. Лаптев А.Г., Башаров М.М., Саитбаталов М.В. «Модель тепломассопереноса в насадочной колонке с переменными массовыми

расходами по высоте» // Научно-технический вестник Поволжья, 2012г, №2. –С.85-93.

291. Лаптев А.Г., Крылова А.Н., Башаров М.М. Модели тепло- и массоотдачи и сравнительная эффективность насадочных аппаратов // Тр. Академэнерго, 2011. - №2. – С. 54-70.

292. Лаптев А.Г., Фарахов Т.М., Башаров М.М. Модели тепломассопереноса в насадочных аппаратах // Тр. Академэнерго, 2012. - №1. – С. 57-70.

293. Лаптев А.Г., Фарахов М.И. Гидромеханические процессы в нефтехимии и энергетике: Пособие к расчету аппаратов. Казань: Изд-во Казанского гос. университета, 2008, 730 с.

294. Лаптев А.Г., Фарахов М.И. Разделение гетерогенных систем в насадочных аппаратах. Казань: Казанский государственный университет, 2006, 342 с.

295. Лаптев А.Г., Фарахов М.И., Башаров М.М. Массообменная и энергетическая эффективность колонн с насадками // Химическая техника, 2010, № 10, С. 12-14.

296. Лаптев А.Г., Фарахов М.И., Башаров М.М. Основы энергосберегающей модернизации аппаратов разделения веществ // Вестник ИГЭУ, 2011, №1 – С.17-19.

297. Лаптев А.Г., Фарахов М.И., Минеев Н.Г. Повышение эффективности ректификационных колонн в производстве этаноламинов // Химическая промышленность, 2007, №7, с. 354-360.

298. Лаптев А.Г., Фарахов Т.М., Лаптева Е.А., Минигулов Р.М. Гидравлические характеристики рулонной гофрированной тепломассообменной насадки // Энергосбережение и водоподготовка, 2010, №1, с.35-37.

299. Лаптев А.Г., Фарахов М.И., Минеев Н.Г. Основы расчета и модернизация тепломассообменных установок в нефтехимии. Казань: Казан. гос. энергетический ун-т, 2010, 574 с.

300. Лаптев А.Г., Фарахов М.И., Ясавеев Х.Н., Шигапов И.М., Данилов В.А. Проектирование контактных элементов для массообменных насадочных колонн // Совершенствование подготовки учащихся и студентов в области графики, конструирования и стандартизации: Межвуз. науч.-метод. сб.- Саратов, 1999, с.115-118.

301. Лаптев А.Г., Кудряшов В.Н., Фарахов М.И. Высокоэффективные насадочные элементы для аппаратов разделения // Сб. тр. Юбилейной науч.-практ. конф., посвященной 40-летию ОАО «Казаньоргсинтез», 2003, с. 272-304.

302. Лаптев А.Г., Фарахов М.И., Данилов В.А. Повышение эффективности узла щелочной очистки пирогаза в производстве этилена // Химическая промышленность, 2001, №10, с.24-33.

303. Лаптев А.Г., Насыров Р.Р., Фарахов Т.М. Модель массоотдачи в жидкой фазе насадочных колонн // Тепломассообменные процессы и аппараты химической технологии : межвуз. темат. сб. науч. тр. – Казань, 2004.

304. Лаптев А.Г., Дьяконов С.Г. Математическое моделирование процессов массо- и теплоотдачи в газовой фазе насадочных колонн // Химическая промышленность. – 1993. – №6. – с.48-51.

305. Лаптев А.Г., Дьяконов С.Г. Моделирование массотеплоотдачи в турбулентной пленке // Массообменные процессы и аппараты хим. технол.: межвуз. тематич. сб. науч. тр. – Казань: КХТИ. – 1992. – с.12-15.

306. Лаптев А.Г., Конахин А.М., Минеев Н.Г. Теоретические основы и расчет аппаратов разделения гомогенных смесей. – М.: Теплотехник, 2011. – 424с.

307. Лаптев А.Г., Николаев Н.А., Башаров М.М. Методы интенсификации и моделирования тепломассообменных процессов. – М.: Теплотехник, 2011. – 288с.
308. Лаптев А.Г., Фарахов М.И., Башаров М.М. Энерго- и ресурсосберегающие технологии и аппараты очистки жидкостей в нефтехимии и энергетике. – Казань.: Отечество, 2012. – 410с.
309. Лаптев А.Г., Фарахов М.И., Минеев Н.Г. Теоретические основы и модернизация аппаратов химической технологии. – LAP LAMBERT Academic Publishing, 2011. – 595с.
310. Лаптев А.Г., Данилов В.А. Моделирование процесса хемосорбции в насадочной колонне // Химическая промышленность, 1998. - №1. – С.23-26.
311. Лаптев А.Г., Долгов А.Н. Математическая модель очистки воды от растворенных газов в насадочных аппаратах // Вода: химия и экология, 2011. - №12 декабрь. С.33-39.
312. Лаптева Е.А. Энергосбережение на теплотехнологической установке разделения этаноламинов: Дис...канд. техн. наук. – Казань: КГЭУ, 2009.
313. Лебедев Ю.Н., Чекменов В.Г., Зайцева Т.М. Насадка ВАПУ ПАК для вакуумных колонн // Химия и технология топлив и масел, 2004, № 1, с.48-52.
314. Лева М. Псевдооживление, М., Гостоптехиздат, 1961.
315. Левич В.Г. Физико-химическая гидродинамика, изд. Физматгиз, М., 1959.
316. Лейбензон Л.С. Движение природных жидкостей и газов в пористой среде, Монография, - М.Л.: ГИ Технико-теоретической литературы, 1947, 244 с.

317. Леонтьев В.С., Сидоров С.И. Современные насадочные колонны: особенности конструктивного оформления // Хим. пром., 2005, № 7, с. 347-350.
318. Мальковский П.А., Ишмурзин А.В., Лаптев А.Г., Минеев Н.Г. Использование насадочных элементов для реконструкции колонны К-4 УМТ // Межвузовский тематический сборник научных трудов «Тепломассообменные процессы и аппараты химической технологии», Казань, 2001. – С. 177-183.
319. Малюсов В.А., Жаворонков Н.М. и др. Хим. пром., 1962, № 7, с. 519
320. Марков В.А., Войнов Н.А., Николаев Н.А. Массоотдача в турбулентных пленках жидкости, стекающей по гладкой и шероховатой поверхности // ТОХТ. – 1990. – Т.24, №4. – с.442-449.
321. Маряхин Н.Н. Влияние геометрии регулярной гофрированной насадки на ее гидродинамические характеристики: Автореф. дис... канд. техн. наук. – Казань: КГТУ, 2003.
322. Матрос Ю.Ш. Нестационарные процессы в каталитических реакторах, Новосибирск: Наука, Сибирское отделение, 1982, 258 с.
323. Махоткин А.Ф. Теоретические основы очистки газовых выбросов производства нитратов целлюлозы. – Казань: изд-во Казанского университета, 2003, 268 с.
324. Микуленок И.О. Классификация насадок массообменных аппаратов // Хим. пром., 2011, № 2, с. 67.
325. Миндубаев Р.Ф. Повышение энергетической эффективности тепломассообменной установки разделения пирогаза за счет очистки газов-теплоносителей от аэрозольных частиц: дис. ...канд. техн. наук. – Казань: КГЭУ, 2003.
326. Минский Е.И. Доклады АН СССР, 1951, 78, № 3, с.409.

327. Михеев М.А., Михеева И.М. Основы теплопередачи, М., Энергия, 1977, 343 с.
328. Мишин В.П., Кацашвили В.Г. «Зарубежные насадочные устройства массообменной аппаратуры»: обзор.информ. М.: ЦИНТИ-Химнефтемаш, 1982, 20 с.
329. Мокин В.А., Молоканов Ю.К. Хим. пром., 1988, № 11, с. 46.
330. Молоканов Ю.К. Процессы и аппараты нефтегазопереработки, М.: Химия, 1980, 407 с.
331. Мясников В.П., Котелкин В.Д. Гидродинамическая модель химического реактора с неподвижным слоем катализатора. В сб.: Аэромеханика. - М., Наука, 1976, с.307-316.
332. Наумов Ю.Б., Гельперин И.И., Пушнов А.С., Новикова Н.И., Новиков Э.А., Каган А.М. Двухзонная модель аппаратов с неподвижным зернистым слоем. - Химическая промышленность, 1986, № 8, с.463-465.
333. Нерегулярные насадки из металла (Intalox packed Tower System) информационный каталог фирмы «Koch – Glitsch», 2003 (KGMRC-1.2МО303В).
334. Нигматуллин Р.И. Динамика многофазных сред Ч.2. – М.: Наука, 1987, 360 с.
335. Николаев А.Н., Войной Н.А., Николаев Н.А. Теплоотдача в пленке жидкости, стекающей по гладкой и шероховатой поверхности // ТОХТ, 1998, Т.32, №1, с.28-32.
336. Олевский В.М., Ручинский В.Р. Ректификация химически нестойких продуктов, М., Химия, 1972, с.200.
337. Олевский В.М., Тютюнников А.Б. Насадочные и роторные колонные аппараты. Доклады 3-ей Всесоюзной конференции по теории и практике ректификации, г. Северодонецк, 9-11. X, 1973, М., ОНТИ ГИАП, 115.

338. Павлов К.Ф., Романков П.Г., Носков А.А. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии, М., Химия, 1970, 626 с.
339. Пальмов А.А., Каган А.М. Третье Всесоюзное совещание по проблеме «Абсорбция газов», Таллин, 1987, Тезисы докладов, с.10.
340. Пальмов А.А., Каган А.М., Гельперин И.И. 2-е Всесоюзное совещание по проблеме «Абсорбция газов», 1983. Тезисы докладов. Гродно, 1983, ч. II, с.260.
341. Пальмов А.А., Каган А.М., Гельперин И.И. V Всесоюзная конференция по теории и практике ректификации, Северодонецк, 1984, с.109.
342. Пат. Великобритании № 6228.
343. Патент Великобритании 855159.
344. Патент Великобритании № 1520868 (1978).
345. Патент Великобритании № 1602183 (1981).
346. Патент Великобритании № 6228.
347. Патент Великобритании № 855159.
348. Патент ПНР № 55193.
349. Патент ПНР № 74693 (1977).
350. Патент США № 4304738 (1981)
351. Патент Российской Федерации на полезную модель № 54818. Регулярная насадка для теплообменных аппаратов / Фарахов М.И., Шигапов И.М., Маряхин Н.Н., Фарахов Т.М., Лаптева Е.А. 27.07.2006. Бюл.№21.
352. Патент Российской Федерации на изобретение № 2284844. Горизонтальный цилиндрический отстойник / Фарахов М.И., Альтапов А.Р, Афанасьев И.П., Кузнецов В.А. 10.10.2006. Бюл.№28.
353. Пери Дж. Справочник инженера-химика. Л.: Химия, 1976.
354. Пери Дж. Справочник инженера-химика. Л.: Химия, 1969.

355. Петрашова Е.Н., Пушнов А.С., Лагуткин М.Г. Газораспределение в слое нерегулярной насадки скрубберных аппаратов для очистки отходящих газов//Экология и промышленность России, март, 2011, с. 6-9.
356. Плановский А.Н., Касаткин А.Г. и др. Хим. пром., 1949, № 6 с. 171.
357. Плановский А.Н., Кафаров В.В. Хим. пром., 1945, № 3 с.16; 1946, № 4, с.
358. Плановский А.Н., Николаев П.И. Процессы и аппараты химической и нефтехимической технологии, М.: Химия, 1972, 493 с.
359. Плановский А.Н., Рамм В.М., Каган С.З. Процессы и аппараты химической технологии, М.: Химия, 1968, 847 с.
360. Платонов В.В. Оптимальные размеры, формы зерен катализатора и режим работы реакторов синтеза аммиака большой мощности: Диссертация на соиск. уч. степени канд. техн. наук. М.: ГИАП, 1983, 150 с.
361. Пленочная тепло- и массообменная аппаратура (Процессы химической и нефтехимической технологии) / Под ред. В.М. Олевского. – М.: Химия, 1988.- 240 с.
362. Повтарев И.А., Блиничев В.Н., Чагин О.В. Исследование зависимости гидравлического сопротивления насадочного слоя колонного оборудования // Изв. вузов Химия и химическая технология, 2006, Т. 49, № 12, с. 109-110.
363. Подольский И.И., Гусев И.В. Учет сжатия слоя катализатора при расчете насадок колонн синтеза аммиака, в книге: Оборудование, его эксплуатация, ремонт и защита от коррозии в химической промышленности. М.: НИИТЭХИМ, 1971, вып. 4, с.8-11.
364. Полевой А.С. Исследование высокоэффективных насадок при ректификации разбавленных растворов на основе β – фенилэтилового спирта//Теоретические основы химической технологии, 1996, том 30, № 5, с. 473-484.

365. Пономаренко В.С., Арефьев Ю.И. Градирни промышленных и энергетических предприятий: Справочное пособие / Под общей ред. В.С.Пономаренко. М.: Энергоиздат, 1998, 376 с.

366. Пономаренко В.С., Гладков В.Д. Использование полимерных материалов в конструкциях вентиляторных градирен большой производительности. В сб. докладов симпозиума СЭВ по теме 1-1.2, Татрански Штрба (ЧССР), 1986.

367. Попов Е.К. Исследование аэродинамических неоднородностей в реакторах с неподвижным слоем катализатора: Диссертация на соиск. уч. степени канд. техн. наук, 1980, Ярославль: НИИМСК, 150 с.

368. Попов Е.К., Абаев Г.Н. и др. Исследование различных устройств для создания однородной структуры слоя катализатора, в сборнике: Аэродинамика химических реакторов с неподвижным зернистым слоем, Новосибирск: Наука, 1985, с. 155-160.

369. Попов Е.К., Смирнова Е.В., Абаев Г.Н. и др. Вопросы исследования реакторов с неподвижным слоем катализатора, в сборнике: Аэродинамика химических реакторов. Новосибирск. Институт катализа СО АН СССР, СКГБ катализаторов МХШ, 1976, с. 65-70.

370. Постников В.П. ЖПХ, 1960, т.33, № 1, с.117

371. Проспект фирмы Гидронил, Лондон, 1965.

372. Пушнов А., Балтренас П., Каган А., Загорскис А. Аэродинамика воздухоочистных устройств с зернистым слоем. Вильнюс: Техника, 2010, 348 с.

373. Пушнов А., Петрашова Е. Структурная модель движения газового потока в колонных аппаратах с насадкой//ENERGETIKA, 2010, Т. 56, № 3-4, с. 279-284.

374. Пушнов А.С, Наумов Ю.Б., Каган А.М., Гельперин И.И., Пищик Л.Я. Влияние структуры укладки зерен шаровой формы в цилиндрических аппаратах на газораспределение в них. - Теплоэнергетика, 1986, № 8, с. 70-72.

375. Пушнов А.С. Газораспределение в контактных и адсорбционных аппаратах с неподвижным зернистым слоем. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. М.: ГИАП, 1987, 393с.
376. Пушнов А.С. Канд. дисс. М.: ГИАП, 1987, с. 353.
377. Пушнов А.С. Хим. пром., 2011, № 1, с. 20.
378. Пушнов А.С. Влияние неоднородности порозности зернистого слоя на газораспределение в многотрубных аппаратах // Химическое и нефтегазовое машиностроение, 2005, № 8, с. 9-10.
379. Пушнов А.С. Расчет средней порозности зернистого слоя // Химическое и нефтегазовое машиностроение, 2006, № 1, с. 9-10.
380. Пушнов А.С., Беренгартен М.Г., Рябушенко А.С. Возможности совершенствования аэродинамики градирен // Хим. пром., 2007, т. 84, № 8, с. 382-402.
381. Пушнов А.С., Каган А.М. Структура и гидродинамика колонных аппаратов с насадкой. Введение в химический инжиниринг. СПб. Издательство политехнического университета, 2011, с. 135.
382. Пушнов А.С., Каган А.М. Турбулентность в зернистом слое // Энциклопедия инженера-химика, 2010, № 3, с. 21; 2010, № 4, с. 24.
383. Пушнов А.С., Каган А.М., Зданавичюс Г.Б., Сурвила В.Ю. Труды АН Литовской ССР. Серия Б, 1980, т. 2 (117), с. 41.
384. Пушнов А.С., Наумов Ю.Б., Каган А.М. и др. Влияние структуры укладки зерен шаровой формы в цилиндрических аппаратах на газораспределение в них // Теплоэнергетика, 1986, № 8, с. 70-72.
385. Пушнов А.С., Каган А.М., Лагуткин М., Петрашова Е. Газораспределение в слое нерегулярной насадки // ENERGETIKA. 2010, Т.56, № 3-4, с.279-284.
386. Пушнов А.С., Петрашова Е.Н., Лагуткин М.Г. Газораспределение в слое нерегулярной кольцевой насадки//Химическая промышленность, 2010, Т. 87, № 6, с. 317-323.

387. Пушнов А.С., Петрашова Е.Н., Лагуткин М.Г. Геометрические характеристики регулярно уложенных кольцевых керамических насадок в колонных массообменных аппаратах//Химическая промышленность, 2010, Т.87, № 7, с. 350-352.

388. Пушнов А.С., Чиж К.В. Геометрические характеристики миникольцевых насадок для осуществления тепло- и массообменных процессов//Химическая техника, 2010, 3 7, с. 12-13.

389. Пушнов А.С., Каган А.М., Рябушенко А.С., Беренгартен М.Г., Елкеев Т.А., Шустиков А.И. Результаты аэродинамических и гидравлических испытаний полимерной блочной насадки для осуществления тепло- и массообменных процессов // Химическая техника, 2006, № 4, с.31-33.

390. Пушнов А.С., Каган А.М., Рябушенко А.С., Беренгартен М.Г. Геликоидно-структурная полимерная насадка для осуществления процессов тепломассообмена при непосредственном контакте фаз // Химическое и нефтегазовое машиностроение, 2007, № 10, с.7-9.

391. Пушнов А.С., Каган А.М., Рябушенко А.С., Беренгартен М.Г., Шишов В.И. Характеристики эффективных геликоидноструктурных насадок для испарительного охлаждения // Химическая промышленность сегодня, 2007, № 3, с.33-40.

392. Рамм В.М. Абсорбция газов, М., изд. Химия, 1976, с. 655.

393. Рамм В.М. Диссертация на соискание уч. ст. доктора техн. наук, М.: МИХМ, 1968.

394. Регулярные насадки для процессов абсорбции и ректификации (каталог фирмы «Sulzer Chemtech», 22.10.06. 40-XI.05).

395. Регулярные насадки из гофрированного листового металла Flexipac, Flexipac HC, Flexipac S, Intallox, Intallox STX, каталог фирмы «KOCH-GLITSCH».

396. Розен А.М. Масштабный переход в химической технологии, М.: Химия, 1980.

397. Розен А.М. Теория разделения изотопов в колоннах. М.: Атомиздат, 1960, 438 с.

398. Розенбаум Р.Б., Тодэс О.М. Труды Зап. Лен. горн. института, 1958, 36, № 3, с. 16.

399. Ролофф В.Ю., Каган А.М., Гельперин И.И. Потеря напора в неподвижном зернистом слое на участке его гидродинамической стабилизации, в книге: Производство азотных удобрений. Труды ГИАП. М., 1983, с. 124-130.

400. Рябушенко А.С., Пушнов А.С., Беренгартен М.Г. Регулярная металлическая насадка для осуществления тепло- и массообмена при непосредственном контакте фаз // Химическое и нефтегазовое машиностроение, 2006, № 6, с.14-15.

401. Свидетельство Российской Федерации на полезную модель №13950. Насадка для тепло- и массообменных аппаратов / Фарахов М.И., Ясавеев Х.Н., Лаптев А.Г. 20.06.2000. Бюл.№17.

402. Свидетельство Российской Федерации на полезную модель №17011. Регулярная насадка для массообменных аппаратов / Фарахов М.И., Елизаров В.В., Газизов Ш.Ф.10.03.2001. Бюл.№7.

403. Свидетельство Российской Федерации на полезную модель №17764. Насадка для массообменных колонн / Фарахов М.И., Кудряшов В.Н., Шигапов И.М., Лаптев А.Г. 27.04.2001. Бюл.№12.

404. Свидетельство Российской Федерации на полезную модель №19483. Регулярная насадка / Фарахов М.И., Садыков И.Х., Афанасьев И.П. 10.09.2001. Бюл.№25.

405. Свидетельство Российской Федерации на полезную модель №32705. Распределитель жидкости для массообменных аппаратов / Фарахов М.И., Бусыгин В.М., Мустафин Х.В., Трифионов С.В., Гильманов Х.Х. 27.09.2003. Бюл.№27.

406. Свидетельство Российской Федерации на полезную модель №13950. Регулярная насадка массообменных аппаратов / Фарахов М.И., Лаптев А.Г., Дьяконов Г.С. 27.09.2003. Бюл.№27.

407. Семенов П.А., Шварцштейн Я.В. Хим. пром., 1953, № 7, с. 26.

408. Семенова Т.А., Лейтес И.Л., Аксельрод Ю.Б., Маркин М.И., Сергеев С.П., Харьковская Е.Н. Очистка технологических газов, М., Химия, 1977.

409. Сепарационные колонны для дистилляции и абсорбции (каталог фирмы «Зульцер»).

410. Сергеев С.П. Аэродинамика и равномерное распределение потока в реакторах с неподвижными слоями катализатора. Новосибирск Наука, 1985, с. 131-143.

411. Сергеев С.П. Аэродинамика химических реакторов с неподвижными слоями катализатора, Новосибирск: Наука, 1985, с. 131.

412. Сокол Б.А., Чернышов А.К., Баранов Д.А. и др. Насадки массообменных колонн, ЗАО «Инфохим», М., 2009, 358 с.

413. Солодов П.А. Модернизация аппаратного оформления и технологической схемы установки получения моторных топлив: дис. ...канд. техн. наук. – Казань: КГТУ, 2001.

414. Сосна М.Х., Мейтин И.В., Завелев Е.Д., Семенов В.П. Хим. пром., 1976, № 7, с. 55.

415. Справочник азотчика, М.: Химия, 1967, Т.1, 2.

416. Стабников В.Н. Ректификационные аппараты, М., Машиностроение, 1965.

417. Стабников В.Н., Николаев А.П. Труды Киевского технологического института пищевой промышленности, 1960, вып. 22, с. 17.

418. Струминский В.В., Заичко Н.Д., Зимин В.Н., Радченко Е.Д. Проблемы современной аэродинамики, связанные с некоторыми технологическими процессами в химической и нефтехимической

промышленности в сб.: Механика многокомпонентных сред в технологических процессах. М.: Наука, 1978, с. 5-25.

419. Тараненко Г.В. Канд. дисс., М., ГИАП, 1987.

420. Третьяков А.П., Чен-Хуа-дин, Теплоэнергетика, 1959, № 11, с.64.

421. Тютюнников А.Б., Товажинский Л.Л., Гатлинская А.П. Основы расчета и конструирования массообменных колонн, Киев: Вища школа, 1989, 440 с.

422. Тютюнников А.Б., Товажнянский Л.Л., Готлинская А.П. Контактные элементы массообменных колонн.

423. Фарахов М.И. Энергоресурсосберегающие модернизации установок разделения и очистки газов и жидкостей на предприятиях нефтегазохимического комплекса: дис. ...докт. техн. наук. – Казань: КГТУ, 2009.

424. Фарахов М.И. Энергосбережение на установке разделения этаноламинов / М.И. Фарахов, Е.А. Лаптева // Изв. вузов. Проблемы энергетики. – 2008. - №7–8. – С. 133-137.

425. Фарахов М.И., Дьяконов Г.С., Семенов Д.Л., Шигапов И.М., Маряхин Н.Н. Гидродинамические исследования нерегулярной насадки «Инжехим-2003» // Тепломассообменные процессы и аппараты химической технологии: Межвуз. темат. сб. науч. тр. , 2003, с. 77-80.

426. Фарахов М.И., Лаптев А.Г., Минеев Н.Г. Насадочные контактные устройства для массообменных колонн // Химическая техника, 2009, №2, с. 4-6.

427. Фарахов М.И., Лаптев А.Г. Энерго- и ресурсосбережение при проведении процессов разделения и очистки веществ // Труды Академэнерго КНЦ РАН, 2008, №1, с.60-72.

428. Фарахов М.И., Лаптев А.Г., Минеев Н.Г. Энергосберегающие модернизации установок на предприятиях нефтегазохимического комплекса // Химическая техника, 2008, №12, с.4-7.

429. Фарахов Т.М. Многофункциональные контактные устройства смешения котельного топлива с присадками и очистки газовых выбросов ТЭС: дис. ...канд. техн. наук. – Казань: КГЭУ, 2011.

430. Фарахов Т.М., Башаров М.М., Шигапов И.М. Гидравлические характеристики новых высокоэффективных нерегулярных тепломассообменных насадок // Электронный научный журнал "Нефтегазовое дело", №2, 2011,-С.192-207. http://www.ogbus.ru/authors/Farakhov/Farakhov_1.pdf.

431. Фарахов Т.М., Лаптев А.Г. Оценка эффективности статических смесителей насадочного типа// Вестник КГЭУ, №4, 2010, -С. 20-25.

432. Хайлов В.С., Брандт Б.Б. Введение в технологию основного органического синтеза. Л., Химия, 1969, 560 с.

433. Хаппель Д., Бреннер Г. Гидродинамика при малых числах Рейнольдса, М.: Изд. «Мир», 1976.

434. Хафизов Ф.Ш., Фетисов В.И., Фаткуллин Р.Н. Конструкции регулярных насадок для массообменных процессов в колоннах аппаратов // Химическая промышленность, 2004, № 5, с.24-26.

435. Хафизов Ф.Ш., Фаткуллин Р.Н. Новая конструкция регулярной двутавровой насадки // Химическое и нефтегазовое машиностроение, 2005, № 6, с.11-12.

436. Хоблер Т. Массопередача и абсорбция, Л.: Химия, 1964.

437. Холпанов Л.П. Тепломассообмен пленочного течения жидкости // ТОХТ. – 1987. – Т.21, №1. – с.86-94.

438. Холпанов Л.П., Шкадов В.Я. Гидродинамика и тепломассообмен с поверхностью обмена. М.: Наука, 1990.

439. Хубер М., Майор В. Колонны Зульцера для вакуумной ректификации теплочувствительных веществ (Доклад фирмы «Sulzer»).

440. Цурикова Н.П., Пушнов А.С. Короткослоевая насадка для осуществления процесса испарительного охлаждения в градирне.

Ресурсосберегающие и энергоэффективные технологии в химической и нефтехимической промышленности. III Международная конференция Российского химического общества им. Д.И. Менделеева: тезисы докладов – М.: РХТУ им. Д.И. Менделеева, 2011, с.96-98.

441. Чернышев В.И. и др. Хим. пром., 1983, № 11, с. 688.

442. Чукин В.В., Кузнецов Р.Ф. Влияние скорости фильтрации слоя на распределение в нем газа // Известия ВУЗов. Черная металлургия, 1966, № 8, с. 47-49.

443. Чукин В.В., Кузнецов Р.Ф. Газораспределение в плотном слое // Инженерно-физический журнал, 1967, 13(1), с. 74-78.

444. Швартина Н.М. Хим. пром. за рубежом, 1987, № 10, 44

445. Шервуд Т., Пигфорд Р., Уилки Ч. Массопередача, М.: Химия, 1982.

446. Шигапов И.М. Повышение эффективности насадочных колонн щелочной очистки пирогаза в производстве этилена: Дис... канд. техн. наук. – Казань: КГТУ(КХТИ), 2000.

447. Шишко Э.Н., Гельперин И.И., Косяков Н.Е., Каган А.М. и др. Азотная промышленность, НИИТЭХИМ, М., 1981, с.17

448. Шишко Э.Н., Ногай И.В., Каган А.М. и др. Метанол и его переработка, Сб. научных трудов НИИТЭХИМ, 1985, с. 78.

449. Шульга Н.А. Хим. и нефтяное машиностроение, 1986, № 3, с.7

450. Юкельсон И.И. Технология основного органического синтеза, М., Химия, 1968.

451. Ясавеев Х.Н. Реконструкция дебутанизатора и изопентановой колонн на ГФУ с целью повышения эффективности процесса ректификации: дис. ...канд. техн. наук. – Казань: КГТУ, 1998.

452. Ясавеев Х.Н., Лаптев А.Г., Фарахов М.И. Модернизация установок переработки углеводородных смесей, Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2004, 307 с.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	5
Глава 1. Области применения тепломассообменных насадочных устройств.....	14
1.1. Процессы с использованием насадочных устройств.....	14
1.2. Области и масштабы использования.....	19
Глава 2. Характеристика насадочных контактных устройств.....	25
2.1. Геометрические характеристики.....	25
2.2. Технические характеристики.....	40
2.3. Материалы.....	45
2.4. Требования, предъявляемые к насадкам.....	51
Глава 3. Конструкции промышленных насадочных контактных устройств.....	54
3.1. Классификация насадок.....	54
3.2. Нерегулярные насадки.....	62
3.3. Регулярные насадки.....	74
3.4. Насадки «Инжехим».....	80
3.5. Сравнительная оценка насадок разной конструкции.....	94
Глава 4. Общие сведения о движении потоков и процессах переноса в аппаратах с насадочными контактными устройствами.....	118
4.1. Структура насадочного слоя.....	118
4.2. Особенности движения потоков жидкости и газа через слой насадки.....	128
4.2.1. Движение жидкости через слой насадки.....	128
4.2.2. Движение газа через слой насадки.....	132
4.2.3. Гидродинамические режимы при двухфазном движении потоков через насадку.....	142
4.2.4. Распределение и перемешивание потоков.....	146

4.2.5. Гидродинамическая стабилизация в слое насадки.....	149
4.2.6. Масштабный фактор в насадочных слоях.....	159
4.3. Массообменные процессы.....	163
4.3.1. Процесс переноса вещества.....	163
4.3.2. Массообменные характеристики.....	166
Глава 5. Влияние геометрических характеристик насадки на эффективность массопереноса и потерю напора.....	171
5.1. Перепад давления.....	171
5.2. Влияние размера насадочных элементов и их удельной поверхности.....	175
5.3. Влияние размера перфорации.....	188
5.4. Влияние площади перфорации.....	196
Глава 6. Связь эффективности с гидравлическим сопротивлением нерегулярных теплообменных насадок	201
6.1. Гидравлическое сопротивление и объемные коэффициенты.....	201
6.2. Модель противоточного движения фаз и объемные коэффициенты.....	206
Глава 7. Активная поверхность в насадочном слое.....	213
7.1. Понятие об активной поверхности в насадочном слое.....	213
7.2. Формирование активной поверхности.....	217
7.3. Влияние различных факторов на величину активной поверхности.....	219
7.4. Определение активной поверхности.....	225
Глава 8. Роль активной поверхности в процессах массопереноса.....	234
8.1. Определяющая роль активной поверхности в процессах массопереноса.....	234
8.2. Соотношение геометрической и активной поверхности и коэффициенты полезного использования насадки.....	236
8.3. Возможности увеличения активной поверхности насадки.....	248

Глава 9. Структурные модели насадочных аппаратов.....	252
9.1. Структурная модель движения газового потока в аппаратах с насыпной насадкой.....	252
9.1.1. Геометрические и гидродинамические параметры структурной модели.....	259
9.1.2. Применение структурной модели в расчетах насадочных колонных аппаратов.....	268
Глава 10. Математические модели и расчеты насадочных аппаратов основные положения.....	280
10.1. Теоретические основы моделирование тепло- и массоотдачи в насадочных аппаратах.....	280
10.2. Расчет аппаратов для осуществления массообменных процессов.....	298
10.2.1. Выбор конструкции насадки.....	298
10.2.2. Выбор оптимального размера насадки.....	301
10.2.3. Выбор скорости газа и расчет диаметра колонны.....	303
10.2.4. Расчет высоты насадочного слоя.....	307
10.2.5. Расчет гидравлического сопротивления.....	316
10.2.6. Расчет количества удерживаемой жидкости.....	320
10.3. Расчет аппаратов для теплообмена при непосредственном контакте фаз (скрубберов).....	322
Глава 11. Гидродинамические и массообменные характеристики насадок «Инжехим».....	327
11.1. Конструирование насадочных контактных устройств.....	327
11.2. Экспериментальное исследование гидравлических характеристик сегментной регулярной насадки.....	330
11.3. Результаты гидравлических исследований регулярной рулонной гофрированной насадки.....	340

11.4. Результаты экспериментальных исследований регулярной насадки IRG.....	347
11.5. Результаты экспериментальных исследований нерегулярных насадок «Инжехим».....	354
11.6. Характеристики регулярной насадки ВІМ.....	367
11.7. Численные исследования регулярной насадки.....	371

Глава 12. Перспективы интенсификации работы аппаратов с насадкой.....

12.1. Возможные дальнейшие пути совершенствования конструкций насадок.....	378
12.2. Увеличение рабочей скорости газа.....	385
12.3. Использование колонн различного диаметра по высоте.....	390
12.4. Создание многослойных колонных насадочных аппаратов из коротких слоев, соответствующих участку гидродинамической стабилизации в насадочном слое.....	392
12.5. Снижение отрицательного влияния масштабного фактора.....	394
12.6. Организация различных направлений движения потоков.....	395
12.7. Работа в режиме инверсии фаз.....	400
12.8. Комбинирование различных контактных устройств.....	403
12.8.1. Комбинирование тарельчатого и насадочного контактного устройства.....	403
12.8. 2. Комбинирование насадочных контактных устройств.....	405
12.9. Использование движущихся насадок.....	406
12.10. Другие способы интенсификации процессов тепло- и массопереноса.....	408

Научное издание

*Каган Александр Моисеевич
Лаптев Анатолий Григорьевич
Пушинов Александр Сергеевич
Фарахов Мансур Инсафович*

КОНТАКТНЫЕ НАСАДКИ ПРОМЫШЛЕННЫХ ТЕПЛОМАССОБМЕННЫХ АППАРАТОВ

Монография

Технический редактор Кириченко А.В.

Компьютерная Верстка – Наскаева Р.И., Шаронова М.М.

Редактор – Колесов Д.В.

Издательство «Отечество»
420111, г. Казань, ул. Лево-Булачная, 24

Сдано в набор 20.04.2013. Подписано в печать 25.05.2013.
Форм. бум. 60x84 1/16. Печ. л. 28,5. Тираж 500. Заказ №1504/6.
Отпечатано с готового оригинала – макета в типографии «Вестфалика»
420111, г. Казань, ул. Московская, 22. Тел.: 292-98-92

westfalika@inbox.ru

Александр Моисеевич Каган (1930 - 2012) Последние годы своей жизни провел в США. Окончил институт тонкой химической технологии им. Ломоносова. Длительное время работал ГИАП, где прошел все ступени от инженера-проектировщика до заведующего лабораторией. Кандидатскую диссертацию защитил в ГИАП в 1966 году по теме "Исследование конвективного переноса тепла в трубах с сернистыми материалами". Был основателем и руководителем фирмы "АКС", в которой под его руководством были разработаны и внедрены на 40 промышленных объектах новые эффективные насадки для осуществления процесса испарительного охлаждения в градирнях. Круг научных интересов: теплообмен и гидродинамика в аппаратах с зернистым слоем, колонные аппараты химической технологии, насадки для осуществления тепло- и массообменных процессов. Длительное время преподавал в МИТХТ, где читал лекции по курсу "Процессы и аппараты химической технологии". Автор более 100 статей и 4 монографий.

Анатолий Григорьевич Лаптев – доктор технических наук (1995 г), профессор, с 2001 года заведующий кафедрой «Технология воды и топлива» Казанского государственного энергетического университета. В 1978 г. окончил КХТИ. С 1978 г. по 2001 г. работал в КХТИ (КГТУ) инженером, доцентом, профессором, заведующим кафедрой. С 1994 года работал ведущим специалистом, а с 2004 года заместитель директора по научной работе в ИВЦ «Инжехим». Общее количество публикаций более 300 из них 8 учебных пособий, 15 монографий, 8 авторских свидетельств. Подготовил более 25 кандидатов технических наук и 4 доктора технических наук по специальностям ПАХТ, ПТЭ, ТЭС и ТОТ. Имеет более 50 внедренных научно – технических разработок на предприятиях нефтегазохимического комплекса.

[http:// www.laptevag.ru](http://www.laptevag.ru)

Александр Сергеевич Пушнов в 1966 г. окончил МВТУ им. Н. Э. Баумана. С 1966 г. по 2006 г. работал в институте ГИАП в должности младшего научного сотрудника, старшего инженера, старшего научного сотрудника, заведующего лабораторией. В 1987 г. защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук. В 2006 – 2007 гг. работал заведующим лабораторией по насадкам в ООО «РИНВО». С 2007 г. по настоящее время – старший научный сотрудник кафедры ЮНЕСКО «Техника экологически чистых производств» МГУИЭ (г. Москва). Область научных интересов – аэродинамика аппаратов с неподвижным зернистым слоем, регулярные и нерегулярные насадки для осуществления тепло- и массообменных процессов, градирни, экология городского хозяйства. Автор более 110 научных публикаций и патентов.

Мансур Инсафович Фарахов – основатель (в 1991 г.) и директор Инженерно – Внедренческого Центра «Инжехим», одной из немногих фирм в РФ по проектированию, изготовлению и внедрению различного оборудования для нефтегазохимического комплекса. Профессор КНИТУ (КХТИ). В 2009 г. защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук. Общее количество публикаций более 150, 8 монографий, более 30 патентов и авторских свидетельств. Подготовил 8 кандидатов технических наук. Имеет более 100 внедренных научно – технических разработок в различных отраслях промышленности.

[http:// www.ingehim.ru](http://www.ingehim.ru)