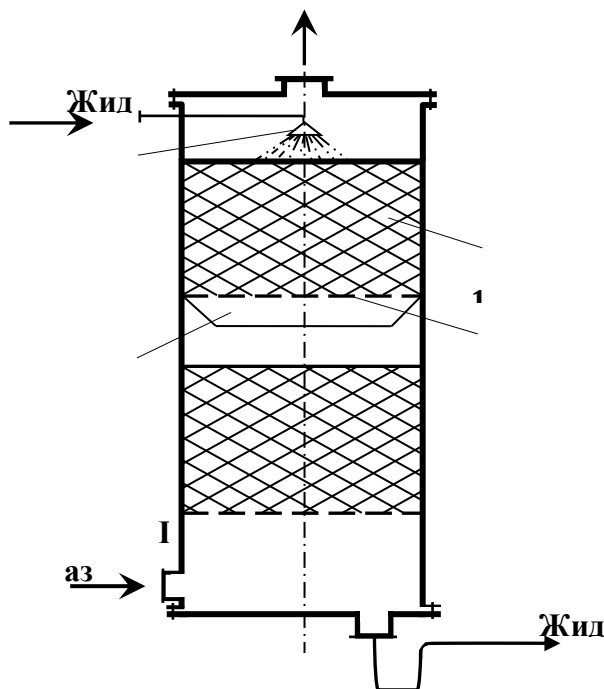


Устройство и принцип действия насадочной колонны

В насадочной колонне (рисунок 1) насадка 1 укладывается на опорные решетки 2, имеющие отверстия или щели для прохождения газа и стока жидкости. Жидкость с помощью распределителя 3 равномерно орошает насадочные тела и стекает вниз.



1 — насадка; 2 — опорная решетка; 3 — распределитель жидкости;
4 — перераспределитель жидкости

Рисунок 1 - Насадочная колонна

По всей высоте слоя насадки равномерное распределение жидкости по сечению колонны обычно не достигается, что объясняется пристеночным эффектом — большей плотностью укладки насадки в центральной части колонны, чем у ее стенок. Вследствие этого жидкость имеет тенденцию растекаться от центральной части колонны к ее стенкам. Поэтому для улучшения смачивания насадки в колоннах большого диаметра насадку иногда укладывают слоями (секциями) высотой $(3\div 5)D$ и под каждой секцией, кроме нижней, устанавливают перераспределители жидкости 4.

В насадочной колонне жидкость течет по элементу насадки главным образом в виде тонкой пленки, поэтому поверхностью контакта фаз является в основном смоченная поверхность насадки, и насадочные аппараты можно

рассматривать как разновидность пленочных. Однако в последних пленочное течение жидкости происходит по всей высоте аппарата, а в насадочных колоннах — только по высоте элемента насадки. При перетекании жидкости с одного элемента насадки на другой пленка жидкости разрушается и на нижележащем элементе образуется новая пленка. При этом часть жидкости проходит через расположенные ниже слои насадки в виде струек, капель и брызг. Часть поверхности насадки бывает смочена неподвижной (застойной) жидкостью.

Основными конструктивными характеристиками насадки являются ее удельная поверхность и свободный объем.

Удельная поверхность насадки σ (а) — это суммарная поверхность насадочных тел в единице занимаемого насадкой объема аппарата. Удельную поверхность обычно измеряют в $\text{м}^2/\text{м}^3$. Чем больше удельная поверхность насадки, тем выше эффективность колонны, но ниже пропускная способность и больше гидравлическое сопротивление.

Под **свободным объемом насадки ε** понимают суммарный объем пустот между насадочными телами в единице объема, занимаемого насадкой. Свободный объем измеряют в $\text{м}^3/\text{м}^3$. Чем больше свободный объем насадки, тем выше ее пропускная способность и меньше гидравлическое сопротивление, однако при этом снижается эффективность работы насадки.

Конструкции насадок, применяемых в промышленных аппаратах можно разделить на две группы — нерегулярные (насыпные) и регулярные насадки.

В зависимости от используемого для изготовления насадки материала они разделяются на металлические, керамические, пластмассовые, стеклянные, стеклопластиковые и др.

Классификация насадок

В последнее время заметно повысилась конкурентоспособность насадочных колонн (НК) по сравнению с колоннами тарельчатого типа, что объясняется более низким гидравлическим сопротивлением НК, возможностью их работы при более высоких нагрузках по газу и жидкости, простотой конструкции и монтажа, более низкой стоимостью.

Для достижения высоких технологических показателей насадка должна иметь большую долю свободного объема (что обеспечивает хорошие гидродинамические характеристики) и развитую удельную геометрическую поверхность (необходимое условие для получения высоких массообменных характеристик). При выборе насадки необходимо также учитывать высоту, эквивалентную теоретической ступени контакта (ВЭТТ), или высоту единицы переноса (ВЕР), а также смачиваемость насадки.

За последние десятилетия появилось не только много модификаций известных конструкций, но и насадки принципиально новых форм. Появились также новые материалы для их изготовления.

Для улучшения смачиваемости элементов насадки их зачастую подвергают специальной обработке, создают искусственным путем шероховатости или делают на поверхности просечки, выступы и т. д.

По способу изготовления элементы насадки бывают штампованные, литые, прокатанные, полученные методом экструзии и т. п.

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. 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 могут занимать 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.

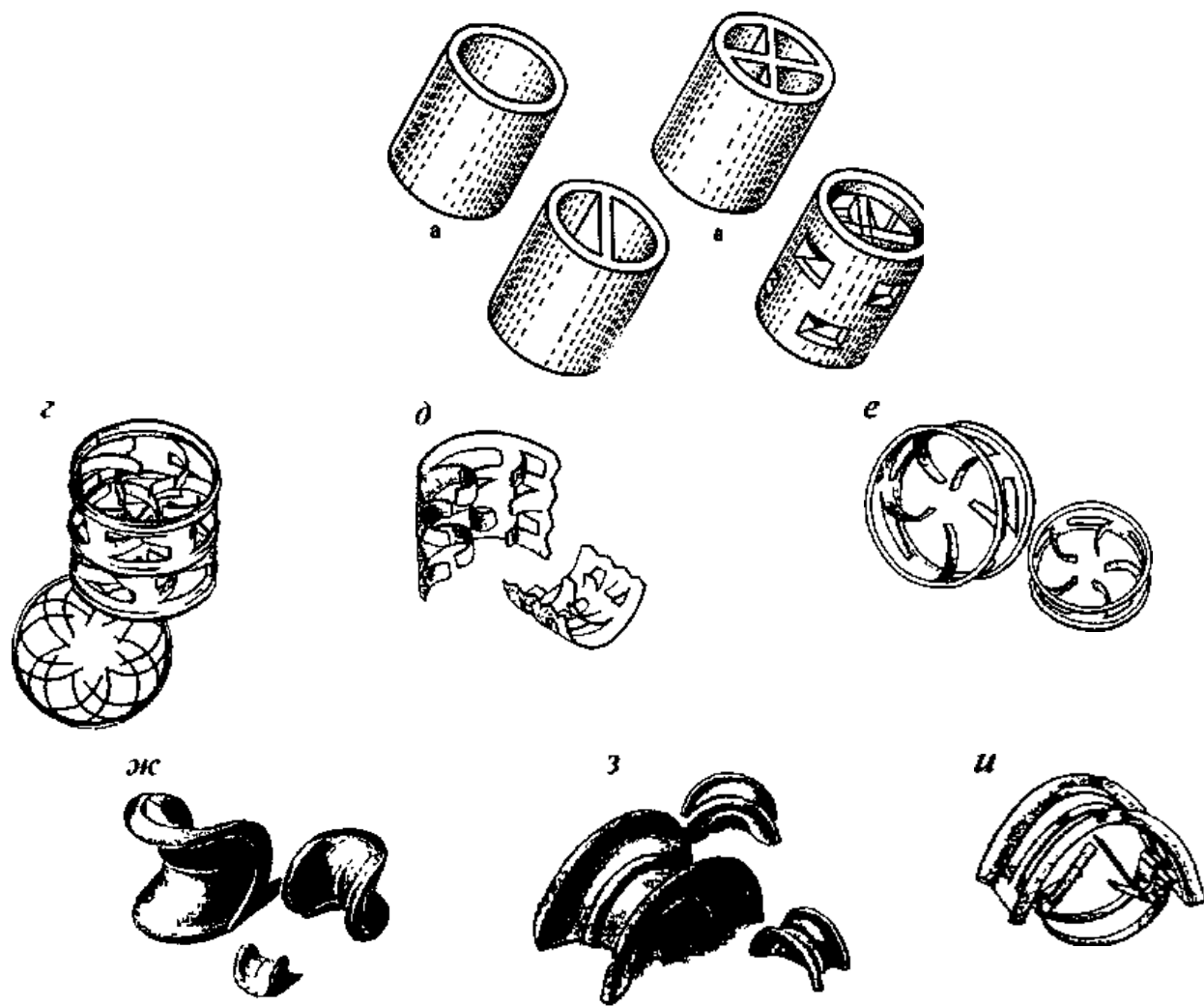
Нерегулярные насадки, в свою очередь, можно разделить на насадки с элементами неправильной формы и насадки с элементами правильной геометрической формы.

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, конические, спиральные, S-образные, винтовые, седлообразные и насадки без преобладания одной какой-либо правильной геометрической формы. Каждый из этих видов может иметь различную запатентованную конструкцию. Наконец, насадка каждой из конструкций может изготавливаться из различного материала, что может привносить некоторые конструктивные особенности. Существенным при выборе материала при изготовлении насадок является также смачиваемость поверхности.

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

Среди насадок, засыпаемых внавал, широкое распространение получили кольца Рашига, представляющие собой отрезки труб, высота которых

равна наружному диаметру (рисунке 2, а). Низкая стоимость и простота изготовления колец Рашига делают их одним из самых распространенных типов насадок. Наряду с гладкими цилиндрическими кольцами из металла, керамики или фарфора разработаны насадки с ребристыми наружной и (или) внутренней поверхностями.



а — кольца Рашига, б — кольца Рашига с перегородками, в — кольца Палля,

г — кольца Ну-Пак фирмы "Norton", д — полукольца Levarpak, е — кольца Cascade Mini-Rings фирмы "Glitch", ж - седла Берля, з — седла Инталлокс, и — седла Инталлокс фирмы "Norton".

Рисунок 2 - Нерегулярные (насыпные) насадки

Для интенсификации процесса массообмена разработаны конструкции цилиндрических насадок с перегородками диаметрально расположенными, крестообразными или выполненными в виде лопастей (рисунок 2, б). По

сравнению с другими типами насадок кольца Рашига обладают относительно невысокой производительностью и сравнительно высоким сопротивлением.

Промышленное использование в настоящее время нашла одна из разновидностей кольцевых насадок — кольца Палля (рисунок 2, в). При изготовлении таких колец на боковых стенках сделаны два ряда прямоугольных, смещенных относительно друг друга надрезов, лепестки которых отогнуты внутрь насадки. Конструкция колец Палля по сравнению с кольцами Рашига позволяет при их близких геометрических параметрах в 1,2 раза увеличить пропускную способность, в 1,6 - 4 раза снизить гидравлическое сопротивление и почти на 25 % увеличить ее эффективность.

На рисунке 2, г приведена насадка Ну-Рак (Хай-Пек), разработанная фирмой "Norton". Она представляет собой цилиндрические кольца, на боковой поверхности которых также выполнены отверстия, но в отличие от колец Палля каждый лепесток кроме того разрезан вдоль и отогнут внутри кольца в противоположные стороны. Боковая поверхность элемента имеет три кольцевых ребра жесткости, что обеспечивает определенный зазор между кольцами в слое и увеличивает долю свободного объема. Во внутренней полости колец Ну-Рак происходит турбулизация парового потока и интенсивное дробление жидкости, что позволяет по сравнению с кольцами Палля при близких гидродинамических показателях увеличить интенсивность массообмена на 10 - 30 %.

На рисунке 2, д показана насадка Levapak усовершенствованной конструкции, выполненная из колец, разрезанных по образующей на две части, каждая из которых имеет два или три ряда отверстий с язычками разной длины, отогнутыми в смежных рядах в разные стороны. Такая насадка образует слой с равномерно распределенной порозностью и насыпной плотностью, что способствует более равномерному распределению жидкости в слое. Боковые кромки элементов насадки имеют зубцы, что также способствует дополнительному дроблению и турбулизации потоков. Насадка Levapak превосходит кольца Палля по эффективности массопередачи в

среднем на 27 % и имеет более низкое (на 23 %) гидравлическое сопротивление.

На рисунке 2, *е* показана насыпная насадка Cascade Mini-Rings фирмы "Glitch". На боковой стенке таких колец выполнен один ряд просечек, лепестки отогнуты внутрь кольца. При загрузке элементов насадки в аппарат осуществляется принцип автоориентации, т.е. кольца в слое ориентируются предпочтительно в открытом для потока паров положении, что обеспечивает равномерное распределение потока жидкости по поверхности насадки, высокую пропускную способность и малое гидравлическое сопротивление.

Миникольцевые насадки. Эти насадки имеют форму цилиндра, высота которого меньше диаметра. Наибольшее применение получили насадки этой группы, у которых высота равнялась 0,5 диаметра, перфорированные с лепестками отогнутыми во внутрь кольца.

К полукольцевым можно отнести насадки, элементы которых образованы двумя полукольцами, оси которых взаимно перпендикулярны.

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, а S-образные — высотой элемента.

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, керамики или металла.

Основным отличием седлообразных насадок от цилиндрических является их высокая способность к перераспределению потоков жидкости по сечению аппарата. Седла Берля (рисунок 2, *ж*), поверхность которых представляет гиперболический параболоид, по сравнению с кольцами Рашига при

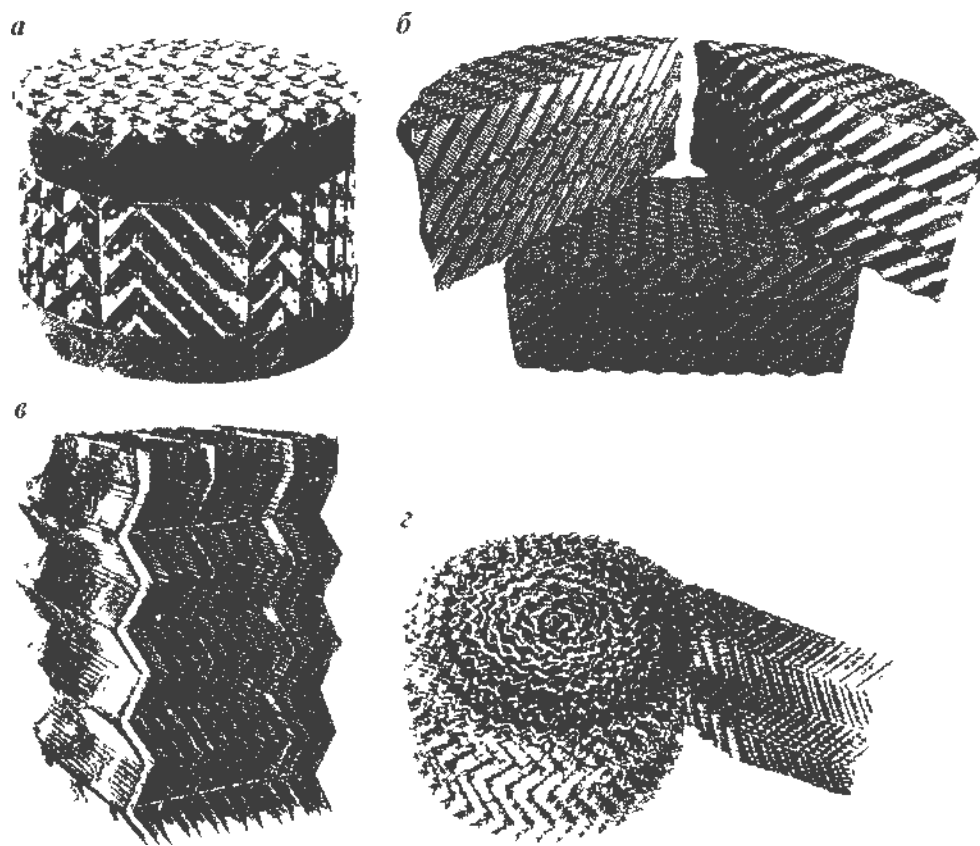
одинаковых размерах насадочных тел имеют примерно на 25 % большую удельную поверхность и обладают меньшим гидравлическим сопротивлением.

Насадка (рисунок 2, з), известная как седла Инталлокс, является сегодня наиболее распространенной керамической насадкой. Поверхность ее представляет часть тора. Седла Инталлокс по сравнению с седлами Берля проще в изготовлении, обладают большей механической прочностью, обеспечивают большую однородность размещения насадки и не создают предпочтительных путей для протекания жидкости.

Особое место среди седловидных насадок занимают металлические седла Инталлокс фирмы "Norton" (рисунок 2, и), образованные дугообразной отбортованной полоской с выштампованной перегородкой и отогнутыми внутрь лепестками. Опыт эксплуатации промышленных аппаратов показал, что эта насадка обеспечивает высокую эффективность даже при низких нагрузках, хорошее самораспределение жидкости, механическую прочность, небольшую массу и давление на стенку аппарата.

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 гофра, расстоянием между ними, конфигурацией перфорации и другими деталями. Такие насадки могут изготавливаться из полимерного материала и металла. 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. Широко распространенная сетчатая гофрированная насадка фирмы "Зульцер" обладает высокой эффективностью и низким гидравлическим сопротивлением, поэтому она широко используется для разделения трудноразделяемых компонентов, а также для ректификации под вакуумом, где лимитирует ΔP .

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. 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.



a — Меллапак фирмы "Sulzer", *б* — Инталлокс фирмы "Norton",
в — Ваку-пак, *г* — Панченкова
 Рисунок 3 - Регулярные насадки

На рисунке 3 приведены варианты регулярной блочной насадки. Известны регулярные насадки фирмы "Sulzer", представляющие собой пакет гофрированных листов. Гофрирование листов выполнено под фиксированным к вертикальной оси углом (чаще 30° или 45°) и на смежных листах направлено

в противоположные стороны. Имеются модификации такой насадки, изготавливаемые из различных материалов, стального рифленого листа, пластмассы, керамики, фарфора, стекла, графитового волокна. Для колонн диаметром от 200 до 12 000 мм фирма "Sulzer" рекомендует насадку Меллапак, выпускаемую 12 типов. На рисунке 3, а показан элемент насадки Меллапак 250 Y (число характеризует величину удельной поверхности насадки в $\text{м}^2/\text{м}^3$, а Y указывает на то, что гофрирование листов выполнено под углом 45°).

Конструкция блочной регулярной насадки Инталлокс, разработанная фирмой "Norton", представлена на рисунке 3, б и образована из стальных гофрированных листов.

Каждый лист при гофрировании делится на несколько участков (на рис. 3, б три участка) с отгибкой металла в противоположные стороны. В местах перехода выполняются просечки, что способствует эффективному обновлению поверхности массообмена.

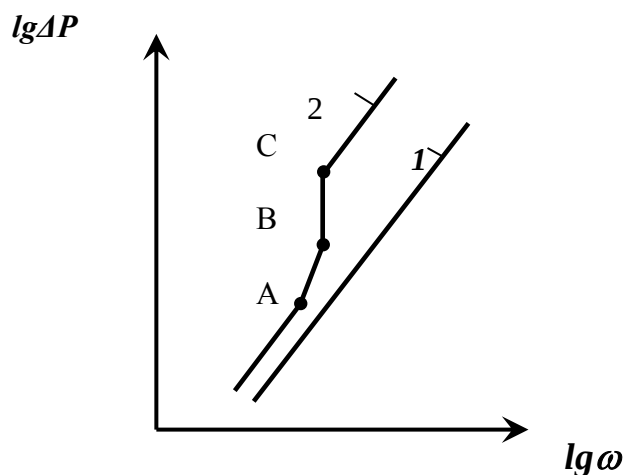
Насадка Вакупак разработана совместно ВНИИнефтемашем и фирмой "Apparate-und Anlagenbau Germania" (рисунок 3, в). Она образована из вертикальных гофрированных пластин, изготовленных из просечно-вытяжного листа. Поверхность пластин имеет арочные просечки, направленные вниз и ориентированные в противоположные стороны с обеих сторон пластин. За счет этих просечек обеспечивается зазор в 20 мм между соседними гофрированными пластинами. Такая насадка имеет удельную поверхность $115 \text{ м}^2/\text{м}^3$, свободный объем 98 % и объемную массу $150 \text{ кг}/\text{м}^3$.

Среди регулярных насадок получили распространение сетчатые насадки, к которым относится и насадка, разработанная Г.М. Панченковым (рис. 3, г). Насадка Панченкова представляет сотканную из пучка металлических проволочек ленту, поверхность которой гофрирована в форме шеврона с углом при вершине 120° . Такую насадку в колонне устанавливают в виде рулонов высотой 100 мм, расположенных друг над другом и плотно прилегающих к стенке колонны.

Гидравлические условия работы насадочных колонн

В насадочной колонне потоки газа (пара) и жидкости взаимодействуют в противотоке. В зависимости от нагрузок колонны по газу (пару) G и жидкости L изменяется характер взаимодействия фаз, проявляющийся в различных гидродинамических режимах. Наиболее четко эти режимы выявляются на кривых, показывающих зависимость сопротивления насадки от ее нагрузки по газу (пару) и жидкости, построенных в логарифмических координатах (рисунок 2).

При малых нагрузках потоков взаимодействие между фазами незначительно. Жидкость смачивает поверхность насадочных элементов, а сопротивление насадки потоку пропорционально сопротивлению сухой насадки. Это так называемый *пленочный* режим. Пленочный режим заканчивается в первой переходной точке (точка A , рис. 2), называемой точкой подвисяния.



1 — сухая насадка; 2 — орошаемая насадка

Рисунок 2 - Зависимость гидравлического сопротивления насадки от скорости газа в колонне ($L = \text{const}$)

При дальнейшем увеличении скоростей потоков контактирующих фаз возрастает трение между ними, происходит торможение потока жидкости и в связи с этим увеличивается количество жидкости H_0 , удерживаемой в насадке. Этот режим характеризуется как начало *подвисяния жидкости* и принимается в качестве нижнего предела устойчивой работы колонны. При больших жидкостных нагрузках этот режим выявляется не всегда четко. Сопротивление насадки в режиме подвисяния пропорционально скорости газа в степени 3-4. Интенсивность массопередачи в этом режиме сильно возрастает. Этот режим заканчивается во второй переходной точке (точка *B*, рисунок 2).

Дальнейшее увеличение скоростей взаимодействующих фаз приводит к еще большему увеличению сопротивления насадки и количества удерживаемой жидкости в объеме, занятом насадкой. При определенных величинах газовой и жидкостной нагрузок происходит резкое увеличение количества удерживаемой насадкой жидкости и рост гидравлического сопротивления слоя насадки. Этот режим называется *захлебыванием колонны* и считается верхним пределом ее устойчивой работы (*BC*). Количество удерживаемой насадкой жидкости зависит от удельной поверхности насадки a , доли свободного объема ε , скоростей движения взаимодействующих фаз. Полную задержку жидкости H_0 рассматривают как сумму двух составляющих: статической задержки H_c и динамической H_d . Статическая составляющая H_c определяет объем жидкости, удерживаемый насадкой за счет капиллярных сил, и не зависит от гидродинамических условий. Динамическая составляющая задержки H_d обусловлена гидродинамическим взаимодействием потоков газа и жидкости с насадочными телами.

Режим захлебывания характеризуется значительным количеством жидкости, удерживаемым на насадке, при этом сильно возрастает поверхность контакта фаз и интенсифицируется процесс массообмена. Однако при этом резко возрастает сопротивление движению потока газа. Поэтому для обеспечения эффективного массообмена при относительно небольшом

гидравлическом сопротивлении желательно, чтобы гидродинамический режим работы колонны был, возможно, ближе к режиму захлебывания, но не достигал его, т. е. рабочая скорость пара в колонне ω должна быть меньше, чем скорость захлебывания $\omega_{захл}$. Обычно принимают, что эти скорости связаны соотношением:

$$\omega = (0.75 \div 0.85) \omega_{захл} . \quad (1)$$

Для колонн, работающих под вакуумом, с целью снижения потерь давления по высоте колонны рекомендуется принимать более низкие значения рабочей скорости: $\omega = (0.5 \div 0.7) \omega_{захл}$.

Насадка занимает только часть объема колонны, поэтому скорость движения газа в каналах между элементами насадки выше, чем скорость, отнесенная к свободному сечению аппарата. Скорость движения газа в сухой насадке составляет:

$$\omega_0 = \omega / \varepsilon . \quad (2)$$

Действительная скорость пара при работе колонны будет несколько выше скорости ω_0 , так как в этом случае часть свободного объема насадки занята стекающей по ней жидкостью.

Для расчета скорости захлебывания имеются различные уравнения, в том числе уравнение:

$$\lg \left(\frac{\omega_{захл}^2 \cdot a}{g \varepsilon^3} \cdot \frac{\rho_g}{\rho_{жс}} \cdot \mu_{жс}^{0,16} \right) = A - B \left(\frac{L}{G} \right)^{1/4} \left(\frac{\rho_g}{\rho_{жс}} \right)^{1/8} \quad (3)$$

где ε — свободное сечение насадки, м²/м²;

a — удельная поверхность насадки, м²/м³;

$\rho_g, \rho_{жс}$ — плотности газовой смеси и жидкости при рабочих условиях в колонне соответственно, кг/м³;

$\mu_{жс}$ — вязкость жидкости при рабочей температуре, мПа·с;

L и G — массовые расходы жидкости и газа, кг/с;

Коэффициенты A и B в уравнении определяются экспериментально и зависят от условий эксплуатации аппарата, конструкции элементов насадки и ее размеров. Определив скорость захлебывания, из уравнения (1) находят рабочую скорость газа и затем, зная величину заданной производительности по газовой смеси, определяют диаметр колонны.