

ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

М. Е. ПОЗИН и И. П. МУХЛЕНОВ

О ПЕННОМ РЕЖИМЕ ОБРАБОТКИ ГАЗО-ЖИДКОСТНЫХ СИСТЕМ

(Представлено академиком С. И. Вольфовичем 22 VI 1953)

Повышение турбулентности двухфазного газо-жидкостного потока приводит к усилению непрерывного проникновения вихрей каждой из фаз через границу их раздела, т. е. к ее увеличению за счет работы против силы поверхностного натяжения. Следствием непрерывного обновления является уменьшение среднего «возраста» поверхности. Наконец, повышение турбулентности приводит к возрастанию вихревого обмена и, в частности, к переносу массы или тепла по направлению к границе раздела фаз «конвективной диффузией». В результате этого уменьшаются эффективные толщины диффузионных (или термических) сопротивлений.

Следовательно, турбулизация газо-жидкостной системы является универсальным средством интенсификации протекающих в ней процессов тепло- и массообмена. Одним из способов турбулизации такой системы является превращение ее в сильно подвижную, нестабильную пену, достигаемое за счет кинетической энергии газа. В отличие от стойкой, структурированной пены подвижная, турбулизованная пена является средой, в которой диффузионные процессы протекают с особенно большой скоростью.

При барботаже пузырьки газа, всплывающие под действием подъемной силы в слое жидкости, обладают весьма малой массой и небольшой скоростью. Поэтому кинетическая энергия пузырьков мала и ее может нехватить для преодоления механической прочности адсорбционного слоя на поверхности раздела жидкость — газ. В этом случае под зеркалом жидкости образуется слой малоподвижной пены. Вследствие кинетического стабилизирующего действия поверхности адсорбционных слоев, обладающих к тому же в той или иной мере особыми структурно-механическими свойствами, а также вследствие расклинивающего действия сольватных оболочек, пузыри такой пены могут существовать в течение значительного времени, а затем разрушаются в результате действия силы тяжести и всасывания жидкости в треугольники Гиббса. Естественно, что коалесценция и полное разрушение пены происходят в верхней части слоя пены, в основном на наружной поверхности, имеющей больший возраст.

При определенной массовой скорости барботируемого газа толщина слоя пены зависит от продолжительности жизни пленок жидкости, т. е. от поверхностных свойств системы и ее геометрических параметров. Но для каждой данной системы эту толщину слоя пены над слоем барботажа можно менять путем изменения массовой скорости газа.

Обозначим скорость разрушения пены $\omega = dH_n/\tau = f(T)$, где H_n — высота слоя пены, τ — время, T — совокупность физико-химических свойств системы и других параметров, влияющих на скорость ее разрушения. Если удельные веса жидкости, газа и пены, соответственно, $\gamma_{ж}$,

γ_r и γ_n , то объемная доля газа в пене или коэффициент газонаполнения составляет

$$m = \frac{\gamma_{ж} - \gamma_n}{\gamma_{ж} - \gamma_r}$$

При скорости разрушения пены ω м/сек, линейная скорость газа, отходящего от поверхности слоя разрушающейся пены:

$$\omega_{\alpha} = \omega m = \omega \frac{\gamma_{ж} - \gamma_n}{\gamma_{ж} - \gamma_r} \text{ м/сек.}$$

Следовательно, если газ будет пропускаться с такой линейной скоростью ω_{α} в полном сечении аппарата, то толщина слоя пены будет оставаться неизменной, так как при этом количество газа, подводимого к зоне барботажа, а следовательно, и к зоне пены снизу, будет равно количеству газа, отходящего от разрушающейся поверхности пены.

Если бы скорость разрушения пены ω не зависела от высоты слоя пены H_n , то величина ω_{α} была бы той критической скоростью, ниже которой пена вообще не могла бы возникнуть и выше которой вся жидкость на решетке превращалась бы в пенный слой. Но в совокупность T входит и величина H_n , от которой зависит ω . Поэтому скорость ω_{α} не является критической, и когда скорость газа ω в полном сечении аппарата постепенно снижается от ω_c до меньших значений, слой пены не исчезает, а постепенно уменьшается; когда же скорость газа ω возрастает, слой пены постепенно увеличивается. Высота слоя пены над зоной барботажа и скорость газа связаны сложной зависимостью, которая для каждой системы может быть установлена пока только экспериментально.

Если осуществить барботажа газа через жидкость на бесколпачковой тарелке — перфорированной решетке (ситчатая тарелка), обеспечивающей равномерное распределение газа по сечению аппарата, то при постепенном увеличении объемной скорости газа, или, что то же, линейной скорости газа в общем сечении аппарата, толщина слоя пены будет увеличиваться за счет уменьшения толщины слоя барботажа и при некоторой скорости газа слой барботажа практически исчезнет. При этом вся жидкость на тарелке будет находиться в слое ячеистой пены, так как брызгообразование почти не наблюдается.

При дальнейшем увеличении скорости газа жидкость продолжает оставаться на тарелке в виде пенного слоя, но структура пены меняется — она становится подвижной, превращается в сильно турбулизованную газо-жидкостную систему. Такая пена представляет собой полувзвешенный слой жидкости в виде быстро движущихся пленок и струй, тесно перемешанных с пузырьками и струями газа.

Следовательно, применением значительных скоростей газа мы можем создать на ситчатой тарелке качественно новый режим, при котором барботажа полностью отсутствует и вся жидкость находится на решетке в виде слоя подвижной пены, обладающей динамической устойчивостью. Этот режим мы называем пенным режимом, а аппарат, в котором он осуществляется, — пенным аппаратом, в отличие от барботажного аппарата.

Пенный режим может быть осуществлен и при обработке газом идеально чистой жидкости, из которой образуется только динамически устойчивая пена, мгновенно разрушающаяся при устранении силы, поддерживающей ее существование.

Скорость естественного подъема (всплывания) пузырьков при барботаже обычно измеряется десятками долями метра в секунду. Очевидно, что барботажа невозможен, если при пропускании газа сквозь слой жидкости скорость газа в полном сечении аппарата превышает скорость свободного всплывания пузырьков. При этом вся жидкость превращается в пену. Но в этих условиях пена образуется уже не вследствие проявления

адсорбционных свойств, а в результате массового столкновения пузырьков и струй газа, характер движения которых определяется уже не архимедовыми силами, как при барботаже, а кинетической энергией газа. Следует, однако, отметить, что в этих условиях пенный режим может быть получен только на решетке с не очень малым свободным сечением и при небольшом расстоянии между отверстиями. На решетке с редко расположенными отверстиями и со свободным сечением, меньше некоторого минимального, при увеличении скорости газа барботажный режим сменяется струйным прорывом газа и пенный режим не достигается.

С ростом скорости газа турбулентность пены возрастает и структура пены меняется. Над слоем пены появляется все большее количество брызг. При скорости газа в полном сечении аппарата 3,5—4,5 м/сек значительная часть жидкости выносится с тарелки уходящим газом.

Нижняя граница скорости газа, обеспечивающая пенный режим, различна для растворов и для чистых жидкостей, не содержащих поверхностно-активных веществ и, следовательно, не образующих статически устойчивой пены. При обработке идеально чистой жидкости нижний предел скорости газа $\omega_{\text{мин}}$, при котором существует динамически устойчивый пенный режим, равен некоторой доле φ от скорости свободного всплывания пузырьков газа: $\omega_{\text{мин}} = \varphi \omega_{\text{п}}$.

Практически мы всегда имеем дело с не идеально чистыми жидкостями. Поэтому при постепенном повышении скорости пропускания газа через слой жидкости на решетке барботажный режим сопровождается постепенным увеличением слоя структурной пены над зоной барботажа. После того, как барботажный режим при некоторой скорости газа заменится пенным режимом, дальнейшее повышение скорости газа приводит к постепенному превращению статически устойчивой (структурной, ячеистой) пены в динамически устойчивую, не структурную пену. В соответствии с этим изменяется и высота H верхнего уровня слоя пены над решеткой (рис. 1). В начале H возрастает и достигает некоторого максимума. Затем, с ростом скорости газа, высота пены уменьшается вследствие изменения ее структуры, достигает минимума и снова начинает расти за счет повышения коэффициента газонаполнения.

Пенный режим может быть осуществлен в широком диапазоне скоростей газа в полном сечении аппарата — от десятых долей до нескольких метров в секунду. Но практически рациональный диапазон скоростей немного уже — обычно от 1 до 3 м/сек.

Пенный режим достигается исключительно за счет соответствующих гидродинамических условий, без добавления к обрабатываемой системе каких-либо пенообразователей. Но и при обработке растворов, содержащих поверхностно-активные вещества, при указанных скоростях газа образующаяся пена в большинстве случаев является нестабильной и продолжительность существования отдельных участков межфазной поверхности в сильно турбулизованном полувзвешенном слое ничтожна. Таким образом, пенный режим обеспечивает основные условия, необходимые для интенсивного протекания процессов массо- и теплопередачи — чрезвычайно развитую и непрерывно обновляющуюся межфазную поверхность при высокой турбулентности и, следовательно, при малых диффузионных или термических сопротивлениях. В результате этого пенные аппараты работают в несколько (иногда в десятки) раз интенсивнее барботажных

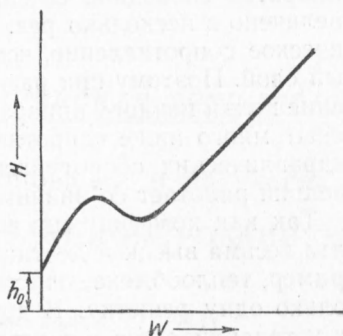


Рис. 1. Зависимость высоты слоя пены от скорости газа. h_0 — высота исходного слоя жидкости

аппаратов и в десятки (иногда в сотни) раз интенсивнее башен с насалками.

Поскольку в пенном аппарате скорость массо- и теплопередачи определяется скоростью газа в полном сечении аппарата и мало зависит от скорости газа в отверстиях, нет необходимости, чтобы последняя была большой. По сравнению со свободным сечением тарелки барботажных аппаратов свободное сечение решетки в пенных аппаратах может быть увеличено в несколько раз. Кроме того, слой пены имеет меньшее гидравлическое сопротивление, чем эквивалентный по интенсивности барботажный слой. Поэтому при равной нагрузке по газу гидравлическое сопротивление полки пенного аппарата (т. е. решетки с находящимся на ней слоем пены) много ниже сопротивления барботажной тарелки. При равных же гидравлических сопротивлениях барботажного и пенного аппаратов последний работает со значительно большей интенсивностью.

Так как коэффициент полезного действия одной полки пенного аппарата весьма высок и достигает иногда 99%, то для многих процессов (например, теплообмена, очистки газа от пыли) достаточно иметь в аппарате только одну решетку. В других случаях их требуется несколько и число их устанавливается в соответствии с числом теоретических тарелок.

Ленинградский технологический институт
им. Ленсовета

Поступило
17 VI 1953