

ОСОБЕННОСТИ ОБРАБОТКИ ГАЗОЖИДКОСТНЫХ СИСТЕМ НА ТРУБЧАТЫХ РЕШЕТКАХ СО СТАБИЛИЗАТОРОМ ПЕНЫ

В.Ф. Моисеев, канд.техн.наук

За последние годы четко определилось направление, связанное с проведением диффузионных и подобных им процессов в интенсивных режимах развитой турбулентности при больших скоростях потоков газов и жидкостей. Именно турбулизация газожидкостной (Г–Ж) системы приводит к увеличению интенсивности массообменных аппаратов.

Одним из способов турбулизации системы газ – жидкость является превращение ее в очень подвижную нестабильную пену за счет кинетической энергии газа. Пенный режим обработки газов и жидкостей явился передовой идеей в мировой науке химической технологии. Пенный режим и пенные аппараты «классического» типа описаны в работах [1, 2]. Интенсифицированные аппараты со стабилизатором пенного слоя нашли широкое применение для улавливания пыли из газов и для абсорбции газов в химической и смежных отраслях промышленности. Благодаря своей высокой эффективности, большой единичной мощности, хорошим эксплуатационным качествам, их применение позволяет усовершенствовать стадии очистки газа в технологических и санитарных целях, увеличить к. п. д. и повысить надежность газоочистного оборудования. Промышленная реализация метода стабилизации газожидкостного слоя значительно расширяет область применения пенных аппаратов и открывает новые возможности интенсификации технологических процессов с одновременным созданием малоотходных технологий.

Гидродинамика трубчатых и близких к ним по характеристикам колосниковых решеток без стабилизатора пены достаточно полно исследована в ряде работ [3, 4, 5] отечественных и зарубежных исследователей. Установлено, что основное влияние на гидродинамику орошаемых решеток оказывают скорость газа в полном сечении аппарата W_2 , свободное сечение решеток S_0 и плотность орошения L_0 .

Изменение свойств жидкости и газа оказывает меньшее влияние на гидродинамику решеток. Так, изменение вязкости жидкости в пределах 0,1–2,3 Па не влияет на $H, \Delta P, \varphi_2$.

Поскольку в технологии минеральных солей при абсорбции и очистке газов $\sigma_{ж}, \mu_{ж}, \rho_{ж}$ незначительно отличаются от тех же параметров для воды, а $\mu_{в}, \rho_{в}$ – близки по значениям μ и ρ воздуха, исследования гидродинамики трубчатых решеток со стабилизатором пены проводились на системе воздух–вода.

На рис. 1а изображена схема потоков газа и жидкости через трубчатую противоточную решетку без стабилизатора, на рис. 1б – то же со стабилизатором пенного слоя. Из рис. 1а видно, что минимальное сопротивление ΔP для прохода газа будет при высоте жидкости над отверстием – $h_{ж}$, а гидравлический напор, вызывающий истечение жидкости, равен Δh . Скорость истечения жидкости из щели определяют по уравнению

$$W_{0ж} = \mu_p \rho_{0ж} \sqrt{2g\Delta h}, \quad (1)$$

где W_0 – скорость жидкости в щелях решетки, м/с; μ_p – коэффициент расхода через щель.

Решая уравнение (1), получим

$$\Delta h = \frac{1}{2g} \left(\frac{W_{0ж}}{\mu_p \rho_{0ж}} \right)^2. \quad (2)$$

Очевидно, что истечение будет происходить при достижении равенства

$$(h_{ж} + \Delta h) \rho_{ж} g = \Delta P + \Delta h \rho_{ж} g, \quad (3)$$

где $\rho_{ж}$ – плотность жидкости, кг/м³; ΔP – гидравлическое сопротивление орошаемой трубчатой решетки, Па.

Распределение потоков на решетке вычисляем из условия затраты минимума энергии на преодоление гидравлического сопротивления решетки газом либо на создание разности уровней на решетке согласно рис. 1 а).

Во время работы решетки в пенном режиме при увеличении $W_г$ и неизменной плотности орошения должна увеличиться доля сечения решетки, занятая газом $\varphi_{0г}$, и снизиться доля сечения, занятая стекающей жидкостью $\varphi_{0ж}$. Для протекания неизменного количества жидкости сквозь решетку должна увеличиться скорость истечения жидкости. В свою очередь, скорость истечения жидкости может увеличиться только при увеличении Δh , то есть при увеличении гребней волны на поверхности слоя пены. Особенно заметно увеличение Δh становится при волновом режиме.

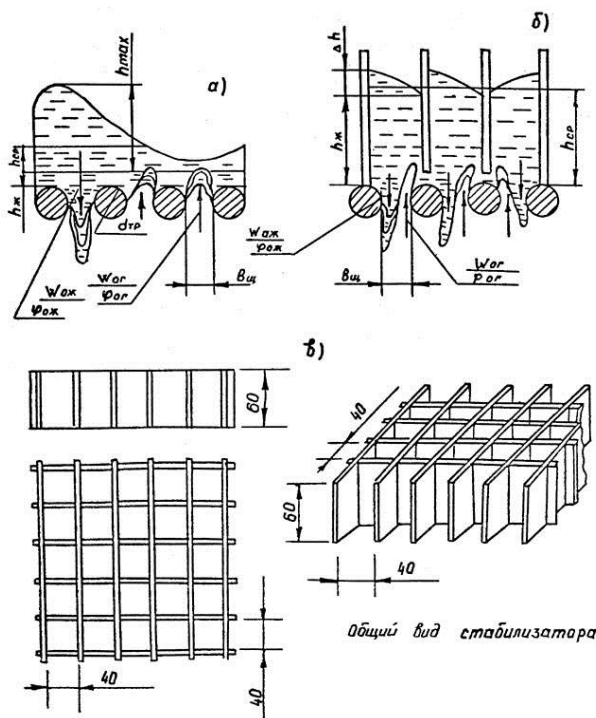


Рисунок 1 – Схема прохождения потока газа и жидкости через трубчатую решетку: а) – без стабилизатора пены; б) – со стабилизатором пены; в – стабилизатор пены

Определяя нижний предел работы трубчатых решеток без стабилизатора, получим следующее уравнение:

$$W_{0г} = 8,1 \left(\frac{\epsilon_{ц}}{L_0} \right)^{0,5} d_{mp}^{0,33}. \quad (4)$$

Как известно, для начала работы решетки на ней необходимо создать определенный запас жидкости. Установлено, что трубчатые решетки обладают большей проваливающей способностью, чем ситчатые и колосниковые. Поэтому для начала работы трубчатых решеток необходимы большие нагрузки по газу и жидкости. При определенных значениях свободного сечения решетки и плотности орошения пенообразование начинается при определенной скорости газа в полном сечении аппарата. Минимальную скорость газа, при которой на решетке начинает образовываться пенный слой, назовем критической скоростью $W_{акр}$. Результаты опытов показали, что при постоянной плотности орошения для начала работы решетки требуется тем большая скорость, чем больше свободное сечение решетки (рис. 2). Из рисунка 2 видно, противоточные трубчатые решетки со стабилизатором начинают работать при значительно меньших значениях $W_{акр}$, чем решетки без стабилизатора. Кроме того, противоточные трубчатые решетки без стабилизатора не работают при плотности орошения менее $3 \text{ м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{ч}$, тогда как решетки со

стабилизатором устойчиво работают при плотности орошения $0,6 \text{ м}^3/\text{м}^2\cdot\text{ч}$. Влияние диаметра трубок на $W_{\text{экр}}$ при проведении опытов нами не обнаружено. Математическая обработка данных приводит к зависимости, м/с:

$$W_{\text{экр}} = 372 S_0^{3,0} L_0^{0,3} . \quad (5)$$

Отклонение опытных значений $W_{\text{экр}}$ от расчетных составляет $\pm 8,6\%$.

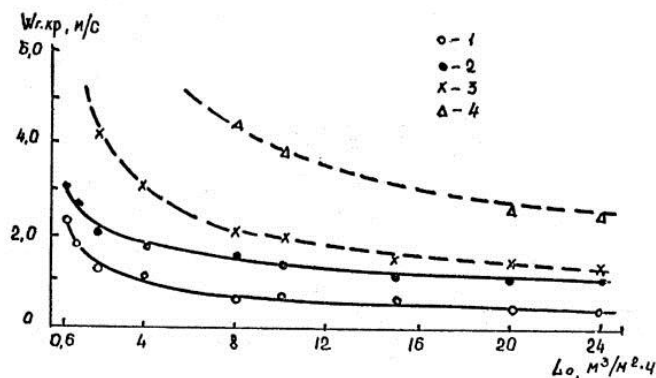


Рисунок 2 – Зависимость нижнего предела работы трубчатых решеток от плотности орошения S_0 : 1,3 – 0,152; 2,4 – 0,192 $\text{м}^2/\text{м}^2$; $d_{\text{тр}} = 0,02 \text{ м}$; — со стабилизатором; - - - без стабилизатора [Кузьминых И.Н., Родионов А.И.]

Сравнение режимов работы со стабилизаторами и без него показывает, что применение стабилизатора значительно расширяет диапазон устойчивой работы трубчатых решеток в пенных аппаратах. Это обстоятельство важно при обработке технологических газов из сушильных печей, реакторов и других видов оборудования, количество удаляемых газов может изменяться в широких пределах в зависимости от нужд технологии.

ВЫСОТА СЛОЯ ПЕНЫ

Одним из основных показателей гидродинамических режимов работы пенного аппарата служит высота пены H . Высота пены позволяет судить о развитии поверхности контакта фаз, о гидродинамических и конструктивных параметрах аппарата. Следует отметить, что зависимости получены ранее исследователями при скорости газа в пенном сечении аппарата не более 2 м/с. В изученных нами пределах $W_2 = 1,8 - 4,5 \text{ м/с}$ для трубчатых решеток без стабилизатора получена формула

$$H = 1,19 \cdot 10^{-3} W_2^{1,2} L_0^{0,25} S_0^{1,4} . \quad (6)$$

Расчеты H , выполненные по известным зависимостям и (6), при скоростях газа в полном сечении аппарата до 2 м/с примерно совпадают. Однако при $W_2 = 3 - 4 \text{ м/с}$ расчеты H , выполненные по известным зависимостям, превышают опытные значения H на 80–100%, в то время как величины H , рассчитанные по (6), отличаются от опытных на $\pm 9,5\%$.

Исследования, проведенные нами на трубчатых решетках со стабилизатором пены, показали, что так же, как и на решетках без стабилизатора, при увеличении скорости газа в полном сечении аппарата высота слоя пены неуклонно возрастает (рис. 3). При этом H на решетках со стабилизатором выше, чем на решетках без стабилизатора (рис. 3, 4) при одних и тех же значениях W_2 , S_0 , L_0 . На решетках со стабилизатором более четко, чем без стабилизатора, выражена граница пенного слоя, что позволяет точнее определить высоту слоя пены.

На решетках без стабилизатора пенный слой обычно не имеет четко выраженной границы, и амплитуда колебаний пенного слоя может превышать даже средние значения высоты слоя. Вероятно, этим объясняется чрезвычайно большой разброс значений высоты пены (по данным различных авторов). По визуальным наблюдениям на решетках со стабилизатором пена плотнее и однороднее, чем на решетках без стабилизатора, в ней

отсутствуют газовые пустоты, практически нет раскочки газожидкостного слоя во всем исследованном диапазоне скоростей.

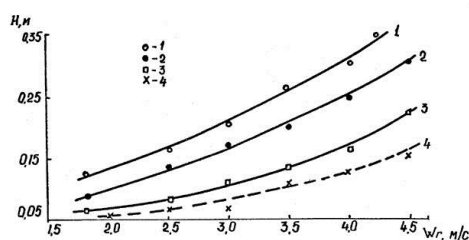


Рисунок 3 – Зависимость высоты слоя пены от скорости газа в полном сечении аппарата: $d_{\text{мр}}=0,03$ м; L_0 : 1–20; 2,3,4 – $5 \text{ м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{ч}$; S_0 : 1,2 – $0,142$; 3,4 – $0,169 \text{ м}^3/\text{м}^2$; — со стабилизатором, - - - - без стабилизатора

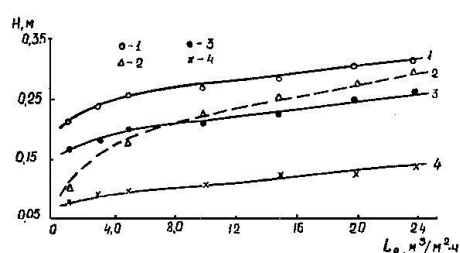


Рисунок 4 – Зависимость высоты слоя пены от плотности орошения $S_0=0,142 \text{ м}^3/\text{м}^2$; $d_{\text{мр}}=0,03$ м; W_2 : 1,2 – 4; 3 – 3,0; 4 – 2,0 м/с; — со стабилизатором, - - - - без стабилизатора

Зависимость высоты слоя пены от другого гидродинамического фактора L_0 показана на рис. 4, из которого видно, что кривые, выражающие зависимость $H=f(L_0)$ на решетках со стабилизатором, имеют меньший угол наклона, чем аналогичные кривые для решеток без стабилизатора. Также отмечено, что при малых плотностях орошения порядка $1\text{--}5 \text{ м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{ч}$ высота слоя пены на решетках со стабилизатором в 1,5–2 раза превышает высоту слоя пены на решетках без стабилизатора. По мере увеличения плотности орошения различия в высоте слоя пены для решеток со стабилизатором и без него становятся незначительными, достигая при $L_0=24 \text{ м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{ч}$ лишь 10%. Таким образом, применение стабилизатора наиболее эффективно в области малых значений плотности орошения, то есть в области малой устойчивости работы трубчатых решеток.

Для трубчатых решеток со стабилизатором нами получена зависимость высоты пенного слоя от основных факторов:

$$H=1,43 \cdot 10^{-3} W_2^{1,2} L_0^{0,2} S_0^{-1,6}, \quad (7)$$

Погрешность расчетов по (7) не превышает $\pm 7,3\%$. Сравнивая зависимости (6) и (7), можно видеть, что высота слоя пены на трубчатых решетках со стабилизатором в большей степени зависит от свободного сечения решеток, чем на решетках без стабилизатора, и в несколько меньшей степени – от плотности орошения. Увеличение высоты слоя пены на решетках со стабилизатором и ее более интенсивная турбулизация создают предпосылки для более эффективного улавливания плохо растворимых газовых компонентов в химической технологии.

Высота исходного слоя жидкости является одним из самых существенных факторов, влияющих на процессы тепломассопередачи и пылеулавливания в пенных аппаратах. От высоты исходного слоя жидкости в значительной мере зависят гидравлическое сопротивление решеток со слоем пыли, время пребывания жидкости на решетке, высота слоя пены.

При изучении работы пенных и барботажных аппаратов различных конструкций уделяли большое внимание определению параметров, от которых зависит h_0 , разрабатывали способы и устройства для создания и поддержания определенной высоты исходного слоя жидкости. Тем не менее, определению высоты исходного слоя жидкости на противоточных решетках уделялось значительно меньше внимания, чем на остальных типах решеток. Имеющиеся в литературе данные позволяют установить факторы, влияющие на высоту исходного слоя жидкости на противоточных решетках. Для условий работы противоточных дырчатых решеток получена зависимость

$$h_0=f(W_2, L_0, S_0, d_0). \quad (8)$$

Для трубчатых решеток со стабилизатором пены можно записать

$$h_0 = f(W_e L_0, S_0, d_{mp}) . \quad (9)$$

Рассмотрим влияние параметров зависимости (9) на h_0 .

Как показали опыты, высота исходного слоя жидкости неуклонно возрастает при увеличении скорости газа в полном сечении аппарата от 1,8 до 4,5 м/с (рис. 5). Из сравнения значений точек на кривых 2 и 3 можно видеть влияние стабилизатора на высоту исходного слоя жидкости. Так, при одной и той же скорости газа значения h_0 на решетке $S_0 = 0,171 \text{ м}^2/\text{м}^2$ со стабилизатором (кривая 2) более чем в 2 раза превышают значения h_0 на решетке без стабилизатора пены (кривая 4).

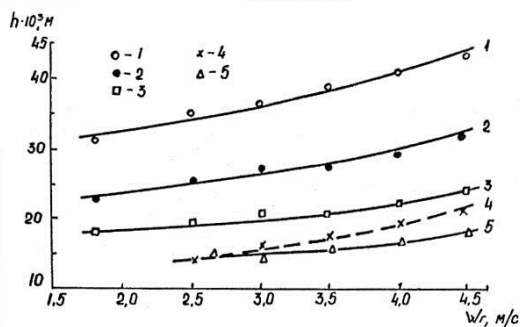


Рисунок 5 – Зависимость высоты исходного слоя жидкости от скорости газа в полном сечении аппарата: $L_0 = 5 \text{ м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{ч}$; d_{mp} : 1 – 0,03; 2,3,4 – 0,027; 5 – 0,02 м; S_0 : 0,142; 2,4 – 0,169; 3 – 0,20; 5 – 0,233 $\text{м}^2/\text{м}^2$; — со стабилизатором, - - - без стабилизатора

Влияние свободного сечения решетки на высоту исходного слоя жидкости на трубчатых решетках весьма существенно (рис. 6). Из рисунка 6 видно, что увеличение свободного сечения трубчатой решетки со стабилизатором в 1,5 раза приводит к снижению высоты исходного слоя жидкости на решетке примерно в 2 раза (кривые 1, 2, 3). Вместе с тем кривая 4, выражающая зависимость высоты исходного слоя жидкости от свободного сечения решетки без стабилизатора, имеет несколько меньший угол наклона. Кривая 4 проходит значительно ниже, чем кривая 2, то есть при данных одних и тех же значениях скорости газа в полном сечении аппарата и плотности орошения во всем исследованном диапазоне свободных сечений решеток высота исходного слоя жидкости на трубчатых решетках со стабилизатором выше, чем на решетках без стабилизатора. Таким образом, для создания единицы h_0 на решетках со стабилизатором непроизводительные затраты на преодоление сопротивления сухой решетки ниже, чем без стабилизатора.

Определенное влияние на высоту исходного слоя жидкости оказывает и плотность орошения. Из этого рис. 7 можно видеть, что исходный слой жидкости при использовании стабилизатора выше, чем без стабилизатора. Особенно заметен эффект от применения стабилизатора при относительно малых плотностях орошения (до 5–8 $\text{м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{ч}$), где высота исходного слоя жидкости на решетках со стабилизатором в 1,5–2 раза выше, чем без него. Зависимость высоты исходного слоя жидкости от плотности на трубчатых решетках со стабилизатором с учетом всех факторов

$$h_{0c} = 0,75 \cdot 10^{-3} W_e^{0,25} L_0^{0,3} S_0^{-1,6} . \quad (10)$$

Отклонение величин h_0 , полученных по уравнению (10), отличается от опытных значений не более чем на $\pm 6,7\%$. Для трубчатых решеток без стабилизатора нами получена следующая формула:

$$h_0 = 0,38 \cdot 10^{-3} W_e^{0,36} L_0^{0,57} S_0^{-1,4} . \quad (11)$$

Как видно из формул (10) и (11), на высоту исходного слоя жидкости на решетках со стабилизатором скорость газа в полном сечении аппарата и плотность орошения оказывают меньшее влияние, чем на трубчатых решетках без стабилизатора. Между тем величина исходного слоя жидкости на решетках со стабилизатором значительно больше, чем на решетках без стабилизатора. Увеличение h_0 , как и H на трубчатых решетках со

стабилизатором, по сравнению с решетками без стабилизатора позволяет использовать трубчатые решетки для очистки газов и получения растворов в технологии минеральных солей.

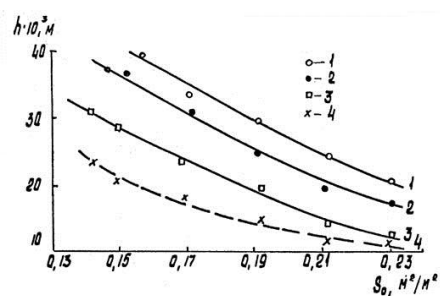


Рисунок 6 – Зависимость высоты исходного слоя жидкости от свободного сечения решетки: W_2 : 1,3 – 2; 2,4 – 4 м/с; L_0 : 1 – 15; 2,3,4 – 5 м³/м²·ч; — со стабилизатором; - - - без стабилизатора

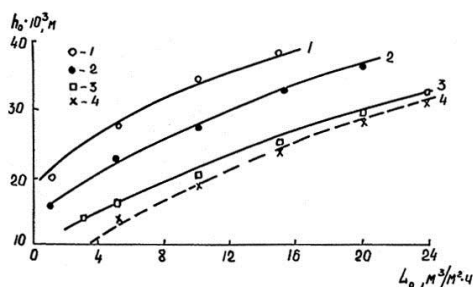


Рисунок 7 – Зависимость высоты исходного слоя жидкости от плотности орошения: S_0 : 1,2,4 – 0,171; 3 – 0,211 м²/м²; W_2 : 1 – 4; 2,3,4 – 2 м/с — со стабилизатором; - - - без стабилизатора

ГИДРАВЛИЧЕСКОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ ТРУБЧАТЫХ РЕШЕТОК

На гидродинамику орошаемых решеток основное влияние оказывают скорость газа в полном сечении аппарата, плотность орошения и свободное сечение решеток. Изучение нами высоты слоя пены и высоты исходного слоя жидкости на трубчатых решетках со стабилизатором пены подтвердило влияние W_2 , S_0 , L_0 , d_{mp} на H , h_0 . Учитывая полученные нами зависимости для H , h_0 , а также данные других авторов по расчетам общего гидравлического сопротивления орошаемых решеток P , можно записать для системы воздух – вода:

$$\Delta P = f(W_2, L_0, S_0, d_{mp}). \quad (12)$$

Поскольку значения H , h_0 в случае применения стабилизатора превышают H , h_0 без него, вполне закономерно было бы ожидать, что и ΔP орошаемых трубчатых решеток со стабилизатором окажется выше гидравлического сопротивления орошаемых решеток без стабилизатора.

Гидравлическое сопротивление решеток со слоем пены ΔP , большинство исследователей разделяют на составляющие:

$$\Delta P = \Delta P_{cp} + \Delta P_{\sigma} + \Delta P_{сл}, \quad (13)$$

где ΔP_{cp} – гидравлическое сопротивление сухой решетки, Па; ΔP_{σ} – гидравлическое сопротивление, возникающее за счет сил поверхностного натяжения при выходе газа из щелей, Па; $\Delta P_{сл}$ – гидравлическое сопротивление пенного слоя, Па.

Гидравлическое сопротивление сухих трубчатых решеток является суммой потерь на сжатие струи при входе в отверстия, потерь на трение в отверстиях, потерь на расширение струи при выходе из отверстия. Гидравлическое сопротивление трубчатых решеток может быть выражено зависимостью

$$\Delta P_{cp} = f(Re_0, S_0). \quad (14)$$

Из (14) следует, что на ΔP_{cp} может оказывать влияние d_{mp} , поскольку при постоянном свободном сечении решетки ширина щели будет зависеть от диаметра трубок, а в результате изменения щели будет изменяться Re_0 . Сопротивление сухой решетки обычно выражают формулой

$$\Delta P_{cp} = \xi_{0z} \frac{\rho_e W_0^2}{2}, \quad (15)$$

где ρ_g – плотность газа, кг/м³; ξ_{0z} – коэффициент местного сопротивления, отнесенный к скорости газа в щелях решетки.

В общем случае коэффициент местного сопротивления зависит от критерия Рейнольдса и величины свободного сечения решеток. Вид зависимости $\xi_{0z} = f(Re_0)$ меняется от характера движения газа. При ламинарном режиме, когда $\Delta P \approx W_e$,

$$\xi_{0z} = \frac{C}{Re_0}, \quad (16)$$

где C – постоянная.

При турбулентном режиме, когда $\Delta P \approx W_e^{1,75}$,

$$\xi_{0z} = \frac{C_1}{Re_0^{0,25}}. \quad (17)$$

И при режиме развитой турбулентности, являющимся автомодельным, когда

$$\Delta P \approx W_0^2, \quad \xi_{0z} = \frac{C_2}{Re_0^0}.$$

Показано, что автомодельный режим в пенных аппаратах наступает уже при $W_e \geq 1,2$ м/с, то есть практически с самого начала пенного режима. Можно сделать вывод, что при пенном режиме ξ_{0z} не зависит от ширины щели при неизменном S_0 и скорости газа в щелях решетки. Изучение влияния свободного сечения решетки на коэффициент местного сопротивления приводит к зависимости, выражаемой формулой

$$\xi_{0z} = 0,273 S_0^{-0,55}. \quad (18)$$

Отклонение значений ξ_{0z} , рассчитанных по (18), от опытных составляют $\pm 3,9\%$.

В промышленных пенных аппаратах определение свободного сечения трубчатых решеток и их коэффициентов местных сопротивлений представляет известные трудности.

Определение свободного сечения трубчатых решеток лабораторных пенных аппаратов также затруднительно, так как ширина щели в таких решетках равна 1,0–2,5 мм, и ошибки замеров порядка 0,1–0,2 мм могут привести к серьезным погрешностям в определении S_0 и ξ_{0z} . Для определения свободного сечения трубчатых решеток по известному ΔP_{cp} нами были найдены коэффициенты местных сопротивлений, отнесенные к скорости газа в полном сечении аппарата $\xi_{пз}$ из выражения

$$\Delta P_{cp} = \xi_{пз} \frac{\rho_g W_e^2}{2} \quad (19)$$

Свободное сечение решеток при этом определяли методом просвечивания решеток параллельным пучком света, позволяющим измерять S_0 более точно, чем с помощью механических замеров. Характер зависимости $\xi_{пз} = f(S_0)$ описывается уравнением

$$\xi_{пз} = 0,273 S_0^{-2,55}. \quad (20)$$

Отклонения значений $\xi_{пз}$, рассчитанных по уравнению (20), составляют $\pm 4,1\%$ от опытных. Пользуясь уравнением (26), можно по замеренному ΔP_{cp} и вычисленному по (19) $\xi_{пз}$ найти свободное сечение трубчатой решетки без непосредственного замера ширины щелей. Установка стабилизатора пены на решетку практически не изменяет гидравлическое сопротивление сухой решетки, поскольку свободное сечение стабилизатора составляет 0,95–0,98 м²/м².

ГИДРАВЛИЧЕСКОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ, ВОЗНИКАЮЩЕЕ ЗА СЧЕТ СЛОЯ СИЛ ПОВЕРХНОСТНОГО НАТЯЖЕНИЯ

Потери давления на преодоление сил поверхностного натяжения жидкости ΔP_{σ} возникают при выходе газа из отверстий и входе газа в слой жидкости на решетке. Для трубчатых решеток в знаменателе формулы вместо $\epsilon_{щ}$ должно стоять $(d_{тр} + \epsilon_{щ})$, а сама формула для потерь давления примет вид

$$\Delta P = \frac{2\sigma}{d_{mp} + \epsilon_{щ}}, \quad (21)$$

где σ – коэффициент поверхностного натяжения, Н/м; $\epsilon_{щ}$ – ширина щели между колосниками, м.

Рассчитанные по известной формуле значения ΔP_{σ} для системы воздух–вода ложатся в координатах $\Delta P_{\sigma} - S_0$ на прямые, которые описываются уравнением

$$\Delta P_{\sigma} = 7,6 \cdot 10^{-6} S_0^{-0,23} d_{mp}^{-1,0}. \quad (22)$$

Для других систем уравнение примет вид

$$\Delta P_{\sigma} = 1,02 \cdot 10^{-3} \sigma_{ж} S_0^{-0,23} d_{mp}^{-1,0}. \quad (23)$$

ГИДРАВЛИЧЕСКОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ ПЕННОГО СЛОЯ

Из трех составляющих (13) общего гидравлического сопротивления орошаемой решетки ΔP_{cp} , ΔP_{σ} , ΔP_{cl} , две первых считают непроизводительными затратами напора. На создание собственно слоя пены затрачивается потеря напора ΔP_{cl} . При расчете ΔP_{cl} по известным зависимостям не всегда известна величина исходного слоя жидкости, в результате чего расчет ΔP_{cl} представляет определенные трудности. Расчет противоточных решеток можно вести по формуле

$$\Delta P_{cl} = 0,5 \cdot \xi_n W_e^2 \rho_e S_0^{-2} \varphi_{0,e}^{-2}, \quad (24)$$

где ξ_n – коэффициент гидравлического сопротивления при прохождении газами слоя пены; $\varphi_{0,e}$ – доля щелей решетки, занятая газом.

Известна формула для расчета решетки из прутков диаметром 3–5 мм:

$$\Delta P_{cl} = 2,9 W_e^2 \left(\frac{\rho_e}{S_0^2} \right) \left(\frac{L}{G} \right)^{0,4} \left(\frac{\rho_e}{\rho_{ж}} \right)^{0,2}. \quad (25)$$

Величину ΔP_{cl} можно также найти из (13), если известны ΔP , ΔP_{cp} , ΔP_{σ} :

$$\Delta P_{cl} = \Delta P - \Delta P_{cp} - \Delta P_{\sigma}. \quad (26)$$

Общее гидравлическое сопротивление орошаемой трубчатой решетки для системы воздух–вода можно определить по формуле

$$\Delta P = 9,5 W_e^{0,85} L_0^{0,1} S_0^{-1,6}. \quad (27)$$

Гидравлическое сопротивление сухой решетки при наличии орошения определяют с учетом доли сечения, занятой газом:

$$\Delta P_{cp} = \frac{\xi_{0,e} W^2 \rho_e}{2 S_0^2 \varphi_{0,e}^2}, \quad (28)$$

$$\varphi_{0,e} = 1 - \frac{\left[\left(\frac{L}{G} \right)^2 \frac{\rho_e}{\rho_{ж}} \frac{\beta_p}{\xi_{0,e} \mu_p} \right]^{0,33}}{1 + \left[\left(\frac{L}{G} \right)^2 \frac{\rho_e}{\rho_{ж}} \frac{\beta_p}{\xi_{0,e} \mu_p} \right]^{0,33}}, \quad (29)$$

где L – расход жидкости в аппарате, кг/ч; G – расход газа через аппарат, кг/ч; β_p – отношение среднего статистического давления газожидкостного слоя в зоне стекания жидкости через отверстия. Для системы воздух–вода авторы ряда работ рекомендуют $\beta_p = 0,5$; для пенящихся жидкостей рекомендуют

$$\beta_p = 1,11 \left(\frac{\rho_e}{\rho_{ж}} \right)^{0,118}, \quad (30)$$

где μ_p – коэффициент истечения жидкостей. Для колосниковых решеток многие авторы принимают $\mu_p = 0,62$, то есть как «коэффициент расхода через отверстие в тонкой стенке».

Однако, как справедливо отмечается всеми авторами, изучившими трубчатые решетки, форма отверстий трубчатых решеток отличается от формы отверстий колосниковых решеток. Поэтому для трубчатых решеток следует принимать $\mu_p=0,97$ – «коэффициент расхода через короткий цилиндрический патрубок с хорошо закругленными краями». Учитывая, что

$$L=L_0 S \rho_{ж}, \quad (31)$$

$$G=3600 W_e S \rho_e, \quad (32)$$

и принимая $\beta_p=0,5$, после математических преобразований получим для системы воздух–вода

$$\varphi_{0,2} = \frac{1}{1+0,038 L_0^{0,67} \xi_{0,2}^{-0,33} W_e^{-0,67}}. \quad (33)$$

Для других систем, принимая $\beta_p=1,11 \left(\frac{\rho_e}{\rho_{ж}} \right)^{0,118}$, получим

$$\varphi_{0,2} = \frac{1}{1+0,045 L_0^{0,67} W_e^{-0,67} \xi_{0,2}^{0,33} \rho_e^{0,37} \rho_{ж}^{-0,37}}, \quad (34)$$

комбинируя зависимости (27), (28), (33), для системы воздух–вода можем записать

$$\Delta P_{ст} = 9,5 W_e^{0,85} L_0^{0,1} S_0^{-1,6} - \frac{0,35 S_0^{-2,55} W_e^2}{1+0,059 W_e^{-0,67} L_0^{0,67} S_0^{0,18}} - 7,6 \cdot 10^6 S_0^{-0,23} d_{тр}^{-1,0} \quad (35)$$

Из (35) видно, что

$$\Delta P_{ст} = f(W_e, L_0, S_0, d_{тр}). \quad (36)$$

Обработка опытных данных позволила нам получить следующую зависимость:

$$\Delta P_{ст} = 2,36 W_e^{0,25} L_0^{0,3} S_0^{-1,6}. \quad (37)$$

Погрешность расчетов по (37) составляет $\pm 8,3\%$ сравнительно с формулой (35).

Сравнивая (10) и (37), нетрудно заметить, что

$$\Delta P_{ст} = h_0 9,81 \cdot 1000. \quad (38)$$

Поскольку 9,81 есть величина ускорения свободного падения тел m/c^2 , а 1000 – величина плотности воды kg/m^3 для системы воздух–вода, можно записать

$$\Delta P_{ст} = h_0 g \rho_{ж}. \quad (39)$$

Таким образом, для трубчатых решеток подтверждается полученная ранее другими авторами зависимость. Для определения ΔP на решетках без стабилизатора нами получена формула

$$\Delta P = 10,7 W_e^{0,66} L_0^{0,32} S_0^{-1,4}. \quad (40)$$

Из сравнений (27) и (40) видно, что на общее гидравлическое сопротивление трубчатых решеток со стабилизатором W_e и S_0 оказывают большее, а L_0 – меньшее влияние, чем без стабилизатора пены. Очевидно, это зависит от создаваемого на решетке без стабилизатора исходного слоя жидкости, на величину которого L_0 влияет в большей степени, чем на решетках со стабилизатором. Замеченную ранее возможность работы в волновом режиме решеток без стабилизатора при повышенных плотностях орошения можно объяснить стабилизирующим действием высокого исходного слоя жидкости на решетке. Об этом говорят изображенные гидродинамические показатели трубчатых решеток со стабилизатором и без него при плотностях орошения более $20 m^3/m^2 \cdot ч$. По результатам исследований построены номограммы для расчета пенных аппаратов с трубчатыми решетками со стабилизатором пены.

СВЯЗЬ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ

Зависимости высоты слоя пены на трубчатых решетках от скорости газа в полном сечении аппарата, полученные нами при постоянных значениях h_0 , показаны на рис. 8. Видно, что при одинаковых значениях высоты исходного слоя жидкости высота слоя на трубчатых

решетках со стабилизатором и без него практически одинакова. Одинаковый же исходный слой жидкости на решетке без стабилизатора можно получить при меньшем свободном сечении решетки по сравнению с решеткой со стабилизатором. В этом случае гидравлическое сопротивление сухой решетки, то есть произвольные затраты энергии будут выше, чем при использовании решетки со стабилизатором. Кроме того, большее свободное сечение решетки со стабилизатором при том же самом диаметре труб, что и без стабилизатора, позволит иметь большую ширину щелей в решетке, и, как следствие, повысит надежность работы технологических линий, обрабатывающих газы, содержащие пыль, склонную к слипанию, и растворы, содержащие кристаллизующиеся соли. Зависимости для решеток со стабилизатором (рис. 8) аппроксимируются выражением

$$H = 1,91 h_0 W_2^{0,95} L_0^{-0,1}. \quad (41)$$

Для решеток без стабилизатора

$$H = 3,6 h_0 W_2^{0,84} L_0^{-0,32}. \quad (42)$$

Из формул (41) и (42) видно, что влияние плотности орошения на высоту слоя пены при определенной высоте исходного слоя жидкости на трубчатых решетках со стабилизатором существенно меньше, чем на решетках без стабилизатора. Выявлено влияние на высоту пены плотности орошения, в особенности на решетках без стабилизатора.

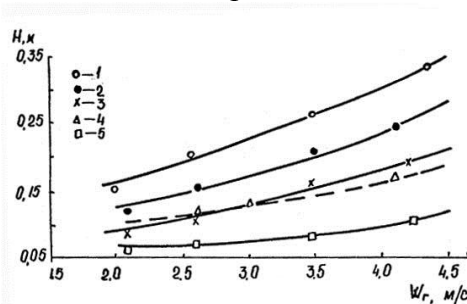


Рисунок 8 – Зависимость высоты слоя пены от скорости газа в полном сечении аппарата: $L_0=5 \text{ м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{ч}$; $d_{\text{тр}}=0,02 \text{ м}$, h_0 : 1 – 0,045; 2 – 0,035; 3,4 – 0,025; 5 – 0,015 м; — со стабилизатором; - - - без стабилизатора

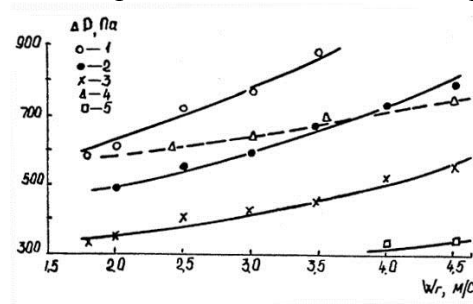


Рисунок 9 – Зависимость сопротивления решетки со слоем пены от скорости газа в полном сечении аппарата: h_0 : 1 – 0,045; 2 – 0,035; 3,4 – 0,025; 5 – 0,015 м; $L_0=5 \text{ м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{ч}$; — со стабилизатором; - - - без стабилизатора

Гидравлическое сопротивление трубчатых решеток со стабилизатором на 20–30 % ниже гидравлического сопротивления трубчатых решеток без стабилизатора при одинаковых значениях высоты исходного слоя жидкости (рис. 9). Это можно объяснить большими затратами энергии на преодоление газом сухой решетки меньшего сечения без стабилизатора. Таким образом, применение стабилизатора пены позволит не только повысить надежность технологических линий, в составе которых имеются пенные аппараты с трубчатыми решетками, но и снизить затраты энергии на проведение тепломассообменных процессов. Кроме того, появляется возможность, затратив одно и тоже количество энергии, уменьшить число ступеней в одном аппарате при той же суммарной высоте пены, что и без стабилизатора.

Газосодержание пенного слоя φ_2 является важной величиной, характеризующей динамичный двухфазный слой:

$$\varphi_2 = 1 - \frac{h_0}{H}. \quad (43)$$

Для выяснения влияния W_2 , L_0 , S_0 на φ_2 подставим в (43) значения h_0 и H из зависимостей (6) и (10). После математических преобразований получим для решеток без стабилизатора и со стабилизатором соответственно:

$$\varphi_2 = 1 - 0,32 W_2^{-0,84} L_0^{0,3}, \quad (44)$$

$$\varphi_{2(c)} = 1 - 0,52 W_2^{-0,95} L_0^{0,1}. \quad (45)$$

Зависимость φ_2 и $\varphi_{2(c)}$ от W_2 приведена на рис. 10. Из формулы (45) видно, что для решеток со стабилизатором, как и без него, характерно увеличение $\varphi_{2(c)}$ с ростом W_2 . Без стабилизатора рост φ_2 при увеличении W_2 объясняется повышением содержания крупных газовых включений. Стабилизатор пены исключает появление волнового режима и прорыв газовых струй. Газ равномерно распределен по всей площади решетки, и увеличение газосодержания происходит за счет роста общего числа пузырьков газа в слое пены. За счет роста общего числа пузырьков должна увеличиваться и поверхность контакта фаз, что должно привести к повышению эффективности улавливания плохо растворимых газов.

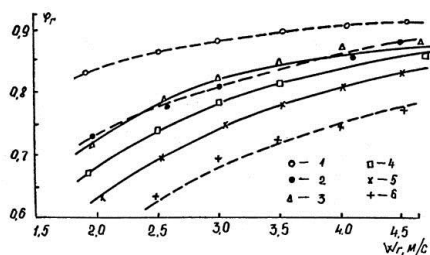


Рисунок 10 – Зависимость газосодержания от скорости газа в полном сечении аппарата: L_0 : 1,3 – $1 \text{ м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{ч}$; 2,4 – $5 \text{ м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{ч}$; $S_0=0,169 \text{ м}^2/\text{м}^2$; — со стабилизатором; - - - без стабилизатора

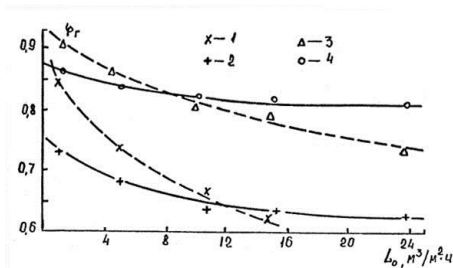


Рисунок 11 – Зависимость газосодержания от плотности орошения: W_2 : 1,2 – 2 м/с; 3,4 – 4 м/с; $S_0=0,169 \text{ м}^2/\text{м}^2$; — со стабилизатором; - - - без стабилизатора

Влияние плотности орошения на $\varphi_{2(c)}$ при наличии стабилизатора видно из зависимостей (44), (45) и рис. 11. Видно, что при $L_0=8-12 \text{ м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{ч}$ φ_2 и $\varphi_{2(c)}$ примерно одинаковы, затем по мере дальнейшего увеличения L_0 , φ_2 становится меньше $\varphi_{2(c)}$. Видимо, увеличение запаса жидкости на решетках без стабилизатора приводит при волновом режиме к ухудшению перемешивания в слое пены и прохождению основной массы газа в местах наименьшего сопротивления пенного слоя. Газосодержание пенного слоя на решетках со стабилизатором, начиная с $L_0=10-12 \text{ м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{ч}$, остается почти одинаковым при равенстве прочих гидродинамических факторов. Математическая обработка данных по φ_2 на трубчатых решетках без стабилизатора при $W_2=1,8-4,5 \text{ м/с}$ привела к зависимости:

$$\varphi_2 = 0,98 Fr^{0,1} . \quad (46)$$

На решетках со стабилизатором

$$\varphi_{2(c)} = 1,1 Fr^{0,1} . \quad (47)$$

Данные, полученные расчетом по (46) и (47), отличаются от данных, рассчитанных по (44) и (45), не более чем на $\pm 11,3\%$.

БРЫЗГОУНОС НА ТРУБЧАТЫХ РЕШЕТКАХ СО СТАБИЛИЗАТОРОМ ПЕНЫ

Унос жидкости с полок пенных аппаратов обычно разделяют на две составляющие. Первая – небольшая (15%) часть уноса – аэрозольный унос с диаметром капель менее 10 мкм. Скорость витания этих капель ниже скорости газа в сепарационном пространстве и не зависит от его высоты. Вторая составляющая уноса – крупные капли, которые поднимаются над решеткой на различную высоту в зависимости от W_2 и размера капель. Тонкодисперсный унос обнаруживается при всех гидродинамических режимах, грубодисперсный – начиная с $W_2=1,2-1,3 \text{ м/с}$. Резкое увеличение уноса жидкости с решеток при $W_2 > 2 \text{ м/с}$, наряду с возникновением невыгодного волнового режима, сдерживало ранее интенсификацию работы пенных аппаратов. В настоящее время в промышленных пенных аппаратах в большинстве случаев используются каплеуносители, которые могут быть встроенными в пенный аппарат или установленными отдельно.

Поэтому при наличии каплеуловителей некоторое увеличение брызгоуноса при повышении W_e не имеет существенного значения для общей эффективности аппаратов. Влияние брызгоуноса будет сказываться на работе пенного аппарата лишь в тех случаях, когда нежелательно попадание раствора с нижерасположенных решеток на верхние. Брызгоунос резко увеличивается с уменьшением h_0 , H и неравномерном распределении пены на решетке, в свою очередь, H и h_0 при $W_e = const$ и $S_0 = const$, зависят от плотности орошения. При довольно высокой скорости газа (до 4,5 м/с) и при малой плотности орошения ($1,8 \text{ м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{ч}$) определенный интерес представляет расчет брызгоуносов. Во время проведения опытов на прозрачной модели было визуально установлено, что увеличение W_e до 4,5 м/с вызывает появление зоны брызг высотой около 0,9 м. Выше 0,9 м от плоскости решетки витают лишь отдельные мелкие брызги. До $W_e = 4$ м/с брызгоунос при наличии стабилизатора несколько выше, чем без стабилизатора, в то время как на дырчатых решетках со стабилизатором он был ниже, чем без стабилизатора. Очевидно, на трубчатых решетках происходит срыв капель с пластин стабилизатора при небольших значениях H . При увеличении $W_e > 4$ м/с брызгоунос на решетках со стабилизатором становится менее интенсивным, чем на решетках без стабилизатора. Увеличение плотности орошения с 3 до $20 \text{ м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{ч}$ вызывает уменьшение брызгоуноса примерно в 1,5 раза.

Увеличение свободного сечения решетки приводит к увеличению брызгоуноса, поскольку уменьшается высота исходного слоя жидкости. Диаметр труб в изученных пределах оказывает весьма незначительное влияние на величину брызгоуноса.

Снижение брызгоуноса удалось достичь применением дополнительного стабилизатора, устанавливаемого на высоте 60–100 мм от верхней кромки стабилизатора, находящегося на решетке. Второй стабилизатор имеет такие же размеры, как и первый, но пластины его установлены под углом около 60° к плоскости решетки. Поток газа пластинами второго стабилизатора направляется на стенки аппарата, причем струи газа проходят через слой пены под углом примерно 60° . Особенно эффективным оказалось применение второго стабилизатора при высоких скоростях газа, порядка 3–4,5 м/с, когда брызгоунос удалось уменьшить в 1,5 раза. Весьма существенным является и то, что в результате установки второго стабилизатора верхняя часть пенного слоя стала значительно однородней и устойчивей. Этим фактом, очевидно, наряду с отклонением газового потока, можно объяснить снижение брызгоуноса. Использование второго стабилизатора, вероятно, должно увеличить эффективность выделения из газов трудноулавливаемых компонентов. В результате обработки данных экспериментов были выведены следующие зависимости для расчета величины брызгоуноса $g/\text{м}^3$ без стабилизатора L_b , с одним стабилизатором L_{bc} и двумя стабилизаторами L_{b2c} :

$$L_b = 0,33 W_e^{3,3} L_0^{-0,2} S_0^{0,5}, \quad (48)$$

$$L_{bc} = 1,2 W_e^{2,4} L_0^{-0,2} S_0^{0,5}, \quad (49)$$

$$L_{b2c} = 0,91 W_e^{2,2} L_0^{-0,2} S_0^{0,5}. \quad (50)$$

Результаты расчетов по формулам (48), (49), (50) отличаются от опытных данных не более чем на $\pm 10\%$.

Промышленная реализация метода стабилизации газожидкостного слоя позволяет значительно расширить область применения пенных аппаратов и открывает новые возможности интенсификации технологических процессов с одновременным созданием малоотходных технологий. В статье установлены основные параметры, влияющие на гидродинамику трубчатых решеток со стабилизатором пены и без него. Выявлена связь гидродинамических параметров. Полученные зависимости точнее характеризуют гидродинамическую обстановку в аппарате. Исследования показывают, что применение стабилизатора значительно расширяет диапазон устойчивой работы трубчатых решеток в пенных аппаратах. Это важно когда количество продукции изменяется в широких

пределах в зависимости от нужд технологии. Применение стабилизатора пены позволит не только повысить надежность технологических линий, в составе которых имеются пенные аппараты с трубчатыми решетками, но и снизить затраты энергии на проведение тепломассообменных процессов.

Приводятся зависимости газосодержания от плотности орошения и скорости газа, а также влияние наличия стабилизатора на характеристики динамичного двухфазного слоя.

Рассмотрен брызгоунос на трубчатых решетках со стабилизатором пены и его влияние на работу аппарата. Показано, что снижение брызгоуноса достигается применением дополнительного стабилизатора, который, кроме того, увеличивает эффективность выделения из газов трудноулавливаемых компонентов.

SUMMARY

The industrial realization of a method of stabilization of gas liquid bed allows considerably to expand a field of application of frothy apparatuses and opens out new capabilities of an intensification of technological processes with simultaneous making of low-waste technologies. In the article the fundamental parameters influencing to hydrodynamics of tubular gratings with the stabilizing of foam and without it are highlighted. The connection of hydrodynamic quantities is revealed. The received relations characterize hydrodynamic conditions in the apparatus more precisely. The relations of gas content to a density of forced-circulation and velocity of gas, and also influence of availability of the stabilizing agent to performances of dynamical two-phase bed are resulted. Is considered sparks ablation on tubular gratings with the stabilizing of foam and its influence to activity of the apparatus. Is exhibited, that the reduction of sparks ablation is reached by application of the padding stabilizing, which besides augments efficiency of separation from gases difficultly trapped components.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пенный режим и пенные аппараты / Под ред. И.П. Мухленова, Э.Я. Тарата. – М.: «Химия», 1977.
2. Тарат Э.Я., Балабеков О.С., Болгов Н.П. и др. Интенсивные колонные аппараты для обработки газов жидкостями. - Л., Изд-во ЛГУ им. А.А.Жданова, 1976. – 244 с.
3. Абсорбция и пылеулавливание в производстве минеральных удобрений / Под ред. И.П. Мухленова, О.С. Ковалева. – М.: Химия, 1987. – 206 с.
4. Гельперин Н.И., Гришко В.З., Михайлов В.А. //ТОХТ. - 1972,. - Т.6, № 4. - С. 534-538.
5. Микулин Г.И., Поляков И.К. Дистилляция в производстве соды. - М.: Госхимиздат, 1956. - 348 с.
6. Ткач Г.А., Шапоров В.П., Титов В.М. Производство соды по малоотходной технологии. – Харьков: ХГПУ, 1998. – 429 с.

Поступила в редакцию 10 февраля 2004 г.