ՀԱՅԿԱԿԱՆ ՔԻՄԻԱԿԱՆ ԱՄՍԱԳԻՐ
АРМЯНСКИЙ ХИМИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ
XX, № 5, 1967

УДК 532.5+66.023+66.069.85+661.683+677.044.312

КАРБОНИЗАЦИЯ РАСТВОРА МЕТАСИЛИКАТА НАТРИЯ В ПЕННОМ АППАРАТЕ

II. ОСНОВНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО РЕЖИМА И ФАКТОРЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА ПЕНООБРАЗОВАНИЕ

М. Г. МАНВЕЛЯН, Э. Я. ТАРАТ и М. А. САФАРЯН

Исследована гидродинамика двухфазного слоя в системе углекислый газ—раствор метасиликата натрия для прямоточного пенного аппарата, и после обработки экспериментальных данных получено уравнение (9) гидродинамики двухфазной системы, позволяющее рассчитать процесс пенообразования при регулируемой высоте полок (в производственных условиях) в зависимости от высоты пены, скорости газа, интенсивности подачи раствора, поверхностного натяжения и вязкости газа и раствора.

Высота двухфазного слоя пены, как было показано в сообщении I, характеризует интенсивность работы контактных аппаратов вообще и процессов тепло- и массообмена в частности. Поэтому основной задачей при изучении гидродинамического взаимодействия углекислого газа с раствором метасиликата натрия в пенных аппаратах является исследование условий образования и развития двухфазного слоя.

Высота двухфазного слоя зависит от многих факторов, в частности таких, как скорость газа, количество подаваемой жидкости, физические параметры газа и жидкости, давление газа и др. [1, 2]. Их влияние на удельную высоту двухфазного слоя пены можно установить на основе анализа условий и характера взаимодействия сред непосредственно в пенном слое, описанном приведенными в сообщении I критериальными уравнениями гидродинамики.

Требования к гидродинамическому режиму работы пенного аппарата обусловлены необходимостью создания наиболее развитой поверхности подвижной пены, обеспечивающей наивысшую интенсивность взаимодействия углекислого газа с раствором метасиликата натрия.

Экспериментальная часть

Описание технологической схемы. Аппарат (рис. 1) для карбонизации раствора натрия состоит из вертикальной трубки диаметром 60 *мм* с горизонтальной решеткой. Весь аппарат изготовлен из винипласта. Опыты в этом аппарате проводились с использованием решеток разного живого сечения от 3,64% до 18% по технологической схеме, представленной на рисунке 1. Раствор метасиликата натрия из бачка (1) постоянного уровня через подогреватель (2) и расходомер

раствора (3) поступает в пенный аппарат (4). Карбонизированный раствор метасиликата натрия собирается в баке (5). Воздух из РМК-2 через расходомер (6) подается в смеситель. Туда же через редуктор и расходомер подается углекислый газ из баллона. Получаемый в смесителе разбавленный газ через определенные промежутки времени анализировался для определения концентрации в нем CO_2 газоанализатором ОРС-а. Газ насыщался паром через вентиль (7); температуру газа и раствора метасиликата натрия измеряли термометрами (8) и (9).

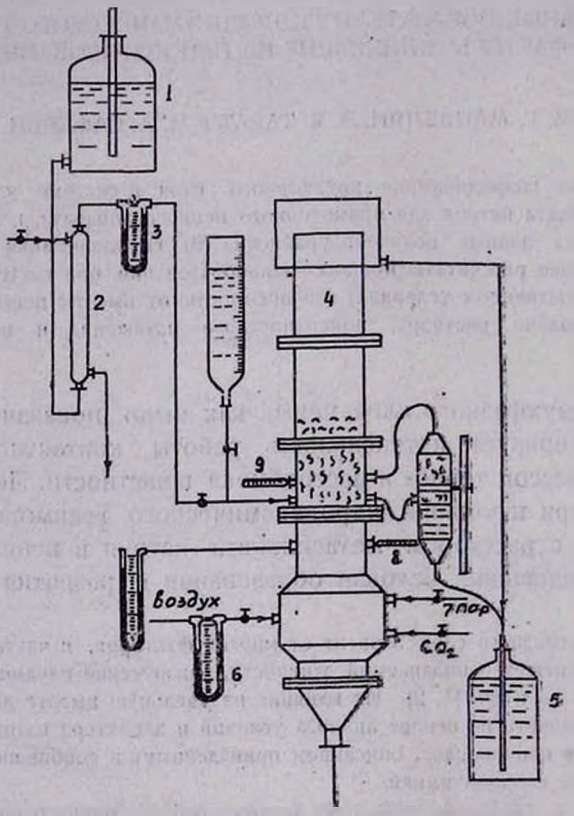

Рис. 1.

Установление гидродинамических параметров процесса взаимодействия углекислого газа с раствором метасиликата натрия проводилось при разных скоростях газа в полном сечении и разной температуре концентрации газа и раствора метасиликата натрия.

Гидродинамический режим пенного аппарата. Высота пены (H), определяемая расстоянием от решетки до среднего уровня верхнего края пены, является одним из основных показателей пенообразования, позволяющих судить о развитии поверхности контакта фаз. Коэффициент массопередачи, отношение к одному $м^2$ площади решетки, зависит от высоты пены, определяющей интенсивность работы

пенных аппаратов [3]. Теоретически и экспериментально доказано, что скорость тепло- и массопередачи между газом и жидкостью относительно площади сечения аппарата определяется, в основном, высотой слоя пены и степенью ее подвижности. Поэтому основным критерием при оценке эффективности пенного слоя является удельная высота пены $\frac{H}{h_0}$ [3], представляющая собой отношение:

$$H_{уд.} = \frac{H}{h_0} = \frac{V_п}{V_ж} = \frac{\gamma_ж}{\gamma_п} = \frac{1}{\varphi_ж},$$

где H — высота пены в $м$, h_0 — высота исходного слоя жидкости в $м$, $\gamma_ж$ — удельный вес раствора $Н/м^3$, $\gamma_п$ — удельный вес пены $Н/м^3$, $\varphi_ж$ — объемная доля раствора в пене.

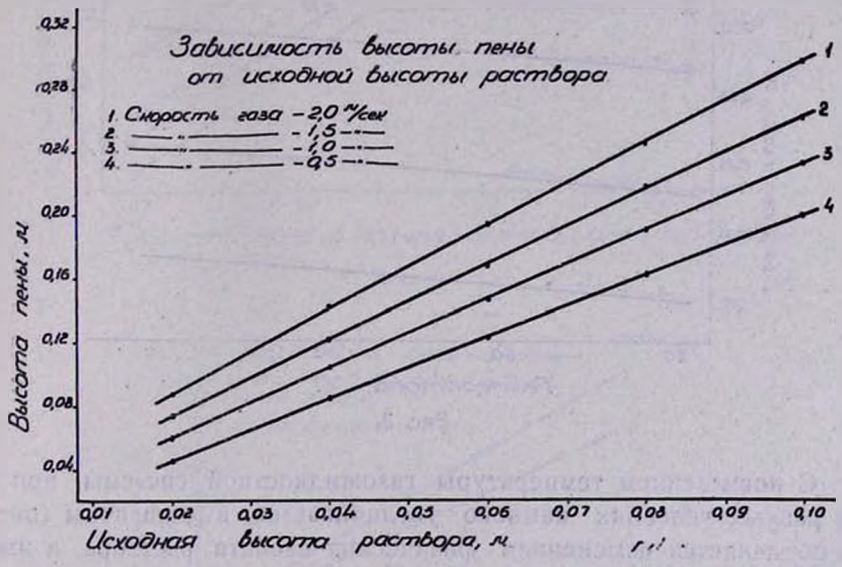

Рис. 2.

В условиях работы пенных аппаратов $H_{уд.}$ колеблется от 2 до 10.

Для исследования влияния скорости газа на пенообразование опыты проводились при скоростях газа в полном сечении аппарата $\omega = 0{,}5 \div 2{,}0$ $м$/сек и концентрации раствора метасиликата натрия от 200 до 600 $г/л$. Опыты проводились при высоте слоя исходного раствора метасиликата натрия $0{,}02 \div 0{,}10$ $м$.

Из рисунка 2 видно, что зависимость высоты слоя пены H от ω при различных значениях высоты (h_0) исходного раствора метасиликата натрия выражается семейством прямых линий.

На основе опытных данных эту закономерность можно выразить эмпирическим уравнением:

$$H = \frac{h_0 \cdot \omega}{10{,}5\, h_0 + 0{,}54} + 16{,}3\, h_0 + 0{,}032 \ м. \qquad (1)$$

Полученное эмпирическое уравнение может быть применено в достаточно больших пределах: для скоростей газа (ω) от 0,5 до 2,0 *м*/сек и для высоты исходного раствора (h_0) от 0,02 до 0,1 *м*. Экспериментальные данные показывают, что высота пены возрастает с увеличением слоя исходного раствора метасиликата натрия, что согласуется с литературными данными. Увеличение высоты слоя исходного раствора до определенного предела сначала улучшает качество пены, а затем ухудшает его вследствие возникновения барботажа у решетки. Удельный вес пены с возрастанием h_0 немного увеличивается.

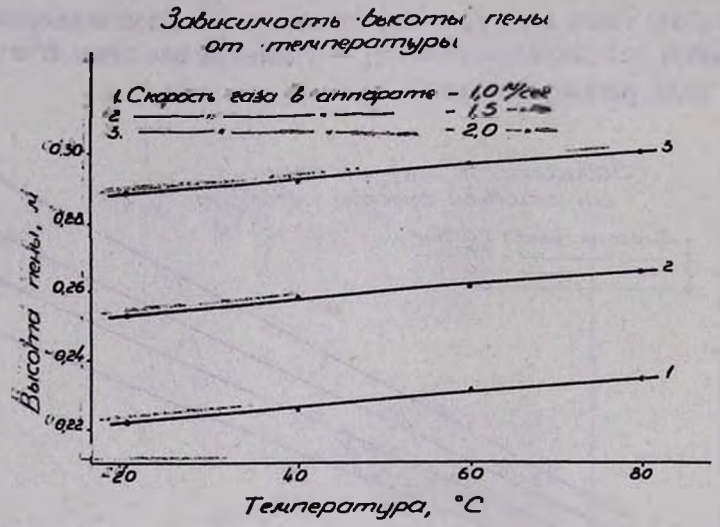

Рис. 3.

С повышением температуры газожидкостной системы при прочих равных условиях немного увеличивается высота пены (рис. 3), что объясняется изменением физических свойств раствора, а именно вязкости и поверхностного натяжения [4].

При повышении концентрации раствора метасиликата натрия от 200 до 600 *г*/*л* пенообразование ухудшается и высота несколько уменьшается (рис. 4) в связи с изменением физических свойств раствора с возрастанием удельного веса, вязкости и поверхностного натяжения. Связь между высотой пены, скоростью газа в аппарате и концентрацией раствора метасиликата натрия выражается прямыми, и уравнение для расчета H от ω и K имеет следующий вид:

$$H = (2{,}68 \cdot 10^5 \cdot K + 0{,}0512) \cdot \omega - 10^{-4} \cdot K + 0{,}222 \text{ м}, \qquad (2)$$

где K — концентрация раствора в *г*/*л*.

При изучении зависимости высоты пены от интенсивности подаваемого раствора, т. е. его количества, отнесенного к одному квадратному метру решетки, выяснилось, что для создания пенного режима необходима определенная интенсивность подачи раствора,

различная для различных условий. При поступлении жидкости на решетку часть ее стекает через отверстия решетки, часть уносится газом, а основная часть распределяется по решетке, превращаясь в пену. Как показали наши опыты, с увеличением интенсивности подачи

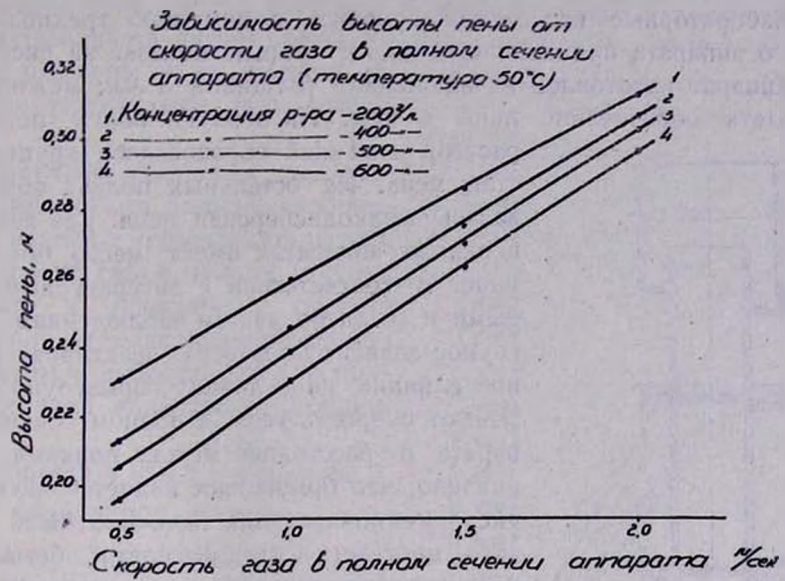

Рис. 4.

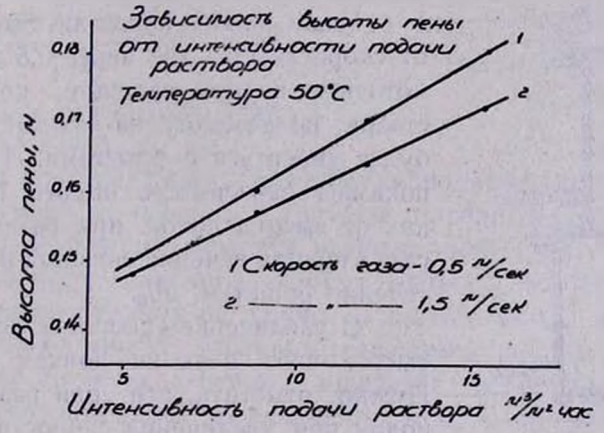

Рис. 5.

раствора высота пены возрастает (рис. 5) так как увеличивается высота слоя исходной жидкости. Минимальное значение высоты слоя исходного раствора, которое определяется нижним пределом возможного существования подвижного пенного слоя, согласно данным, равно 5 *мм* [1].

Для исследования карбонизации раствора метасиликата натрия углекислым газом мы применяли, как было выше указано, аппараты прямоточного типа, ввиду

возможности получения в них заполненных пеной полок и достаточной надежности в работе при изменении значений в широком диапазоне скорости газа и производительности. Устройство прямоточного пенного аппарата идентично аппаратам провального типа с той лишь разницей, что в них подача раствора производится снизу на первую полку, а отводится раствор с верхней полки.

Лабораторные исследования велись с помощью трехполочного пенного аппарата прямоточного типа, который показан на рисунке 6.

Аппарат изготовлен из винипласта толщиной 3 *мм*; можно было наблюдать образование пены в нем. На первую полку подавался раствор и на ней образовалась крупноячеистая пена. На остальных полках образовывалась мелкодисперсная пена. Как известно, в пенных аппаратах имеет место брызговой унос. В соответствии с литературными данными и согласно нашим наблюдениям, брызгоунос зависит от многих факторов; основное влияние на величину брызгоуноса оказывают скорость газа в полном сечении аппарата и расстояние между полками. Установлено, что брызгоунос является функцией числа Рейнольдса для газа. Как было показано многими исследователями, брызгоунос быстро увеличивается с ростом скорости газа, а с увеличением межполочного расстояния уменьшается [1—3].

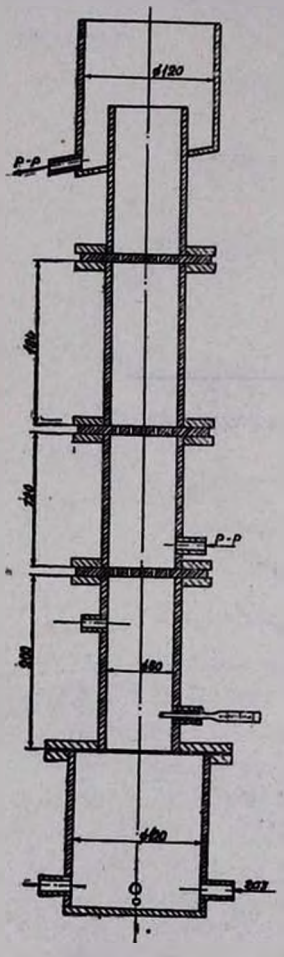

Рис. 6.

Наши опыты показали, что независимо от скорости газа (не менее 0,5 *м*/сек) в прямоточном пенном аппарате, количество раствора, подаваемого на каждый $м^2$ решетки, будет уноситься с брызгами. На рисунке 7 показана зависимость высоты пены на полках от высоты полок при разных скоростях газа в полном сечении аппарата при свободном сечении решетки, 9%.

С увеличением скорости газа в аппарате высота слоя пены на полках уменьшается. Нужно отметить, что при разных высотах полок при увеличении скорости газа получаются разные высоты пены, выраженные в процентном отношении к высоте полок.

На основе обработки опытных данных, высоту слоя пены на полках аппарата при разных скоростях газа в аппарате можно рассчитать с помощью полученной эмпирическпй формулы.

Для скорости газа $\omega = 0{,}5$ до 1,0 *м*/сек эта формула имеет следующий вид:

$$H = (0{,}78 \cdot \omega^{-0{,}233}) \cdot H_{пл.} + 0{,}01 - 0{,}0054\ \omega\ м; \qquad (3)$$

для скорости газа $\omega = 1{,}0 + 1{,}5$ *м*/сек.

$$H = (0{,}79\,\omega^{-0{,}233})\,H_{пл.} + 0{,}002\,\omega + 0{,}008\ м; \qquad (4)$$

для скорости газа $\omega = 1{,}5 \div 2{,}0$ м/сек.

$$H = (0{,}79\,\omega^{-0{,}233})\,H_{пл.} + 0{,}006 + 0{,}002\,\omega\ м. \qquad (5)$$

Увеличение высоты пены при абсорбции углекислого газа раствором метасиликата натрия положительно влияет на степень карбонизации раствора и на степень абсорбции углекислого газа (рис. 8 и 9).

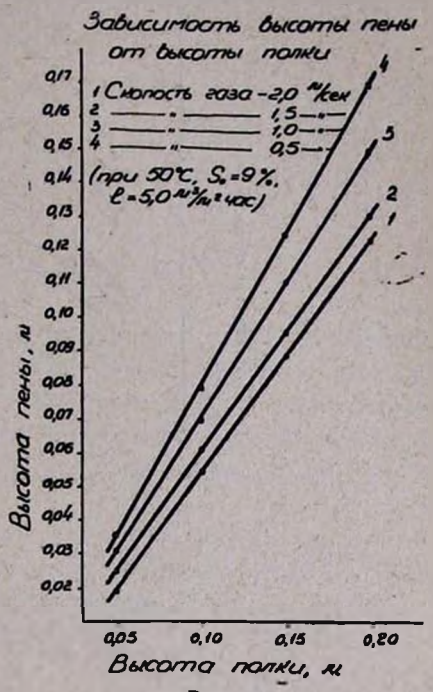

Рис. 7.

Получены уравнения для расчета зависимости степени карбонизации раствора метасиликата натрия от скорости газа в полном сечении аппарата и зависимости степени абсорбции углекислого газа от высоты пены и скорости газа в полном сечении аппарата (уравнения 6 и 7):

для скорости $\omega = 0{,}5 \div 2{,}0$ м/сек.

$$\Delta K = (0{,}024 \cdot \omega^{0{,}35})\,H + 13{,}7 \cdot \omega^{0{,}412}, \qquad (6)$$

где ΔK — повышенная степень карбонизации.

$$\eta = \frac{9{,}2\,H + 5{,}5}{\sqrt{\omega}}, \qquad (7)$$

где η — степень абсорбции углекислого газа.

В общем критериальном уравнении гидродинамики пенного слоя прямоточного пенного аппарата в качестве определяемого параметра применительно к пенному аппарату выбрана высота слоя пены, в качестве характерного линейного размера — высота полок, потому что свободное сечение решеток не влияет на высоту пены.

Как отмечают многие исследователи, при турбулентном режиме газожидкостной системы в пенных аппаратах из гидродинамических параметров преобладающим по влиянию является высота пены и потому уравнение, приведенное в сообщении I, можно упростить, вводя некоторые критерии в коэффициент пропорциональности:

$$\frac{H}{H_{пл.}} = K \cdot Re_г^n \cdot Re_ж^m \cdot We^k. \qquad (8)$$

Для установления различных зависимостей уравнения (8) изучали пенообразование в системе углекислый газ — раствор метасиликата натрия.

Было проведено много опытов на трехполочных аппаратах с диаметром от 60 до 120 *мм*, с разными свободными сечениями решеток, разными высотами полок, при различных гидродинамических ре-

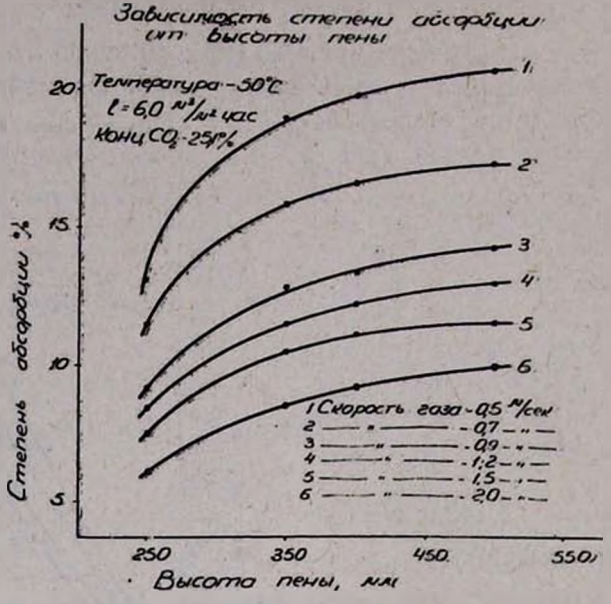

Рис. 8.

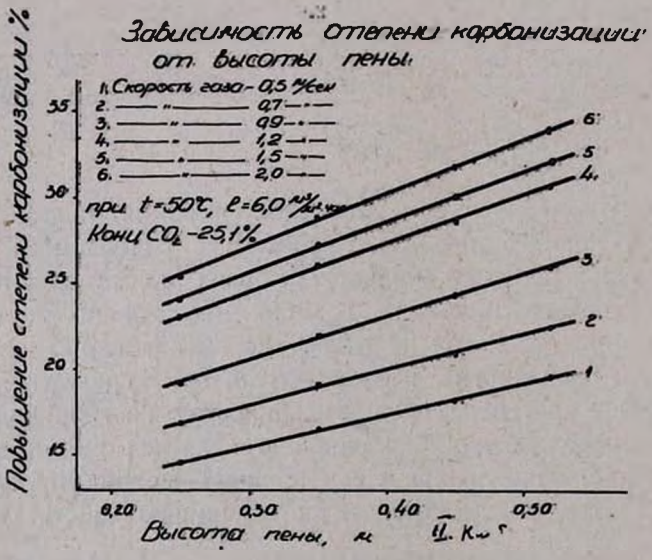

Рис. 9.

шениях, при изменении скорости газа в полном сечении аппарата от 0,5 до 2,0 *м*/сек и интенсивности подачи жидкости от 5 до 25 $м^3/м^2$ в час.

Построив зависимость $\frac{H}{H_{пл.}} = K_1 \cdot Re_г^n$, получаем несколько уравнений, из которых выводим значение величины показателя степени $Re_г$, где $n = -0{,}322$.

Графическим методом определяем и степенное значение для $Re_ж$, $We_ж$ и коэффициент пропорциональности, после чего расчетные критериальные уравнения можно представить следующим образом:

$$\frac{H}{H_{пл.}} = 3{,}76 \cdot Re_г^{-0{,}322} \cdot Re_ж^{0{,}26} \cdot We^{0{,}02} \qquad (9)$$

или

$$\frac{H}{H_{пл.}} = 3{,}76 \left(\frac{\omega \cdot D}{\nu_г}\right)^{-0{,}322} \cdot \left(\frac{L \cdot D}{\nu_ж}\right)^{0{,}26} \cdot \left(\frac{\sigma}{\gamma_ж \cdot d_0^2}\right)^{0{,}02}, \qquad (10)$$

где L — интенсивность подачи раствора, $м^3/м^2$ час.

D — диаметр аппарата, равен 1,13 $м$.

Отношение опытных точек к расчетной линии лежит в обычных пределах до $\pm 5\%$. Полученное уравнение гидродинамики двухфазного слоя в системе углекислый газ—раствор метасиликата натрия позволяет рассчитать процесс пенообразования при регулируемой высоте полок в производственных условиях в зависимости от высоты пены.

Полученные уравнения позволяют рассчитать необходимые геометрические параметры прямоточных пенных аппаратов при их проектировании, а также упростить процесс наладки аппаратов при пуске в эксплуатацию в промышленных условиях.

Ереванский научно-исследовательский
институт химии

Поступило 18 II 1967

ՆԱՏՐԻՈՒՄԻ ՄԵՏԱՍԻԼԻԿԱՏԻ ԿԱՐԲՈՆԻԶԱՑԻԱՆ ՓՐՓՐՄԱՆ ԱՊԱՐԱՏՈՒՄ

II. ՀԻԴՐՈԴԻՆԱՄԻԿԱԿԱՆ ՌԵԺԻՄԻ ՀԻՄՆԱԿԱՆ ՑՈՒՑԱՆԻՇՆԵՐԸ ԵՎ ՓՐՓՈՒՐԻ ԱՌԱՋԱՑՄԱՆ ՎՐԱ ԱԶԴՈՂ ԳՈՐԾՈՆՆԵՐԸ

Մ. Գ. ՄԱՆՎԵԼՅԱՆ, Է. ՅԱ. ՏԱՐԱՏ և Մ. Ա. ՍԱՖԱՐՅԱՆ

Ա մ փ ո փ ո ւ մ

Երկֆազ փրփրաշերտի բարձրությունը բնութագրում է ապարատի աշխատանքի ինտենսիվությունն ընդհանրապես և ջերմա- ու մասսափոխանակության պրոցեսի ինտենսիվությունը՝ մասնավորապես։ Այդ պատճառով ածխաթթվական գազի և նատրիումի մետասիլիկատի լուծույթի հիդրոդինամիկական փոխազդեցության ուսումնասիրության ժամանակ հիմնական խնդիրն է՝ ուսումնասիրել երկֆազ շերտի առաջացումը և զարգացումը։

Ածխաթթվական գազ — նատրիումի մետասիլիկատի լուծույթ սիստեմի երկֆազ շերտի հիդրոդինամիկալի ուսումնասիրությունից (ուղղահոս փրփրլման ապարատում) և փորձնական տվյալներից ստացվել է երկֆազ սիստեմի հիդրոդինամիկալի հավասարումը (9), որը հնարավորություն է տալիս հաշվել փրփուրի առաջացման պրոցեսը՝ կախված փրփուրի բարձրությունից, գազի արագությունից, լուծույթի մատակարարման ինտենսիվությունից, լուծույթի և գազի մակերևույթի լարվածությունից և մածուցիկությունից։

ЛИТЕРАТУРА

1. *М. Е. Позин, И. П. Мухленов, Е. С. Тумаркина, Э. Я. Тарат*, Пенный способ обработки газов и жидкостей. Госхимиздат, Ленинград, 1955 г.
2. *М. Е. Позин, И. П. Мухленов, Э. Я. Тарат*, Пенные газоочистители—теплообменники и абсорберы. Госхимиздат, Ленинград, 1959 г.
3. *И. П. Мухленов*, Докторская диссертация, Ленинград, 1954 г.; *Э. Я. Тарат*, Докторская диссертация, Ленинград, 1964 г.
4. *Г. К. Дьяконов*, Вопросы теории подобия в области физико-химических процессов, АН СССР, Москва, 1956 г.
5. *В. Г. Левич*, Физико-химическая гидродинамика. Физ. мат. изд., Москва, 1959 г.
6. *С. А. Богатых*, Комплексная переработка воздуха в пенных аппаратах, „Судостроение", Ленинград, 1964 г.
7. *Л. С. Эйгенсон*, Моделирование, „Советская наука", Москва, 1952 г.