

КАРБОНИЗАЦИЯ РАСТВОРА МЕТАСИЛИКАТА НАТРИЯ В ПЕННОМ АППАРАТЕ

III. ПОДОБИЕ ПРОЦЕССА МАССОПЕРЕДАЧИ В ПЕННОМ СЛОЕ В СИСТЕМЕ УГЛЕКИСЛЫЙ ГАЗ — РАСТВОР МЕТАСИЛИКАТА НАТРИЯ

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

В процессе абсорбции углекислого газа раствором метасиликата натрия, как видно, определяющими критериями процесса массообмена двухфазной системы в пенном режиме являются Re_r , $Re_{ж}$, Pe , симплекс гидродинамического подобия $\left(\frac{H}{H_{пл}}\right)$, характеризующий поверхность контакта газа и жидкости, симплекс концентраций карбонатных ионов начала и конца процесса, характеризующий условия массообмена в двухфазном пенном слое.

Имея вышеуказанную функциональную зависимость, определены степенные или чины полученного критериального уравнения массопередачи:

$$\frac{K_{аб. \infty}}{G} = 7,6 \cdot 10^{-1,2} \cdot Re_r^{3,3} \cdot Pe^{-2,1} \cdot \left(\frac{H}{H_{пл}}\right)^{3,3} \cdot \left(\frac{K_{II}}{K_{KH}}\right)^{-0,92} \cdot Re_{ж}^{0,305}.$$

Полученное расчетное уравнение массопередачи проверено сравнением с экспериментальными данными и доказана его применимость для расчета процесса массопередачи в двухфазной системе пенного режима углекислого газа с раствором метасиликата натрия.

Процессы массопередачи часто сочетаются с химическим взаимодействием передаваемого с жидкостью компонента. Они связаны с движением частиц, приводящим к выравниванию концентраций газа в газовой смеси и жидкости в данном объеме до равновесного состояния. Благодаря такому подобию имеется возможность изучения массообмена с использованием опытных данных по массообмену.

Теория аналогии процессов тепло- и массообмена разработана советскими и зарубежными учеными Берманом, Кафаровым, Маргулисом и другими [1,2].

Количество вещества G , переданного от одной фазы к другой, в любой двухфазной системе, в том числе и пенном слое, выражается формулой:

$$G = K_m \cdot F \cdot \Delta c \cdot \tau, \quad (1)$$

где K_m — коэффициент массопередачи; F — площадь сечения аппарата; Δc — средняя движущая сила массопередачи; τ — продолжительность процесса.

Количество вещества, диффундирующего в единицу времени через единицу поверхности в предусмотренном направлении ϕ , согласно закону Фика, выражается равенством:

$$g = -D \frac{\partial c}{\partial y}, \quad (2)$$

где D — коэффициент диффузии; $\frac{\partial c}{\partial y}$ — градиент концентрации в направлении нормали.

При наличии движущейся среды необходимо учитывать количество массы, переносимой ею:

$$g = -D \frac{\partial c}{\partial y} + \omega_y \cdot c. \quad (3)$$

Согласно закону диффузии, процесс этот характеризуется только наличием градиента концентрации или парциального давления диффундирующего вещества; процесс диффузии должен быть изотермическим. В действительности же, такой процесс всегда сопровождается теплообменом, влияющим, в свою очередь, на массообмен.

Так как в опытах обычно определяются не частные коэффициенты массоотдачи через пленки газа и жидкости, а общий коэффициент массоотдачи

$$K_M = \frac{1}{\frac{1}{\beta_r} + \frac{1}{\beta_{ж}}}, \quad (4)$$

где β — частный коэффициент массоотдачи, то вместо критерия Nu целесообразно было бы ввести критерий Маргулиса и Дьяконова, характеризующий соотношение радиального и осевого потоков массы в двигающейся среде.

Итак, в качестве определяемого компонента в рабочее уравнение массопередачи в пенном слое введен критерий Маргулиса—Дьяконова [3, 4]:

$$M = \frac{Nu}{Re \cdot P_2} = \frac{K_M}{\omega}. \quad (5)$$

Согласно описанным ранее принципам работы пенного аппарата и гидродинамики пенного слоя, по теории анализа размерностей получено следующее уравнение для массообмена:

$$\frac{K_{аб} \cdot \omega}{g} = A (Re_r)^a \cdot (Re_{ж})^b \cdot (Pe_r)^c \cdot (Pe_{ж})^d \cdot \left(\frac{K_M}{K_{KH}} \right)^g \cdot \left(\frac{H}{H_{пл}} \right)^n \times \\ \times \left(\frac{m}{d_0} \right)^k \cdot \left(\frac{D_a}{H_{пл}} \right)^q. \quad (6)$$

Раскрывая уравнение, получим:

$$\frac{K_{аб} \cdot \omega}{g} = A \left(\frac{\omega_r \cdot D_a}{\nu_r} \right)^a \cdot \left(\frac{L \cdot D_a}{\nu_{ж}} \right)^b \cdot \left(\frac{\omega_r \cdot D_a}{D_r} \right)^d \cdot \left(\frac{\omega_{ж} \cdot D_a}{D_{ж}} \right)^d \times \\ \times \left(\frac{K_n}{K_{кн}} \right)^g \cdot \left(\frac{H}{H_{пл}} \right)^n \cdot \left(\frac{m}{d_0} \right)^k \cdot \left(\frac{D_a}{H_{пл}} \right)^q, \quad (7)$$

где $Pe_r = \frac{\omega \cdot D_a}{D_r}$ — диффузионный критерий Пекля; $\frac{K_n}{K_{кн}}$ — симп-

лекс концентраций, представляющий отношение начальной и конечной концентраций абсорбируемого компонента в жидкости и характеризующий условия массообмена в двухфазном пенном слое.

Необходимо дальнейшее изучение тех изменений, которые вносятся гидродинамическими условиями в механизм и кинетику массопередачи. Определение значений степеней критериев и комплексов, входящих в уравнение (7), является задачей экспериментального исследования.

Экспериментальное изучение кинетики абсорбции углекислого газа растворами метасиликата натрия. Опыты по изучению кинетики абсорбции углекислого газа раствором метасиликата натрия были проведены с углекислым газом, разбавленным воздухом. Углекислый газ подавался из баллона через редуктор. Для обеспечения равномерной подачи газа баллон и редуктор поливались горячей водой, воздух нагнетался при помощи насоса РМК-2. Расход углекислого газа и воздуха измерялся с помощью реометров. Соответствие состава смесей заданному проверялось с помощью газометра ОРС.

При определенных физических и химических условиях процесс массопередачи хорошо растворимых газов находится в зависимости от величин, пропорциональных высоте пенного слоя и скорости газа. Для плохо растворимых газов, таких, как CO_2 , рост коэффициента массопередачи зависит от скорости абсорбции. В зависимости от скорости газа в пенном слое величина коэффициента скорости абсорбции проходит через максимум.

При рассмотрении рисунка 1 видно, что коэффициент абсорбции увеличивается почти пропорционально скорости газа до 1,5 м/сек, а при дальнейшем повышении скорости рост коэффициента абсорбции замедляется.

При абсорбции углекислого газа щелочными растворами (едкий натр, едкое кали или метасиликат натрия) давление углекислого газа над раствором равно нулю [4, 5, 6]; поэтому движущая сила массообмена для условий малой разницы концентраций абсорбируемого углекислого газа вычисляется как среднелогарифмическая величина разностей концентраций газа.

Известно, что если давление пара компонента над раствором равно нулю, то

$$\Delta\pi = \frac{\pi_1 - \pi_2}{\ln \frac{\pi_1}{\pi_2}}, \quad (8)$$

где $\Delta\pi$ — движущая сила процесса абсорбции,

π_1 — парциальное давление входящего углекислого газа,

π_2 — парциальное давление выходящего углекислого газа.

Зависимость коэффициента абсорбции от высоты пенного слоя при постоянных скоростях газа в пенном слое представлена на рисунке 2.

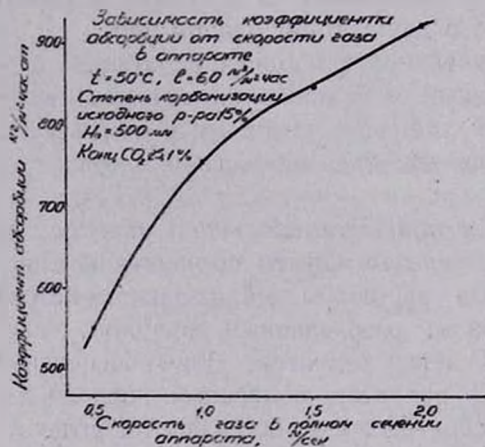


Рис. 1.

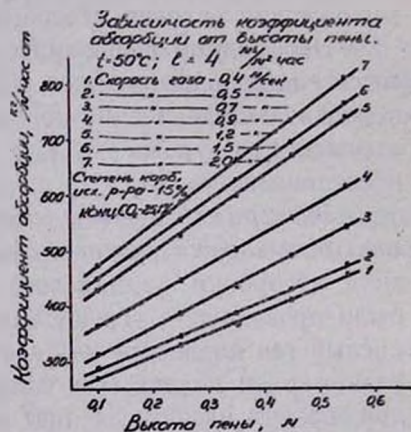


Рис. 2.

Как видно, коэффициент абсорбции углекислого газа раствором метасиликата натрия при данной скорости газа пропорционален высоте пенного слоя в изученных пределах.

Для карбонизации раствора метасиликата натрия углекислым газом необходима большая, развитая поверхность контакта фаз и турбулентность. На основе этого можно сказать, что с увеличением высоты пенного слоя и скорости газа коэффициент абсорбции возрастает, потому что с повышением высоты пены поверхность соприкосновения фаз увеличивается, а скорость газа в пенном слое создает турбулентный режим системы.

Обработка опытных данных дала возможность получить эмпирическую формулу для расчета коэффициента абсорбции в зависимости от высоты пенного слоя и скорости газа в аппарате:

$$\begin{aligned} &\text{для скорости } \omega = 0,5 \div 1,5 \text{ м/сек.} \\ K &= (233,5\omega + 316,35)H + 153,3\omega + 161,65 \text{ кг/м}^2 \text{ час.} \end{aligned} \quad (9)$$

Коэффициент абсорбции в пенном слое пропорционален количеству энергии, затраченному для вспенивания раствора метасиликата натрия.

Это означает, что с повышением гидравлического сопротивления пены, при прочих равных условиях, увеличивается высота пены. С повышением скорости газа в пенном слое меняется гидравлическое сопротивление двухфазной системы, величина которой может служить ориентировочным критерием интенсивности работы пенного аппарата.

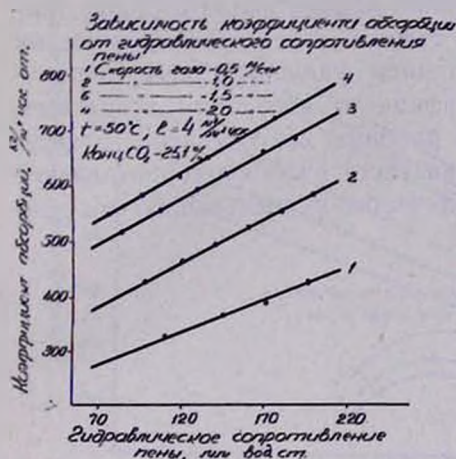


Рис. 3.

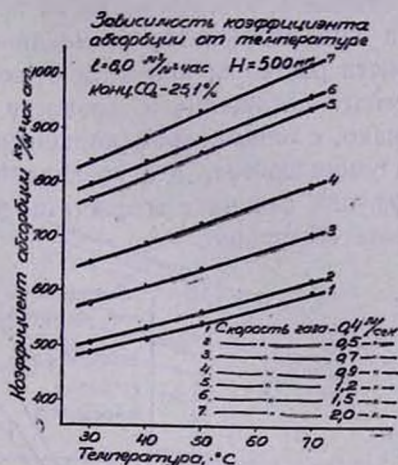


Рис. 4.

При снижении гидравлического сопротивления пены с повышением скорости газа в пенном слое, при прочих равных условиях, коэффициент абсорбции возрастает, поскольку увеличивается поверхность контакта фаз и возрастает турбулентность исследуемой системы. На рисунке 3 показана эта зависимость. Связь между этими величинами для разных значений скорости газа в аппарате выражается уравнением, имеющим следующий вид:

$$K_{ab} = (1,4 \cdot \omega^{0,33}) \Delta p + 290 \omega^{0,53} \text{ кг/м}^2 \text{ час. ат.} \quad (10)$$

При взаимодействии раствора метасиликата натрия с углекислым газом, при изменении температуры системы пенообразование несколько изменяется за счет изменения поверхностного натяжения и вязкости обеих фаз.

Как было показано при исследовании гидродинамики процесса, с повышением температуры высота пены немного увеличивается, а характер пены изменяется — создается более развитая поверхность соприкосновения фаз и поэтому, как видно на рисунке 4, с повышением температуры системы и скорости газа в пенном слое коэффициент абсорбции возрастает. Для расчета зависимости коэффициента абсорбции от температуры системы при разных скоростях газа получено уравнение:

$$K_{ab} = (388 \omega^{0,37}) \cdot t^{0,194} \quad (11)$$

Зависимость коэффициента абсорбции от концентрации раствора метасиликата натрия представлена на рисунке 5. Как видно, с

увеличением концентрации метасиликата натрия от 200 до 600 г/л значения коэффициента абсорбции возрастают. Это объясняется тем, что при сравнительно низкой концентрации метасиликата натрия в растворе величина движущей силы процесса абсорбции определяется условиями диффузии не только в газовой, но и в жидкой фазах. Нужно отметить, что, несмотря на повышение концентрации раствора, высота пены и характер ее меняются в связи с изменением физических свойств раствора; при этом с возрастанием удельного веса, поверхностного натяжения и вязкости коэффициент абсорбции возрастает. Однако, с повышением концентрации раствора сопротивление диффузии уменьшается, а с увеличением вязкости раствора сопротивление диффузии начинает возрастать, что приводит к уменьшению коэффициента абсорбции.

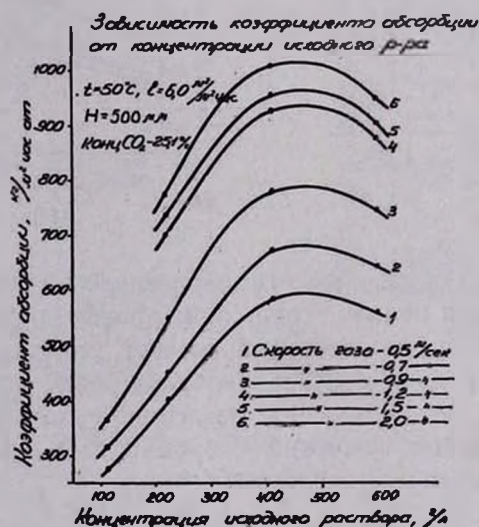


Рис. 5.

Влияние степени карбонизации исходного раствора метасиликата натрия на коэффициент абсорбции показано на рисунке 6.

С повышением степени карбонизации исходного раствора метасиликата натрия наблюдается уменьшение коэффициента абсорбции. Ухудшение условий абсорбции по мере увеличения степени карбонизации раствора приводит к уменьшению активной химической емкости раствора и увеличению диффузионного сопротивления жидкой фазы — из-за повышения содержания в ней CO_3^{2-} -иона, поскольку в частично карбонизированном растворе метасиликата натрия растворимость углекислого газа меньше, чем в чистом растворе [5]. По мере повышения степени карбонизации раствора метасиликата натрия коэффициент абсорбции уменьшается, а с увеличением турбулентности системы — повышается.

Зависимость коэффициента абсорбции от
степени карбонизации исходного раствора

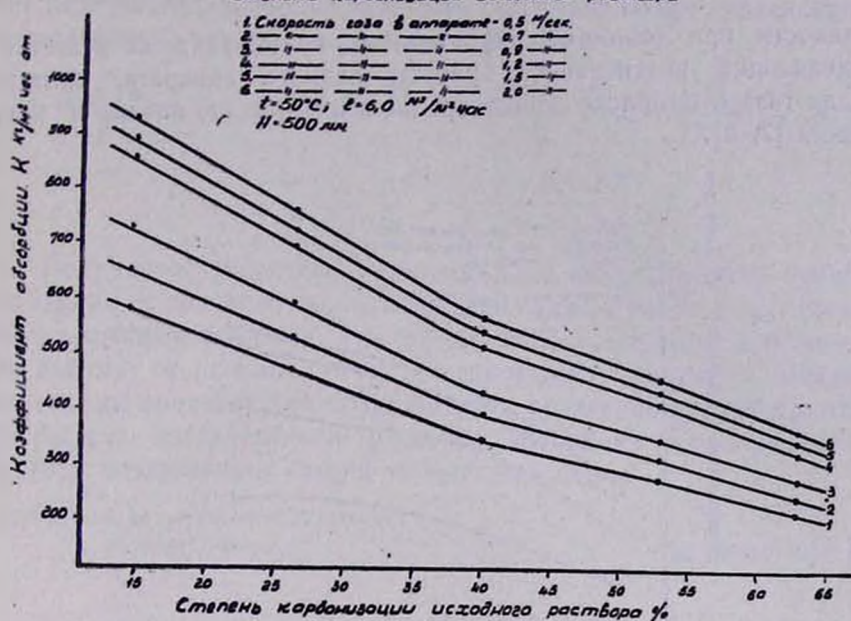


Рис. 6.

Зависимость коэффициента абсорбции от степени карбонизации раствора метасиликата натрия при разных скоростях газа в пенном слое выражена уравнением:

$$K = \frac{\omega}{(3,8 \cdot 10^{-5} \cdot K_n^{0,96}) \omega + 3,2 \cdot 10^{-5} K_n^{0,885}}, \quad (12)$$

где K — степень карбонизации исходного раствора.

На рисунке 7 показано влияние интенсивности подачи раствора, отнесенной на один квадратный метр решетки ($1 \text{ м}^3/\text{час} \cdot \text{м}^2$), на величину коэффициента абсорбции. Увеличение коэффициента абсорбции по мере увеличения интенсивности подачи раствора объясняется уменьшением диффузионного сопротивления при соприкосновении углекислого газа с новыми поверхностями раствора, созданными при повышении интенсивности подачи раствора. Однако, нужно отметить, что с повышением скорости от 1,5 до 2,0 м/сек возрастание величины коэффициента абсорбции несколько замедляется.

Полученное уравнение (6) для расчета массопередачи или коэффициента абсорбции в пенном аппарате содержит величину исходного слоя жидкости, которая в предусмотренной конструкции аппарата не определяется.

Определяющими критериями процесса массообмена при карбонизации раствора метасиликата натрия углекислым газом в аппарате с пенным режимом являются Re_r и $Re_{ж}$ — симплекс гидродинами-

ческого подобия $\frac{H}{H_{пл}}$, характеризующий поверхность контакта газа и жидкости при различном времени их пребывания на решетке и определяющий интенсивность работы пенного аппарата, критерий Re_r для газа и симплекс концентрации карбоната в начале и конце процесса [7, 8].

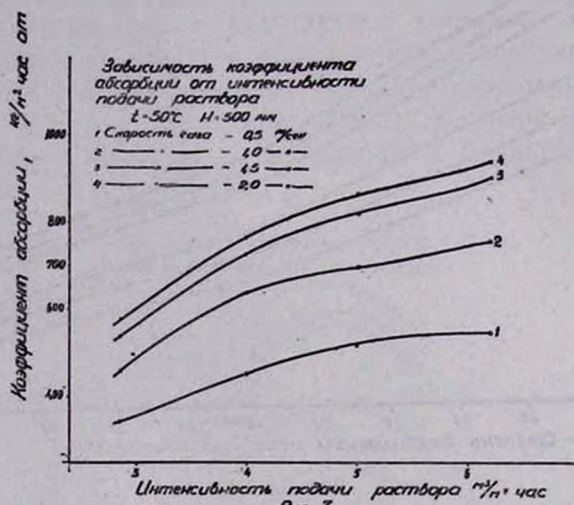


Рис. 7.

Таким образом, уравнение, описывающее процесс карбонизации раствора метасиликата натрия углекислым газом в пенном слое, в функциональной степенной зависимости имеет следующий вид:

$$\frac{K_{аб} \cdot \omega}{g} = K \cdot Re_r^n \cdot Re_{ж}^m \cdot P_c^e \cdot \left(\frac{H}{H_{пл}} \right)^z \cdot \left(\frac{K_{н}}{K_{кн}} \right)^q. \quad (13)$$

Опыты показали, что коэффициент абсорбции почти не меняется с изменением свободного сечения решетки и, поэтому, симплекс $\frac{S_1}{S_2}$ исключается из критериального уравнения.

Поскольку в литературе нам не удалось найти данных о зависимости изменения коэффициента диффузии раствора метасиликата натрия от увеличения CO_3^{2-} -иона, вместо критерия Пекля ($Pe_{ж}$) в критериальное уравнение, характеризующее массопередачу, подставляем симплекс, зависящий от концентрации карбонатного иона.

Имея уравнение для расчета массопередачи, можно найти величины степеней уравнения. Получена зависимость коэффициента абсорбции от интенсивности подачи раствора, $K = f(L)$, от скорости газа в пенном слое $K = f(\omega)$, от высоты пенного слоя $K = f(H)$, от степени карбонизации исходного раствора и от концентрации углекислого газа $K = f(C)$ [7, 9, 10, 11].

Наличие вышеуказанной функциональной зависимости и позволяет определить степенные величины критериального уравнения для массопередачи, которые выражаются уравнением:

$$\frac{K_{аб.} \cdot \omega}{g} = 7,6 \cdot 10^{-12} \left(\frac{\omega_r \cdot D_a}{\gamma_r} \right)^{3,3} \cdot \left(\frac{H}{H_{пл}} \right)^{3,3} \cdot \left(\frac{\omega_r \cdot D_a}{D_r} \right)^{-2,1} \times \\ \times \left(\frac{K_H}{K_{KH}} \right)^{-0,92} \cdot \left(\frac{L \cdot D_a}{\gamma_{ж}} \right)^{0,305}, \quad (14)$$

Полученное расчетное уравнение для массопередачи проверено сравнением с экспериментальными данными. Графическая проверка этого уравнения показала, что оно полностью отражает средне-опытные данные; отклонение точек от расчетных находится в обычных допустимых пределах (до 20%), поэтому уравнение вполне применимо для расчета массопередачи процесса абсорбции или карбонизации раствора метасиликата натрия углекислым газом.

Ереванский научно-исследовательский
институт химии

Поступило 18 II 1967

ՆԱՏՐԻՈՒՄԻ ՄԵՏԱՍԻԼԻԿԱՏԻ ԼՈՒՄՈՒՅԹԻ ԿԱՐԲՈՆԻԶԱՑԻԱՆ ՓՐՓՐԱՑԻՆ ԱՊԱՐԱՏՈՒՄ

III. ԱՄԵԱԹՔԱԿԱՆ ԳԱՋ—ՆԱՏՐԻՈՒՄԻ ՄԵՏԱՍԻԼԻԿԱՏԻ ԼՈՒՄՈՒՅԹ ՍԻՍՏԵՄԻ ՓՐՓԱՑԻՆ ՇԵՐՏՈՒՄ ՄԱՍՍԱՓՈԽԱՆՑՄԱՆ ՊՐՈՑԵՍԻ ՆՄԱՆՈՒՅՑՈՒՄԸ

Մ. Գ. ՄԱՆՎԵՋԱՆ, Է. ՅԱ. ՏԱՐԱՏ, Մ. Ա. ՍԱՅԱՐՅԱՆ

Ա մ փ ո փ ո լ մ

Մասսափոխանցման պրոցեսները հաճախ համընկնում են քիմիական փոխազդեցության հետ: Մասսափոխանցման պրոցեսները կապված են մասնիկների շարժման հետ, որը հանգեցնում է գազի կոնցենտրացիայի հավասարեցմանը գազային խառնուրդում և լուծույթի տվյալ ծավալում, մինչև հավասարակշռված վիճակը:

Երկֆազ սխեմում (փրփուրի շերտում) մի ֆազից մյուսն անցնող նյութի քանակն արտահայտվում է հետևյալ բանաձևով $G = K_a \cdot F \cdot \Delta C \cdot \tau$: Մասսափոխանցման պրոցեսն ուսումնասիրելու համար պետք է ուսումնասիրել դիֆուզիոն երևույթը և նատրիումի մետասիլիկատի լուծույթում ածխաթթվական գազի բարորբցիայի կինետիկան: Դժվար լուծվող գազերի, ինչպես օրինակ CO_2 համար, մասսափոխանցման գործակիցը կախված է բարորբման արագության գործակիցից, որն իր հերթին կախված է փրփուրի շերտում գազի արագությունից: Ուսումնասիրությունները ցույց են տվել, որ գազի արագությունը մինչև 1,5 մ/վ մեծացնելիս բարորբման գործակիցը մեծանում է. հետագա մեծացումը շատ քիչ է ազդում բարորբման վրա: Բարորբման գործակիցը կախված է փրփուրի շերտի բարձրությունից, հիդրավլիկական

դիմադրությունից, շերմաստիճանից, լուծույթի կոնցենտրացիայից, կարրոնիզացիայի աստիճանից, լուծույթի մատակարարման ինտենսիվությունից:

Ածխաթթվական գազի և նատրիումի մետասիլիկատի լուծույթի արսորման պրոցեսում մասսափոխանցման պրոցեսը որոշիչ չափանիշներ են հանդիսանում $Re_{\tau} \cdot Re_{\kappa}$ և հիդրոդինամիկական սիմպլիքսը (H/H), գազի և հեղուկի շփման մակերեսը, պրոցեսի սկզբում և վերջում կարրոնատային իոնի կոնցենտրացիայի սիմպլիքսը, որը բնորոշում է երկֆազ փրփրային շերտում մասսափոխանցման պրոցեսը, և չափանիշը:

Այդ բոլորն արտահայտվում է հետևյալ բանաձևով՝

$$\left(\frac{K_{\text{a6}} \omega}{g} = 7,6 \cdot 10^{-12} (Re_{\tau})^{3,3} \cdot (Re_{\kappa})^{0,305} \cdot (Re)^{-2,1} \cdot \left(\frac{H}{H_{\text{III}}} \right)^{3,3} \cdot \left(\frac{K}{K_{\text{KH}}} \right)^{-0,92} \right),$$

որն ստուգված է փորձնական տվյալներով:

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Тадеуш Хоблер, Массопередача и абсорбция. Изд. „Химия“, Ленинград, 1964 г.
2. В. В. Кафаров, Основы массопередачи. Гос. изд. Высшая школа, г. Москва, 1962 г.
3. М. Е. Позин, И. П. Мухленов, Е. С. Тамаркина, Э. Я. Тарат, Пенный способ обработки газов и жидкостей. Госхимиздат, Ленинград, 1955 г.
4. М. Е. Позин, И. П. Мухленов, Э. Я. Тарат, Пенные газоочистители—теплообменники и абсорберы. Госхимиздат. Ленинград, 1959 г.
5. М. Е. Позин, Б. А. Копылев, Э. Я. Тарат, ЖПХ, 22 1004 и 1011 (1959).
6. В. М. Рамм, Абсорбционные процессы в химической промышленности. Госхимиздат, Москва, 1951 г.
7. Л. С. Эйгенсон, Моделирование, Госхимиздат „Советская наука“, г. Москва, 1952 г.
8. И. П. Мухленов, Докторская диссертация, 1954 г. Э. Я. Тарат, Докторская диссертация, г. Ленинград, 1964 г.
9. Витцело Долегиалак, Подобие и моделирование в химической технологии. Госхимиздат, г. Москва, 1960 г.
10. Л. М. Батунер, М. Е. Позин, Математические методы в химической технике. Госхимиздат, г. Ленинград, 1960 г.
11. М. В. Кирпичев, Теория подобия. Изд. АН СССР г. Москва, 1953 г.