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

ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

УДК 532.5+66.023+661.683+677.044.312

КАРБОНИЗАЦИЯ РАСТВОРА МЕТАСИЛИКАТА НАТРИЯ В ПЕННОМ АППАРАТЕ

I. ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ ПОДОБИЯ В ПРЯМОТОЧНОМ ПЕННОМ АППАРАТЕ

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

Выяснена закономерность гидродинамического взаимодействия между газом и жидкостью в прямоточном пенном аппарате, зависящая от многих факторов: скорости газа, интенсивности потока жидкости, физических параметров газа и жидкости, давления газа и их влияния на характер двухфазного слоя. Выведены критериальные уравнения гидродинамики и гидравлического сопротивления газожидкостной системы в прямоточном пенном аппарате.

Исходным сырьем для исследования служил девятиводный метасиликат натрия — $Na_2SiO_3 \cdot 9H_2O$.

Нефелиновый сиенит подвергается химическому обогащению обработкой в автоклавах равновесными концентрированными растворами едкого натра и кали. При этом часть кремнезема породы переходит в раствор. После фильтрации пульпы выделяется щелочнокремнеземистый раствор, из которого кристаллизовывается девятиводный метасиликат натрия. При карбонизации раствора последнего углекислым газом скорость поглощения определяется скоростью диффузии в жидкой и газовой пленках; следовательно, при выборе аппарата нужно ориентироваться на возможность создания максимальной поверхности соприкосновения жидкости с газом и интенсивного перемешивания раствора.

Из различных способов интенсификации процесса взаимодействия газожидкостных систем наиболее эффективными являются те, которые основываются на значительном увеличении межфазной поверхности, на резком уменьшении диффузионного сопротивления и на непрерывном обновлении поверхности контакта фаз. Таким способом является значительная турбулизация газожидкостной системы. Следовательно, применяя значительные скорости газа, можно создать на ситчатой тарелке качественно новый режим, при котором слой барботажа полностью отсутствует, а вся жидкость находится на решетке в виде подвижной пены, обладающей динамической устойчивостью. Этот режим называется пенным, а аппарат, в котором он осуществляется, пенным аппаратом. Пенные аппараты для обработки газов и жидкостей, разработанные в ЛТИ им. Ленсовета под руководством профессора Позина, имеют ряд преимуществ над аппаратами барботажного и других типов [1].

Для карбонизации раствора метасиликата натрия разработан прямоточный пенный аппарат, исключающий накопление силикагеля на стенках. Такой аппарат целесообразен ввиду возможности иметь в нем заполненные пеной полки в достаточно широком диапазоне колебаний скорости газа и производительности. Прямоточные пенные аппараты идентичны аппаратам провального типа, только подача раствора в них производится на первую снизу полку, а отводится он с верхней полки.

Гидродинамические условия подобия. Общие закономерности гидродинамического взаимодействия между газом и жидкостью в прямоточном пенном аппарате зависят от многих факторов, таких, как скорость газа, интенсивность потока жидкости, физические параметры газа и жидкости, давление газа и др. Их влияние на характер двухфазного слоя можно установить на основе анализа условий и характера взаимодействия сред в этом слое посредством описания его известными дифференциальными уравнениями гидродинамики [2, 3].

В двухфазовом слое, кроме поступательных движений потоков, имеют место интенсивные турбулентные пульсации фаз различного направления и величины. Поэтому можно описать отдельно потоки газа и жидкости в этой системе [3].

Вывод уравнений для условий двухфазного слоя можно произвести на основе законов для однофазной среды [4]. Однако в этом случае вывод уравнений должен отличаться, как это рекомендует Мухленов, введением множителей, отражающих состав двухфазного слоя $\varphi_г$ и $\varphi_ж$. Для удобства практического применения объемную долю газа $\varphi_г$ и жидкости $\varphi_ж$ можно выразить в уравнении через удельную высоту пены $\frac{H}{h_0}$ или обратную ей величину $\frac{h_0}{H}$, зная что:

$$H_{уд.} = \frac{H_п}{h_0} = \frac{V_п}{V_ж}, \qquad (1)$$

где $H_{уд.}$ — удельная высота пены, $H_п$ — высота слоя пены, h_0 — высота исходного слоя жидкости, $V_ж$ — объем жидкости, из которой образуется пена, $V_п$ — объем пены.

$$\varphi_г = \frac{H - h_0}{H} = 1 - \frac{h_0}{H}, \qquad (2)$$
$$\varphi_ж = \frac{h_0}{H}.$$

Уравнение непрерывности потока газа и жидкости отражает закон сохранения массы в пенном слое при неразрывности потока в период пуска или изменения режима пенного аппарата; в векторной форме имеем уравнение непрерывности:

$$\frac{\partial\left[\rho_г\left(1 - \frac{h_0}{H}\right)\right]}{\partial\tau} + div\left[\rho_г \cdot \omega_г \cdot \left(1 - \frac{h_0}{H}\right)\right] = 0, \qquad (3)$$

$$\frac{\partial\left(\frac{h_0}{H}\right)}{\partial\tau}+\frac{h_0}{H}\cdot div\,(\omega_ж)=0. \qquad (4)$$

При установившемся движении потоков из уравнений (3) и (4) выпадает временный член; оно приобретает следующий вид:

$$\rho_г\cdot\varphi_г\,\frac{\partial(\omega_{гy})}{\partial y}=0 \quad \text{или} \quad \frac{\partial(\omega_{гy})}{\partial y}=0, \qquad (5)$$

$$\varphi_ж\cdot\,\frac{\partial(\omega_{жy})}{\partial y}=0 \quad \text{или} \quad \frac{\partial(\omega_{жy})}{\partial y}=0. \qquad (6)$$

Уравнение движения основано на законе количества движения массы газа и жидкости относительно элементарного объема двухфазного слоя. Согласно этому закону, изменение количества движения массы газа или жидкости, находящихся в элементарном объеме, за единицу времени равно геометрической сумме внешних сил, действующих на эту массу.

Движение газа и жидкости в прямоточном пенном аппарате, взаимодействие фаз в параллельном потоке газа и жидкостей происходит под напором снизу вверх. Равнодействующая сила тяжести давления и трения равна произведению массы, находящейся в элементарном объеме параллелепипеда, на ее ускорение, которое выражается субстациональной производной $\frac{D\omega_ж}{d\tau}$, согласно закону количества движения равнодействующих сил; тогда уравнения движения для жидкостей в проекции на оси X, Y, Z будут следующими:

$$\rho_ж\,\frac{D\cdot\omega_{жx}}{d\tau}=\mu_ж\nabla^2\cdot\omega_{жx}-\frac{dp_ж}{dx},$$

$$\rho_ж\,\frac{D\cdot\omega_{жx}}{d\tau}=\mu_ж\nabla^2\cdot\omega_{жy}-\frac{dp_ж}{dy}-\rho_ж\cdot g, \qquad (7)$$

$$\rho_ж\,\frac{D\cdot\omega_{жz}}{d\tau}=\mu_ж\nabla\cdot\omega_{жz}-\frac{dp_ж}{dz}$$

для неустановившегося режима работы прямоточного пенного аппарата.

При установившемся режиме можно считать, что скорости жидкости постоянны во времени и в пространстве, поэтому, пренебрегая конвективной частью субстациональной производной, уравнения движения можно выразить следующим образом:

$$\frac{\partial p_ж}{\partial x}=\mu_ж\nabla^2\cdot\omega_{жx},$$

$$\rho_ж g+\frac{\partial p_ж}{\partial y}=\mu_ж\cdot\nabla^2\cdot\omega_{жy}, \qquad (8)$$

$$\frac{\partial p_ж}{\partial z}=\mu_ж\cdot\nabla^2\cdot\omega_{жz}.$$

Из этих уравнений видно, что силы трения компенсируются за счет перепада давления. Максимальное трение имеет место в вертикальном направлении; это не что иное, как существующие по оси силы трения, вызванные параллельным потоком газа и жидкости.

Уравнение движения по осям X и Z однотипное. По этим осям перепада давления фактически нет, так как в аппарате имеет место массовое поступательное движение. Поэтому сила трения по осям X и Z возникает только за счет турбулентной пульсации.

Для анализа процесса можно принять движение жидкости одномерным, соответствующим поступательному движению, параллельному оси Y. Тогда $\omega_{жz} = \omega_{жx} = 0$, и уравнения (8) принимают соответствующий вид:

$$\frac{\partial p_ж}{\partial x} = 0, \qquad \frac{\partial p_ж}{\partial z} = 0. \tag{9}$$

Из уравнения (9) видно, что давление в жидкости по направлению осей X и Z является постоянным, следовательно, члены $\mu_ж \cdot \nabla^2 \cdot \omega_{жx}$ и $\mu_ж \cdot \nabla^2 \cdot \omega_{жz}$ в уравнениях можно исключить, что не вызывает значительной погрешности в численных расчетах.

Уравнения (8) по оси Y выражают равенство сил давления, вызывающих ускорение жидкости в пенной среде и противодействующих трению. Взаимодействие сил в движущемся газе выражается следующим образом: принимая движение газа одномерным и параллельным оси Y, получаем систему уравнений, приближенно отражающих взаимодействующие силы:

$$\frac{\partial p_г}{\partial x} = 0,$$

$$\rho_г \cdot \omega_{гy} \frac{\partial \omega_{гy}}{\partial y} = \rho_г \frac{\partial^2 \omega_{гy}}{\partial y^2} - \frac{\partial p_г}{\partial y} - \rho_г \cdot g, \tag{10}$$

$$\frac{\partial p_г}{\partial z} = 0.$$

Можно отметить также, что для напорного течения газа снизу вверх (по оси Y) перепад давления в горизонтальной плоскости слоя пены (по осям X и Z) должен быть незначительным, что и доказывается приближенной формулой (10), отражающей тот факт, что при прохождении газа в слое снизу вверх (по оси Y) в пенном слое, по существу, происходит работа силы давления против силы трения, так как остальные силы несущественны.

Составленных уравнений и краевых условий недостатачно для аналитического решения задачи, но эти уравнения позволяют установить функциональные зависимости между определяемыми и определяющими параметрами с помощью теории подобия.

Для вывода уравнений движения и вычисления физического смысла их членов в различных условиях удобно использовать декартовую координатную форму. В дальнейшем, для удобства применения уравнений движения Навье-Стокса, выразим их и в более компактной векторной форме:

$$\frac{\partial \omega_г}{\partial \tau} + (\omega_г \cdot \text{grad}) \cdot \omega_г = \nu_г \nabla^2 \cdot \omega_г + \frac{1}{3} \nu_г \cdot \text{grad} \cdot \text{div}\, \omega_г -$$

$$- \frac{1}{\rho_г} g \cdot \text{grad}\, p - g. \quad (11)$$

Для несжимаемой жидкости при установившемся режиме уравнение упрощается, так как в данном случае отпадает временный член и $\frac{\partial \omega_ж}{\partial \tau}$.

В выражении для сил внутреннего трения опущено 1/3 g rad, так как этой частью можно практически пренебречь:

$$(\omega_г \cdot g\,\text{rad}) \cdot \omega_г = \nu_г \cdot \Delta^2 \cdot \omega_г - \frac{1}{\rho} \cdot g\,\text{rad} \cdot p - g$$

или (12)

$$\rho_г \frac{d\omega_г}{d\tau} = \mu_г \cdot \nabla^2 \cdot \omega_г + \rho g - g\,\text{rad}\, p_г.$$

Для жидкости получаем:

$$(\omega_ж \cdot g\,\text{rad}) \cdot \omega_ж = \nu_ж \cdot \nabla^2 \omega_ж - \frac{1}{\rho_ж} \cdot g\,\text{rad}\, p_ж - g. \quad (13)$$

Члены уравнений (12) и (13) имеют размерность *кг/см*^{3} и, следовательно, их можно отнести к силам, выраженным единицами объема. Движущие силы ρg, сила тяжести и $g\,\text{rad}\, p$, перепад давления находятся в равновесии с силами инерции $-\rho \frac{d\omega}{d\tau}$ и силами трения $\mu \left(\nabla^2 \cdot \omega + \frac{1}{3} g\,\text{rad} \cdot \text{div} \cdot \omega\right)$; значит

$$\rho \frac{d\omega}{d\tau} - \mu \nabla^2 \cdot \omega = \rho g - g\,\text{rad}\, p. \quad (14)$$

На основании изложенных соображений можно дать следующую математическую формулировку начальных и краевых условий, содержание которых было выяснено. Так как движение возникает из состояния покоя, то начальные условия будут приняты следующим образом: при $\tau = 0$, $\omega_г = 0$, $\omega_ж = 0$. Эти граничные условия одинаковы как для неустановившегося, так и для стационарного течения.

Для каждой точки на границе раздела газа и жидкости должны существовать следующие равенства:

1. $\omega_г = \omega_ж$ — равенство скоростей;
2. $\mu_г \cdot g\,\text{rad} \cdot \omega_г = \mu_ж \cdot g\,\text{rad}\, \omega_ж$ — равенство силы трения;

3. $p_г = p_ж + \sigma\left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2}\right)$ — равенство давления и поверхностного натяжения;

σ — коэффициент поверхностного натяжения; r_1 и r_2 — радиусы кривизины.

Для осуществления движения имеет решающее значение не абсолютное значение давления, а так называемый перепад давления. Поэтому, для определения условия подобия (11) в поля давлений удобно ввести постоянный множитель P_0:

$$P_г = P_0 \cdot P_г, \qquad P_ж = P_0 \cdot P_ж .$$

Для физических констант имеют место соотношения:

$$T = \frac{\tau}{\tau_0}, \qquad R_ж = \frac{\rho_ж}{\rho_0}, \qquad \Sigma = \frac{\sigma}{\sigma_0},$$

$$G = \frac{g}{g_0}, \qquad N_г = \frac{\nu_г}{\nu_0}, \tag{15}$$

$$R_г = \frac{\rho_г}{\rho_0}, \qquad N_ж = \frac{\nu_ж}{\nu_0}.$$

Все величины в уравнениях приводим к безразмерным при помощи относительных единиц измерения для одноименных величин. Кроме того, в общее критериальное уравнение можно включить без масштабных преобразований следующие члены:

$$\frac{\omega_г}{\omega_ж} \text{ и } \frac{\nu_ж}{\nu_г} \qquad \frac{H}{h_0} \text{ и } \frac{H_{пл}}{D_а}$$

$$\frac{H}{h_0} \text{ и } \frac{h_0}{D_а} \qquad \frac{\omega_б}{\omega_п} \text{ и } \frac{S_1}{S_2} \qquad \varphi_ж = \frac{h_0}{H}, \tag{16}$$

$$\frac{H}{h_0} \text{ и } \frac{m}{d_0} \qquad \varphi_г = 1 - \frac{h_0}{H}$$

так как все они являются безразмерными симплексами или комплексами.

Из уравнения непрерывности следует:

$$\frac{\rho_0 \cdot \omega_0}{l_0} \cdot \operatorname{div}(\rho_г \cdot W_г) = 0, \qquad \frac{\rho_0 \cdot \omega_0}{l_0} = \frac{0}{0},$$

а из уравнения движения:

$$\frac{\omega_0}{\tau_0} \cdot \frac{\partial W_г}{\partial T} + \frac{\omega_0^2}{l_0}(W_г \cdot g\,\mathrm{rad}) \cdot W_г = \frac{\nu_0 \cdot \omega_0}{l_0^2}(\nabla^2 W_г +$$

$$+ \frac{1}{3} g\,\mathrm{rad} \cdot \operatorname{div} W_г) - \frac{p_0}{\rho_0 \cdot l_0} g\,\mathrm{rad} - g_0 G. \tag{17}$$

Если эти системы уравнений тождественны, то числовые множители в соответствующих уравнениях должны быть равны:

$$\frac{\omega_0}{\tau_0} = \frac{\omega_0^2}{l_0} = \frac{\nu_0 \cdot \omega_0}{l_0^2} = \frac{P_0}{\rho_0 \cdot l_0} = g_0. \tag{18}$$

Во всех уравнениях (15) имеется 12 переменных величин ($N = 12$), в том числе с неодинаковыми размерностями ($n = 8$) и с независимыми размерностями ($K = 3$). Следовательно, в критериальном уравнении, полученном из равенства (15), должно быть $C = N - n = 12 - 8 = 5$ симплексов и $K = n - k = 8 - 3 = 5$ комплексов [5, 3].

Преобразуя инварианты уравнения (15), получаем уравнение гидродинамического подобия пенного слоя для параллельных потоков газа и жидкости при установившемся движении:

$$F\left(Re_{\text{г}},\ Re_{\text{ж}},\ We_{\text{ж}},\ Eu,\ \frac{H}{h_0},\ \frac{\nu_{\text{г}}}{\nu_{\text{ж}}},\ \frac{H_{\text{пл.}}}{h_0},\ \frac{m}{d_0}\ \frac{S_1}{S_2}\right) = 0. \tag{19}$$

Если пенный слой изучается с точки зрения развития поверхности соприкосновения фаз, F, интенсивности процесса массо- и теплопередачи (отношение в единицах объема или поверхности решеток), то определяющим критерием будет симплекс:

$$\frac{H}{H_{\text{пл.}}} = AF, \tag{19'}$$

и уравнение (19′) принимает вид:

$$\frac{H}{H_{\text{пл.}}} = F\left(Re_{\text{г}},\ Re_{\text{ж}},\ We,\ \frac{\nu_{\text{г}}}{\nu_{\text{ж}}},\ \Gamma_1,\ \Gamma_2\right). \tag{20}$$

При изучении гидравлического сопротивления пены пенного аппарата определяющим является критерий Eu. В этом случае уравнение (19) примет вид:

$$Eu = F\left(Re_{\text{г}},\ Re_{\text{ж}},\ We_{\text{ж}}\ \frac{\nu_{\text{г}}}{\nu_{\text{ж}}},\ \frac{H_{\text{п}}}{H_{\text{пл.}}},\ \Gamma_1,\ \Gamma_2\right),$$

где $Re_{\text{г}} = \frac{\omega \cdot D}{\nu_{\text{г}}}$ и $Re_{\text{ж}} = \frac{L \cdot D}{\nu_{\text{ж}}}$ — критерий Рейнольдса; $We = \frac{\sigma}{\gamma \cdot d_0^2}$ — критерий Вебера, $\frac{\nu_{\text{г}}}{\nu_{\text{ж}}}$ — симплекс вязкости, $\Gamma_1 = \frac{m}{d_0}$ — симплекс геометрического подобия, $\Gamma_2 = \frac{S_1}{S_2}$ — симплекс геометрического подобия, L — интенсивность подачи раствора $м^3/м^2$ час, D — диаметр аппарата, равен 1,13 *м*.

Полученные критериальные уравнения можно преобразовать, вводя некоторые критерии в коэффициент пропорциональности и представив зависимость между определяемым и определяющим критерием в виде степенной функции:

$$\frac{H}{H_{\text{пл.}}} = A\,[Re_{\text{г}}^{n} \cdot Re_{\text{ж}}^{m} \cdot We^{k} \cdot \Gamma_1^{a} \cdot \Gamma_2^{b} \cdot \Gamma_3^{c}], \tag{22}$$

$$\frac{\Delta p}{\rho_{\text{г}} \cdot \omega^2} = A_1 \left[Re_{\text{г}}^{n_1} \cdot Re_{\text{ж}}^{m_1} \cdot We^{k_1} \cdot \left(\frac{H}{H_{\text{пл.}}}\right)^{g} \Gamma_1^{a_1} \cdot \Gamma_2^{b_1} \cdot \Gamma_3^{c_1} \right], \tag{23}$$

Полученные критериальные уравнения гидродинамики и гидравлического сопротивления двухфазного слоя позволяют рассчитать процессы пенообразования в двухфазных газожидкостных системах.

Ереванский научно-исследовательский институт химии

Поступило 18 II 1967

ՆԱՏՐԻՈՒՄԻ ՄԵՏԱՍԻԼԻԿԱՏԻ ԼՈՒԾՈՒՅԹԻ ԿԱՐԲՈՆԻԶԱՑԻԱՆ ՓՐՓՐՄԱՆ ԱՊԱՐԱՏՈՒՄ

ՆՄԱՆՈՒԹՅԱՆ ՀԻԴՐՈԴԻՆԱՄԻԿԱԿԱՆ ՊԱՅՄԱՆՆԵՐԸ ՈՒՂՂԱՀՈՍ ՓՐՓՐՄԱՆ ԱՊԱՐԱՏՈՒՄ

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

Ամփոփում

Ուսումնասիրության համար ելանյութ է հանդիսացել 9 մոլեկուլ ջուր պարունակող նատրիումի մետասիլիկատը ($Na_2SiO_3 \cdot 9H_2O$), *որը կթողարկվի ՀՍՍՀ Հրազդանի Լեռնաքիմիական կոմբինատում թեժասարի նեֆելինային սիենիտների մշակման պրոցեսում՝ Մ. Գ. Մանվելյանի մեթոդով։*

Նատրիումի մետասիլիկատի լուծույթի կարբոնիզացիայի համար մշակվել է ուղղահոս փրփրման ապարատ, որը հնարավորություն է տալիս գազի արագությունը փոփոխել մեծ միջակայքում և ապահովել ապարատի բարձր արտադրողականությունը։ Գազի և հեղուկի փոխազդեցության հիդրոդինամիկական օրինաչափությունները կախված են շատ գործոններից՝ գազի արագությունից, հեղուկի հոսքի ինտենսիվությունից, հեղուկի և գազի ֆիզիկական պարամետրերից, երկֆազ շերտի բնույթից։

Փրփուրի առաջացման պրոցեսի հիդրոդինամիկան կախված է նաև ապարատի երկրաչափական պարամետրերից։

Հիդրոդինամիկական պայմանների ազդեցությունը պրոցեսի վրա արտահայտվում է հետևյալ վեկտորային հավասարումով՝

$$\frac{\partial \omega}{\partial \tau} + (\omega\,\mathrm{grad})\,\omega + \nu \nabla^2 \omega + \frac{1}{3}\,\nu\,\mathrm{grad} \cdot \mathrm{div} \cdot \omega - \frac{1}{\rho} \cdot g \cdot \mathrm{grad}\, p - g\text{։}$$

Այս հիմնական հավասարումից դուրս են բերվել գազի և հեղուկի սիստեմի հիդրոդինամիկայի և հիդրավլիկական դիմադրության չափանիշային հավասարումներ (22,23) ուղղահոս փրփրման ապարատի համար։

ЛИТЕРАТУРА

1. *М. Е. Позин, И. П. Мухленов, Е. С. Тумаркина, Э. Я. Тарат*, Пенный способ обработки газов и жидкостей, Госхимиздат, Ленинград, 1955 г.; *М. Е. Позин, И. П. Мухленов, Э. Я. Тарат*; Пенные газоочистители—теплообменники и абсорберы, Госхимиздат, Ленинград, 1959 г.
2. *В. Г. Левич*, Физико-химическая гидродинамика, Физматиздат, Москва, 1959 г.; *А. Г. Касаткин*, Основные процессы и аппараты химической технологии, Госхимиздат, Москва, 1960 г.
3. *Л. С. Эйгенсон*, Моделирование, „Советская наука", Москва, 1952 г.
4. *И. П. Мухленов*, Докторская диссертация, 1964 г.; *Э. Я. Тарат*, Докторская диссертация, Ленинград, 1964 г.
5. *М. В. Кирпичев*, Теория подобия, АН СССР, Москва, 1953 г.
6. *А. А. Гухман*, Введение в теорию подобия, „Высшая школа", Москва, 1963 г.