

ГИДРАВЛИКА

С. Н. ЕНГИБАРЯН, И. П. МУХЛЕНОВ, Э. Я. ТАРАТ

ВЛИЯНИЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ И ФИЗИЧЕСКИХ
СВОЙСТВ ЖИДКОСТИ НА СТРУКТУРНЫЕ ПАРАМЕТРЫ
ПЕННОГО СЛОЯ

Исследованию микроструктуры пенного слоя в режиме подвижной пены и динамики сосуществующих фаз в литературе не уделено должного внимания из-за отсутствия надежных методик, позволяющих установить внутреннюю структуру пенного слоя и его поведение. Это привело к тому, что различными методами определяли лишь общее газонаполнение и поверхность контакта фаз (ПКФ), причем последнюю — косвенными путями [1—4]. Между тем, исследования [5] показали наличие в пенном слое двух отличных друг от друга видов газонаполнений — ячейкового и агрегатного, и соответствующих им ПКФ. Показано также [6], что инерционные силы единицы массы жидкости описываются критерием гидродинамического состояния слоя структуры $E = \frac{|\overline{\Delta P}|}{\overline{\Delta P}}$ (где $\overline{\Delta P}$ —

среднее значение перепада давления пенного слоя; $|\overline{\Delta P}|$ — среднее абсолютное отклонение мгновенного значения перепада давления ΔP от $\overline{\Delta P}$) и частотой ω отклонения ΔP от $\overline{\Delta P}$. Последние являются характерными критериями динамики структуры пенного слоя.

Целью настоящей работы было изучение поведения среднего значения структурных (ячейкового $\overline{\varphi}_{\text{яч}}$ и агрегатного $\overline{\varphi}_{\text{агр}}$ газонаполнений и соответствующих им ПКФ — $A_{\text{яч}}$ и $A_{\text{агр}}$) и динамических параметров E , ω в плоской модели пенного аппарата в зависимости от гидродинамических факторов и физических свойств жидкости. Методика проведения экспериментов, обработка кадров кино- и фотосъемки и осциллограмм пульсации перепада давления приведены ранее [5].

Пенообразующую способность жидкости оценивали по значениям плотности пены ρ_n , определяемой с учетом неоднородности слоя по формуле:

$$\rho_n = \rho_* \frac{1 - \overline{\varphi}_{\text{общ}}}{1 - \overline{\varphi}_{\text{агр}}} = \rho_* \left(1 - \frac{\overline{\varphi}_{\text{яч}}}{1 - \overline{\varphi}_{\text{агр}}} \right). \quad (1)$$

Полученные по данной методике экспериментальные значения структурных и динамических параметров приведены в работе [6]. На

рис. 1 показана зависимость средних значений общего и ячейкового газонаполнения от скорости газа в полном сечении аппарата W_r при постоянной высоте порога h_n и плотности орошения жидкости L . При увеличении скорости газа $\bar{\varphi}_{\text{общ}}$ и $\bar{\varphi}_{\text{яч}}$ растут, причем рост $\bar{\varphi}_{\text{общ}}$ отмечен еще и в [7], а ячейковое газонаполнение $\bar{\varphi}_{\text{яч}}$ в данном диапазоне изменения W_r меняется незначительно. Можно полагать, что рост $\bar{\varphi}_{\text{общ}}$ происходит, в основном, за счет агрегатного газонаполнения $\bar{\varphi}_{\text{агр}}$. Увеличение $\bar{\varphi}_{\text{агр}}$ при повышении скорости газа связано с возрастанием доли сечения слоя, в котором проходит газ. Аналогичное поведение $\bar{\varphi}_{\text{общ}}$ и $\bar{\varphi}_{\text{яч}}$ наблюдается и при других величинах высоты порога. Следует отметить, что при увеличении W_r из-за некоторого роста $\bar{\varphi}_{\text{яч}}$ разность между плотностями агрегатов жидкости и газовой фазы несколько уменьшается, что благоприятно влияет на однородность пенного слоя.

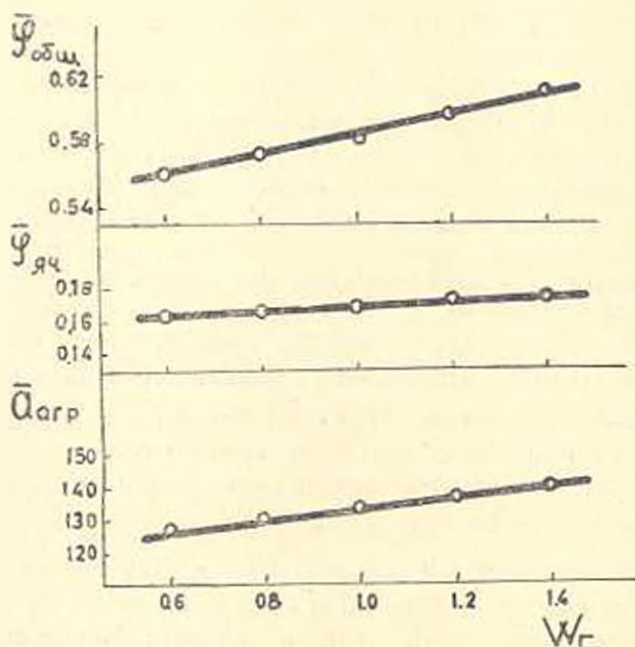


Рис. 1. Зависимость общего, ячейкового газонаполнения и удельной агрегатной поверхности контакта фаз (ПКФ) от скорости газа: $\bar{\varphi}_{\text{общ}}$ — общее и ячейковое газонаполнения (доли единицы); $\bar{A}_{\text{агр}}$ — удельная агрегатная ПКФ ($\text{м}^2/\text{м}^3$); W_r — скорость газа в полном сечении аппарата ($\text{м}/\text{сек}$). Система «смесь CO_2 (3% об.) с воздухом ~1,8 и раствор NaOH », высота порога $h_n = 1 \text{ м.м.}$, плотность орошения $L = 2,14 \text{ м}^3/\text{м}^2 \text{ час.}$

Небольшой рост $\bar{A}_{\text{агр}}$ при увеличении W_r (рис. 1) является следствием некоторого уменьшения размеров агрегатов жидкости и увеличения степени деформированности поверхности неоднородности.

Изменение критерия E и частоты пульсации перепада давления ω в зависимости от W_r для тех же условий приведено на рис. 2. Рост E свидетельствует о том, что увеличивающаяся кинетическая энергия газа, вследствие повышения W_r , помимо создания дополнительной доли ПКФ, расходуется также и на увеличение флуктуирующей кинетической энергии или среднего абсолютного значения инерционных сил единицы массы жидкости. Так как при этом ω уменьшается, то можно утверждать, что рост E при увеличении W_r происходит за счет увеличения амплитуды отклонения, т. е. масштаба (силы) возмущения. Несомненно, чем больше масштаб возмущения, тем больше количество жидкости, подвергнутое действию данного возмущения. Обработка кадров кино съемки и осциллограмм пульсации ΔP показывает, что возмущения большого масштаба расширяют спектр мгновенных значений структурных параметров и перепада давления.

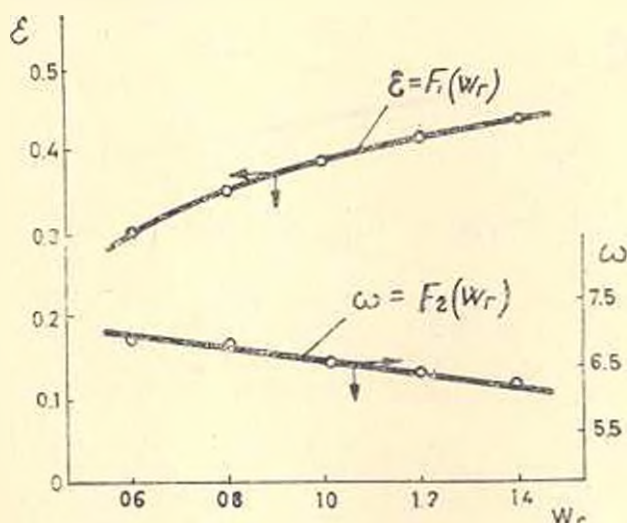


Рис. 2. Зависимость критерия гидродинамического состояния структуры слоя и частоты отклонения перепада давления от скорости газа: E — критерий гидродинамического состояния структуры слоя (доли единицы); ω — частота отклонения мгновенного значения перепада давления от среднего (сек^{-1}). (Смесь аналогична рис. 1).

Из рис. 3 видно, что увеличение запаса жидкости на решетке h_0 при постоянных W_r , L и прочих равных условиях сопровождается уменьшением величины структурных параметров $\bar{\varepsilon}_{\text{общ}}$, $\bar{\varepsilon}_{\text{пл}}$, $\bar{A}_{\text{агр}}$, что является следствием роста локальной неоднородности слоя. Уменьшение $\bar{\varepsilon}_{\text{пл}}$ приводит к увеличению плотности пены, что способствует росту локальной неоднородности слоя. Последнее приводит к увеличению среднего размера агрегатов жидкости, и это вызывает уменьшение $\bar{A}_{\text{агр}}$. Прямым следствием роста локальной неоднородности слоя при увеличении h_0 яв-

ляется уменьшение E и ω (рис. 4). Понижение E приводит к уменьшению скорости флуктуации агрегатной ПКФ.

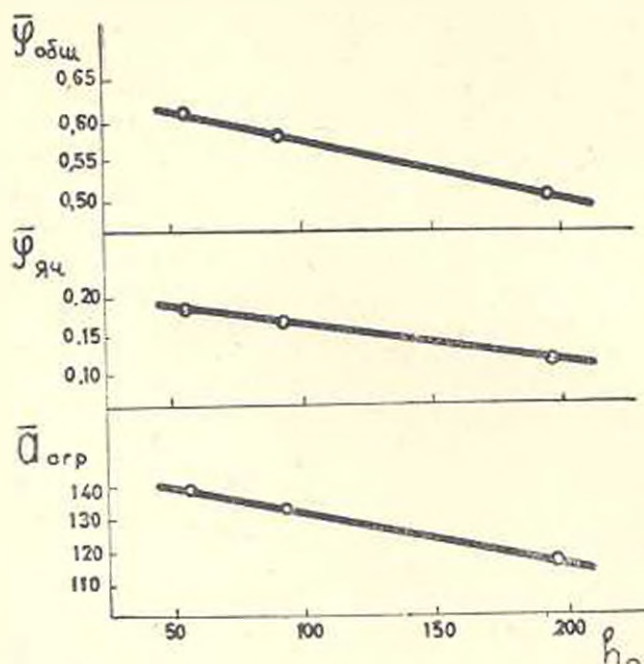


Рис. 3. Зависимость общего, ячейкового газожидкостного и удельной агрегатной ПКФ от высоты исходного слоя жидкости на решетке h_0 , мм. Система: смесь CO_2 (3% об.) с воздухом ~ 1.8 и раствор $NaOH$. $W_r = 1.0$ м/сек, $L = 2.14$ м³/м² час.

Графики на рис. 5 показывают, что при постоянной W_r , h_0 и прочих разных условиях рост плотности орошения L почти не сказывается на средних значениях структурных параметров $\bar{\varphi}_{общ}$, $\bar{\varphi}_{яч}$, $\bar{a}_{агр}$. Причиной этого является небольшое изменение запаса жидкости на решетке при увеличении L в исследованных пределах, которое практически не сказывается на величине средних значений структурных и динамических параметров [6] структуры слоя. Этим еще раз подтверждается установленное в литературе мнение о том, что в большинстве случаев влияние L на структурные параметры, а также на величины, характеризующие интенсивность процессов переноса в газовой фазе, сказывается через изменение запаса жидкости на решетке.

Таким образом, гидродинамические факторы влияют как на средние значения структурных параметров, так и на скорости их флуктуации.

Влияние физических параметров жидкой фазы — плотности ρ , вязкости μ и поверхностного натяжения σ на поведение структурных и динамических параметров газо-жидкостной системы исследовали на разных жидкостях [6] при постоянных гидродинамических условиях ($W_r = \text{const}$, $h_0 = \text{const}$) и периодической подаче жидкости.

При изменении одного из физических параметров жидкой фазы путем составления водных растворов разной концентрации, одновременно менялись и другие параметры, поэтому графо-аналитический анализ экспериментальных данных невозможен. В связи с этим проведена многомерная корреляция. В расчетные зависимости в виде степенной связи введены также гидродинамические факторы W_r , h_0 , так как они через массопередачу в некоторой степени влияют на физические параметры. Из полученного экспериментального материала обобщено пока поведение параметров $\bar{\varphi}_{\text{общ}}$ и $\bar{A}_{\text{гр}}$. Значения $\bar{\varphi}_{\text{общ}}$, E и ω приведены в таблице [6].

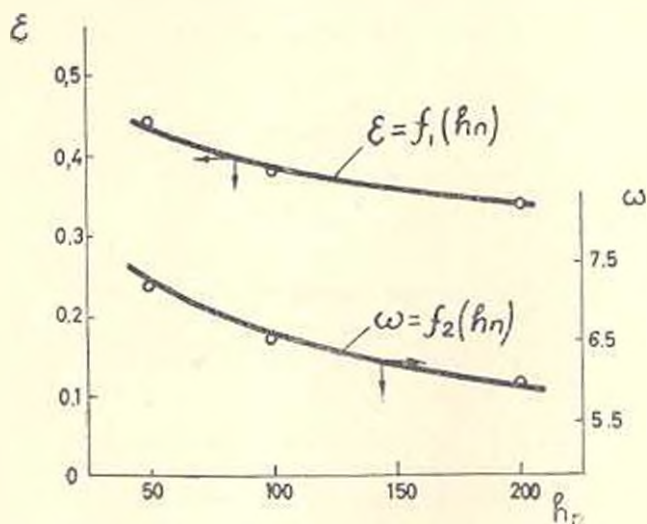


Рис. 1. Зависимость критерия гидродинамического состояния структуры слоя E и частоты отклонения перепада давления ω от высоты порога h_0 , мм. Система «смесь CO_2 (3% об.) с воздухом $\sim 1,8$ и раствор NaOH , $W_r = 1,0$ м/сек, $L = 2,14$ м³ м² час.

Обработка экспериментальных данных проведена на ЭВМ «Минск-22» по стандартной программе, что привело к следующим уравнениям:

$$\bar{A}_{\text{гр}} = 72,8 \cdot W_r^{0,28} \cdot h_0^{-0,014} \cdot p_*^{-0,06} \cdot \sigma^{0,07} \cdot \gamma_*^{-0,27}, \quad (2)$$

Общий коэффициент множественной регрессии для данного уравнения $R = 0,862$. Максимальное относительное отклонение экспериментальных значений $\bar{A}_{\text{гр}}$ от рассчитанных по уравнению (2) — $\pm 10,9\%$.

Для $\bar{\varphi}_{\text{общ}}$ получено:

$$\bar{\varphi}_{\text{общ}} = 3,63 \cdot W_r^{0,08} \cdot h_0^{-0,014} \cdot p_*^{0,01} \cdot \sigma^{-0,24} \cdot \gamma_*^{-0,14}, \quad (3)$$

В этом случае $R = 0,87$. Максимальное относительное отклонение экспериментальных значений $\bar{\varphi}_{\text{общ}}$ от рассчитанных по уравнению (3) составляет $\pm 18,1\%$.

Значения парных коэффициентов корреляции (r_{w, h_0} , $r_{w, a_{\text{гр}}}$, $r_{h_0, a_{\text{гр}}}$, $r_{w, \bar{\varphi}_{\text{общ}}}$...), коэффициентов множественной регрессии в стандартизованном масштабе ($b_{w, \bar{\varphi}_{\text{общ}}}$, $b_{h_0, \bar{\varphi}_{\text{общ}}}$...) и частных коэффициентов корреляции ($\psi_{a_{\text{гр}}, \bar{\varphi}_{\text{общ}} \cdot h_0, w}$, $\psi_{w, \bar{\varphi}_{\text{общ}} \cdot h_0, a_{\text{гр}}}$...) для переменных уравнений (2) и (3) приведены в [6].

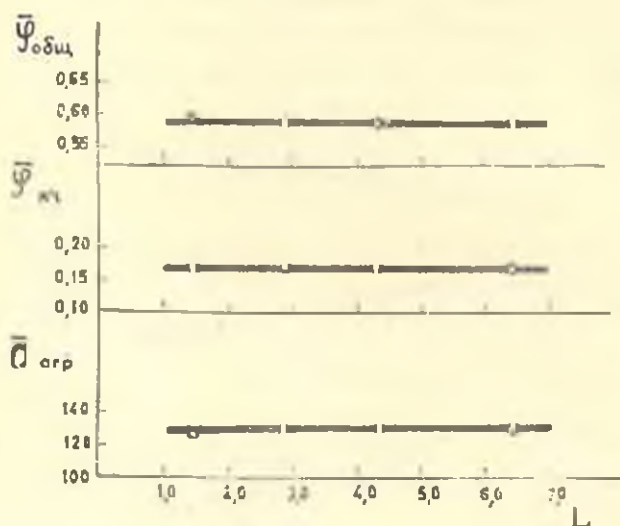


Рис. 5. Зависимость общего, ячейкового заполнения и удельной агрегатной ПКФ от плотности орошения L , $\text{м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{час}$. Система «смесь CO_2 (30% об.) с воздухом ~1,8 и раствор NaOH $W_1 = 1,0 \text{ м.сек.}$, $h_{\text{п}} = 10 \text{ м.м.}$

Полученные уравнения регрессии (2) и (3) показывают, что все исследованные гидродинамические факторы и физические свойства жидкости влияют на средние значения структурных параметров. Они влияют [6] также на $\bar{\varphi}_{\text{яч}}$, $\bar{A}_{\text{гр}}$ и динамические характеристики структуры слоя — E и ω .

Из-за наличия заметной силы связи между аргументами w , h_0 , $a_{\text{гр}}$ о чем свидетельствуют парные коэффициенты корреляции между ними [6], анализ истинной силы влияния аргументов на функцию необходимо вести по коэффициентам множественной регрессии в стандартизованном масштабе и частным коэффициентам корреляции. Они показывают, что рост w и h_0 сопровождается уменьшением $\bar{A}_{\text{гр}}$, что является следствием роста локальной неоднородности слоя. Об этом свидетельствует аналогичное поведение $\bar{\varphi}_{\text{общ}}$ ($\psi_{a_{\text{гр}}, \bar{\varphi}_{\text{общ}} \cdot w, h_0}$, $\psi_{w, \bar{\varphi}_{\text{общ}} \cdot h_0, a_{\text{гр}}}$) и изменения E , ω [6]. Частные коэффициенты корреляции $\psi_{a_{\text{гр}}, \bar{\varphi}_{\text{общ}} \cdot w, h_0}$, $\psi_{w, \bar{\varphi}_{\text{общ}} \cdot h_0, a_{\text{гр}}}$ показывают небольшой рост $\bar{A}_{\text{гр}}$ и заметное уменьшение $\bar{\varphi}_{\text{общ}}$ при увеличении $a_{\text{гр}}$. Несмотря на небольшой

рост $\bar{A}_{agr}$ на основании более сильной отрицательной корреляции между τ и $\bar{\epsilon}_{обш}$ можно утверждать, что увеличение τ , как и в случаях влияния μ и σ , сопровождается ростом локальной неоднородности слоя. К такому же выводу приводит и некоторое возрастание E . Небольшой рост $\bar{A}_{agr}$ при увеличении σ обусловлен тем, что силы поверхностного натяжения жидкости влияют не только на пенообразование и средний размер ячеек, но и на степень деформированности поверхности неоднородности. При этом возможно также некоторое изменение среднего размера самих агрегатов.

Уравнения множественной регрессии (2) и (3) справедливы в следующих пределах изменения независимых переменных: $W_r = 0,6 - 1,4$ м/сек; $h_0 = 0,054 - 0,203$ м; $p_s = 981 - 1500$ кг/м³; $\mu = 0,00103 - 0,03646$ н·сек/м²; $\tau = 0,0259 - 0,1132$ н/м. При этом $\bar{A}_{agr}$ и $\bar{\epsilon}_{обш}$ изменялись в следующих пределах: $\bar{A}_{agr} = 112,0 - 144,3$ м²/м³, $\bar{\epsilon}_{обш} = 0,496 - 0,785$.

На основании высоких значений R уравнений (2) и (3) можно сказать, что выбранные гидродинамические факторы и физические свойства жидкости являются наиболее существенными, определяющими неоднородность слоя и ее поведение на ситчатой решетке пенного аппарата.

Гидродинамические факторы и физические свойства жидкости влияют как на средние значения структурных параметров (в частности, агрегатной ПКФ), так и на скорости их флуктуации. Поскольку последняя характеризует меру турбулентного обмена между фазами [6] через единицу ПКФ, то изменение объемных коэффициентов массопередачи происходит за счет изменения истинного коэффициента массопередачи, отнесенного к единице ПКФ, и удельной объемной ПКФ.

Полученные в плоской модели количественные закономерности для параметров структуры пенного слоя из-за отсутствия необходимых исследований не следует непосредственно переносить в объемные аппараты. Представления о качестве структуры пенного слоя можно перенести на трехмерные взвешенные слои, о чем свидетельствуют наблюдения структуры пенного слоя и его поведение в объемных моделях.

АрмИОНХ

Поступило 9.VI.1977

Ս. Ն. ԽԵՐԻԱՐՅԱՆ, Ի. Պ. ՄՈՒՆԻԱՆՈՎ, Է. ՏԱՄ. ՏՈՐՈՍ

ՀԻԴՐՈԴԻՆԱՄԻԱԿԱՆ ԳՈՐԾՈՆՆԵՐԻ ԵՎ ՀԵՂՈՒԿԻ ՖԻԶԻԿԱԿԱՆ
ՀԱՏԿՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ԱԶԳԵՑՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ՓՐՓՐԱՇԵՐՏԻ
ԿԱՌՈՒՅՎԱԾՔԱՆՈՒՆ ԳԱՐԱՄԵՏՐԵՐԻ ՎԵՐԱ

Ա Վ Փ Ր Ո Փ Ո Ւ Մ

Ցույց է տրված, որ հիդրոդինամիկական գործոնները և հեղուկի ֆիզիկական հատկությունները ազդում են փրփրաշերտի կառուցվածքի ստառի-

կան և դիֆուզիան բնութագրող պարամետրերի վրա, այսինքն մասնա-փոխանակության ծախսային դորժակցի թե մեկ և թե մյուս բաղադրիչ մասերի վրա:

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Родионов А. И., Вуктер А. А. Исследование химическим методом поверхности контакта фаз. I, II. «Изв. ВУЗ-ов. Химия и химическая технология», № 6, 1966, с. 970—974, № 1, 1967, с. 102—106.
2. Pasluk-Bronikowska W., Chem. Engng. Sci., 24, № 7, 1969, с. 1139—1147.
3. Родионов А. И., Ульянов Б. А. Определение поверхности контакта фаз на барботажных тарелках методом деполяризации света. Тр. МХТИ, вып. 56, 1967, с. 95—99.
4. Calderbank P. H., Rennie J., Trans. Instn. Chem. Engng., 40, № 1, 3, 1962.
5. Енгибарян С. Н., Тарат Э. Я., Мухленов Н. П. и др. Исследование структуры и поверхности контакта фаз в дисперсных системах г-ж и г-ж-т «Журнал прикладной химии», т. 45, № 5, 1970, с. 1178—1185.
6. Енгибарян С. Н. Кандидатская диссертация, ЛТИ им. Лексотепа, М., 1971.
7. Позин М. Е., Мухленов Н. П., Тумаркина Е. С., Тарат Э. Я. Пениный способ обработки газов и жидкостей. Госхимиздат, Л., 1955.