

УДК 621.22

Гидродинамика газожидкостных потоков в кожухотрубных струйно-инжекционных аппаратах (КСИА)

I. Гидродинамика КСИА без рециркуляционных фаз

А. В. СИВЕНКОВ, Т. Я. ЛЕБЕДЕВА, А. Г. НОВОСЕЛОВ

Санкт-Петербургский государственный университет
низкотемпературных и пищевых технологий

Sorption apparatuses for different food production processes use, for example, an injection principle of formation of gas-liquid mixture, realized in shell-and-tube jet-injection apparatuses (KSIA). The hydrodynamic calculations of KSIA are presented, as a result of which the equation for the determination of geometrical parameters of KSIA without recirculation of phases, providing sustained and efficient operation, was derived.

Сорбционные процессы в двухфазных (газ – жидкость) и трехфазных (газ – жидкость – твердая фаза) средах имеют практическое применение во многих отраслях промышленности. Например, в пивобезалкогольной и винодельческой отраслях промышленности от процессов брожения, сатурации, десорбции и дезодорации зависит качество пива, газированных напитков, изготовленных на основе воды, фруктовых соков, а также органолептические показатели шампанского и других шипучих алкогольных напитков.

В дрожжевой промышленности аэробное культивирование микроорганизмов (биосорбционный процесс) определяет объем производства и его рентабельность.

Огромное значение сорбционные (хемосорбционные) процессы имеют в химической, нефтехимической, химико-фармацевтической отраслях. Особая роль отводится применению сорбционных процессов в технологиях аэробной очистки сточных вод.

Для сорбционных процессов в промышленности разработано большое число аппаратов различных конструкций [1 – 5], каждый из которых имеет определенные преимущества и недостатки. Выбор оптимальной конструкции сорбционного аппарата определяется свойствами продукта и экономической эффективностью проведения процесса в данной конструкции аппарата.

В настоящее время для образования газожидкостной смеси используется способность свободной струи жидкости увлекать (инжектировать) окружающий ее газ в рабочий объем жидкости [5]. В этом случае струя выполняет роль сразу трех устройств, которые в боль-

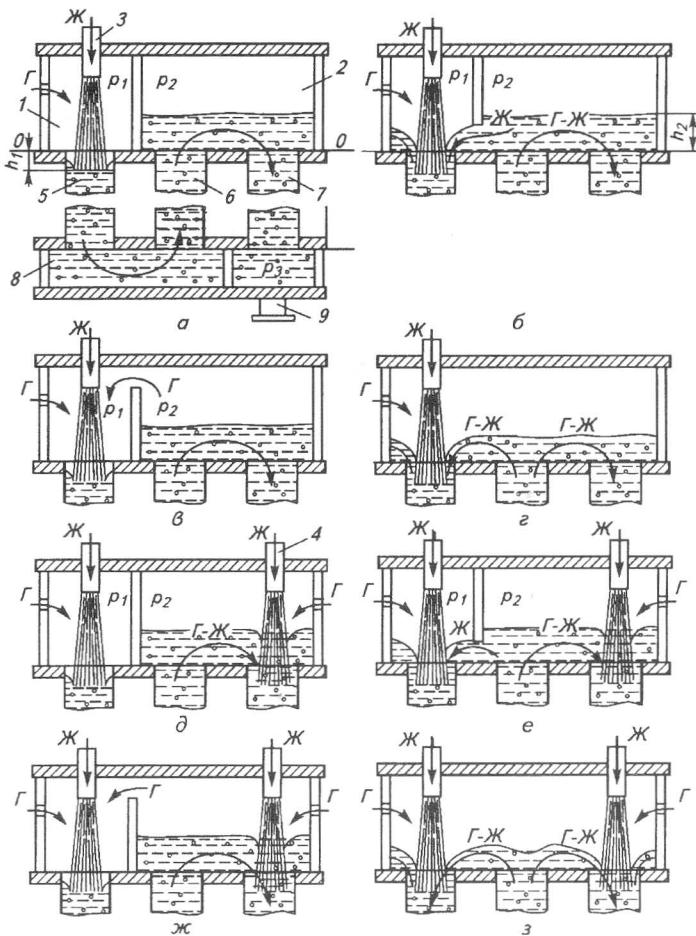


Рис. 1. Варианты организации потоков фаз в КСИА:
Г – газ; Ж – жидкость;

- 1 – камера 1; 2 – камера 2; 3 – основное сопло;
- 4 – дополнительное сопло; 5 – опускная труба;
- 6 – подъемная труба; 7 – сливная труба;
- 8 – переливная камера; 9 – сливной патрубок

шинстве конструкций сорбционных аппаратов выполняются раздельно: нагнетателя газа, диспергатора и мешалки. Этот принцип образования газожидкостной смеси в рабочем объеме аппарата с успехом был реализован в конструкциях кожухотрубного струйно-инжекционного аппарата (КСИА), представленного на рис. 1.

В данной работе мы рассмотрим гидродинамику в КСИА без рециркуляции фаз, т.е. работу аппарата в проточном режиме (рис. 1,*a*). В этом случае поступающие в опускную трубу 5 газ и жидкость с соответствующими массовыми расходами G_r и G_0 проходят подъемную 6 и сливную 7 трубы и определяют производительность КСИА по газовой и жидкостной фазам на входе их в аппарат. Если газ не растворяется в жидкости, то будет наблюдаться равенство объемных расходов фаз на входе в аппарат и выходе из него при стационарных режимах его работы, т.е. в любом сечении труб будет соблюдаться условие

$$Q_r + Q_0 = Q_{cm} = \text{const},$$

где Q_r и Q_0 – объемные расходы газа и жидкости.

Особенность гидродинамических расчетов КСИА заключается в том, что при движении газожидкостной смеси от входа ее в опускную трубу через подъемную и к выходу из сливной наблюдается последовательный переход напорного движения (в опускной трубе) к безнапорному (в камере 2) и вновь к напорному (в сливной трубе). Более того, в верхней камере 2 происходит частичная сепарация газовой фазы из газожидкостного потока и накопление ее в верхней части камеры, что приводит к повышению в ней давления газа p_2 , которое, в свою очередь, определяет силу напорного потока в сливной трубе и уровень заполнения газожидкостной смесью камеры 2.

Другой гидродинамической особенностью КСИА является вход свободной струи жидкости в опускную трубу (рис. 2,*a*), существенно отличающийся от входа жид-

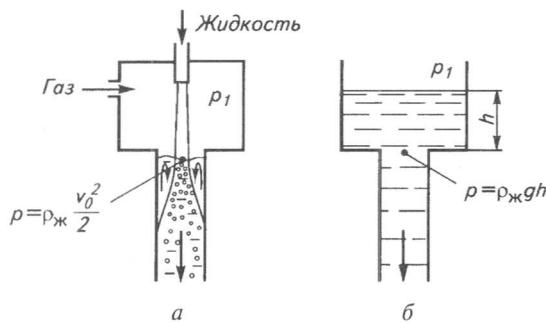


Рис. 2. Условия входа жидкости в вертикальную трубу:
а – напорное движение, создаваемое свободной струей;
б – напорное движение из резервуара

кости при напорном движении, рассматриваемом в классической гидравлике (рис. 2,*b*) однофазных потоков.

В нашем случае при входе свободной струи в газожидкостную смесь, заполняющую опускную трубу, лишь часть поперечного сечения этой трубы находится под действием давления струи, а часть – испытывает воздействие газовой фазы, находящейся в камере 1, т.е. в сечении, соответствующем точке входа струи в жидкость, наблюдается существенный градиент единичных давлений.

И в том, и в другом случае величина гидравлического сопротивления в опускной трубе (ниже верхнего среза) будет в определенной мере влиять на уровень свободной поверхности жидкости в камере 1. Очевидно, что чем больше это сопротивление, тем выше уровень жидкости над верхним срезом опускной трубы.

В случае струйного ввода жидкости в опускную трубу этот факт становится значимым, так как от уровня заполнения верхней камеры 1 зависит длина свободной струи, инжектирующей окружающий ее газ, и при достижении уровнем жидкости среза сопла (длина струи $L_0 = 0$) унос газа прекратится, что приведет к нарушению работы аппарата.

В этой связи и возникает необходимость разработки методики гидродинамических расчетов КСИА без рециркуляции фаз с последующей экспериментальной ее проверкой. С этой целью рассмотрим следующую расчетную схему, представленную на рис. 3.

Пусть диаметры и высоты всех труб будут одинаковыми и соответственно равны d_{tp} и H_{tp} .

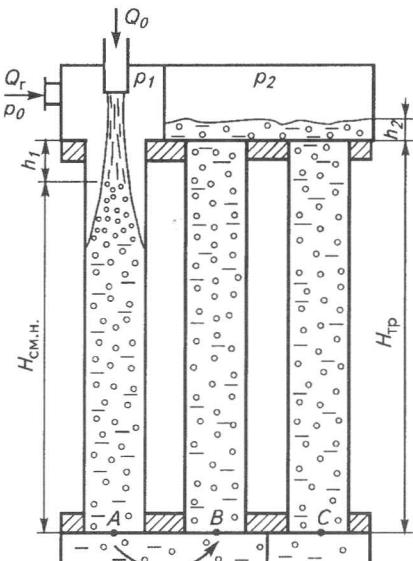


Рис. 3. Схема КСИА с перегородкой в верхней камере (аппарат проточного типа)

Воспользуемся методикой, которая была применена в работе [4] для анализа распределения давлений в двухтрубном газлифтном реакторе.

Давление в точке A под опускной трубой будет

$$p_A = p_1 + \rho_{cm} g H_{cm.h} - \Delta p_h + \frac{\rho_* v_0^2}{2}, \quad (1)$$

где p_1 – давление газовой фазы в верхней камере 1, Па;

ρ_{cm} – плотность газожидкостной смеси в опускной трубе, кг/м³;

g – ускорение свободного падения, м/с²;

$H_{cm.h}$ – высота столба смеси в опускной трубе, м;

Δp_h – потери давления в опускной трубе, Па;

ρ_* – плотность жидкостной струи, кг/м³;

v_0 – начальная скорость струи жидкости, м/с.

Давление в точке B на входе газожидкостной смеси в подъемную трубу

$$p_B = p_2 + \rho_{cm.B} g H_{cm.B} - \Delta p_B, \quad (2)$$

где Δp_B – потери давления в подъемной трубе, Па;

p_2 – давление газовой фазы в верхней камере 2, Па;

$H_{cm.B}$ – высота столба смеси над точкой B , м;

$\rho_{cm.B}$ – плотность в точке B .

Учитывая, что давление p_A будет больше давления

p_B на величину $\Delta p_{AB} = \xi_{AB} \frac{\rho_{cm} w_{cm}^2}{2}$, можно записать

$$p_A - \Delta p_{AB} = p_B, \quad (3)$$

где w_{cm} – приведенная скорость газожидкостной смеси, м/с; $w_{cm} = (Q_0 + Q_r)/S_{tp}$,

где S_{tp} – площадь трубы, м²;

ξ_{AB} – коэффициент местных сопротивлений при переходе газожидкостного потока от точки A к точке B .

Принимая во внимание, что

$$\rho_{cm} = \rho_r \Phi_r + \rho_* (1 - \Phi_r), \quad (4)$$

где ρ_r – плотность газа;

Φ_r – доля газа в смеси,

и учитывая, что $\rho_* \gg \rho_r$, можно записать

$$\rho_{cm} = \rho_* (1 - \Phi_r), \quad (5)$$

и тогда уравнение (1) примет следующий вид:

$$p_A = p_1 + \frac{\rho_0 v_0^2}{2} + \rho_* g H_{cm.h} (1 - \Phi_r) - \Delta p_h. \quad (6)$$

Второе слагаемое в правой части уравнения (6) есть кинетическая энергия струи, которая при входе струи в опускную трубу частично переходит в потенциальную энергию давления, которая расходуется на повышение уровня жидкости в опускной трубе и на преодоление нежелезащих гидравлических сопротивлений. Параметр ρ_0 – плотность газожидкостной струи, которую можно представить по аналогии с уравнениями (4) и (5) как

$$\rho_0 = \rho_* (1 - \beta_r), \quad (7)$$

где β_r – расходное газосодержание, $\beta_r = Q_r / (Q_r + Q_0)$.

С учетом уравнения (7) зависимость (6) может быть представлена в виде

$$p_A = p_1 + \frac{\rho_* v_0^2}{2} (1 - \beta_r) + \rho_* g H_{cm.h} (1 - \Phi_r) - \Delta p_h. \quad (8)$$

По аналогии уравнение (2) преобразуется к следующему виду:

$$p_B = p_2 + \rho_* g H_{cm.B} (1 - \Phi_{r.B}) - \Delta p_B, \quad (9)$$

где $\Phi_{r.B}$ – доля газа в смеси в подъемной трубе.

Потери давления в опускной трубе (нисходящий поток) и в подъемной (восходящий поток) запишем в следующем виде:

$$\Delta p_h = \Delta p_{dl.h} + \Delta p_{m.h}$$

и

$$\Delta p_B = \Delta p_{dl.B} + \Delta p_{m.B},$$

где $\Delta p_{dl.h}$ и $\Delta p_{dl.B}$ – потери давления, связанные с преодолением гидравлических сопротивлений по длине в опускной и подъемной трубах соответственно; $\Delta p_{m.h}$ и $\Delta p_{m.B}$ – потери давления, связанные с преодолением местных гидравлических сопротивлений в опускной и подъемной трубах соответственно.

Потери по длине рассчитываются согласно работе [4] по уравнениям (10) и (11):

$$\Delta p_{dl.h} = \lambda_h \frac{H_{cm.h}}{d_{tp}} \frac{\rho_* w_{*h}^2}{2(1 - \Phi_r)^{1.75}}; \quad (10)$$

$$\Delta p_{dl.B} = \lambda_B \frac{H_{tp}}{d_{tp}} \frac{\rho_* w_{*B}^2}{2(1 - \Phi_{r.B})^{1.75}}. \quad (11)$$

Входящие в уравнения (10) и (11) коэффициенты трения по длине λ_h и λ_B определяются по общепринятым уравнениям классической гидравлики в зависимости от режима движения и шероховатости стенок трубопровода. В частности, в работе [4] рекомендуется уравнение, принятое для гидравлически гладких труб,

$$\lambda = 0.316/Re^{0.25}, \quad (12)$$

где Re – критерий Рейнольдса,

$$Re = w_* d_{tp} / \nu_*; \quad (13)$$

ν_* – кинетическая вязкость жидкости.

Более сложную задачу представляет собой оценка местных сопротивлений при движении двухфазных потоков в вертикальных трубах.

Потери потенциальной энергии на преодоления местных сопротивлений в опускной трубе $\Delta p_{m.h}$ будут определяться только местным сопротивлением на расширение свободной гидравлической струи сечением S_c до живого сечения гидравлического потока, размер которого определен площадью поперечного сечения трубы S_{tp} .

Оценка параметра $\Delta p_{\text{м.н}}$ представляет собой сложную теоретическую и экспериментальную задачу и является предметом будущих исследований. На данном этапе мы вынуждены ограничиться констатацией наличия этого явления в опускной трубе и ввести его в конечное расчетное уравнение.

Потери на преодоление местных сопротивлений в подъемной трубе будут определяться местным сопротивлением на выходе газожидкостного потока из нее [4], т.е.

$$\Delta p_{\text{м.в}} = \Delta p_{\text{вых}} = \xi_{\text{вых}} \frac{\rho_* w_{\text{ж.в}}^2}{2(1-\varphi_{\text{г.в}})^2}. \quad (14)$$

Потери давления Δp_{AB} будут определяться величиной местных сопротивлений при выходе газожидкостного потока из опускной трубы в нижнюю камеру, повороте газожидкостного потока на 180° и входе его в подъемную трубу из нижней камеры, т.е.

$$\Delta p_{\text{AB}} = \Delta p_{\text{вых}} + \Delta p_{180^\circ} + \Delta p_{\text{вх}}. \quad (15)$$

Оценка каждого сопротивления, входящего в уравнение (15), отдельно не представляется возможной, поэтому целесообразно определять значение Δp_{AB} экспериментально для каждой отдельно взятой конструкции КСИА по уравнению

$$\Delta p_{\text{AB}} = \xi_{\text{AB}} \frac{\rho_* w_{\text{ж.в}}^2}{2(1-\varphi_{\text{г.в}})^2}, \quad (16)$$

где ξ_{AB} – коэффициент местного сопротивления при переходе газожидкостного потока из опускной трубы в подъемную; $\varphi_{\text{г.в}}$ – среднее объемное газосодержание,

$$\varphi_{\text{г.в}} = (\varphi_{\text{г}} + \varphi_{\text{г.в}})/2.$$

С учетом приведенных выше уравнений зависимость (3) можно представить в следующем виде:

$$\begin{aligned} p_1 + \frac{\rho_* v_0^2}{2}(1-\beta_r) + \rho_* g H_{\text{см.н}}(1-\varphi_r) - \lambda_{\text{н}} \frac{H_{\text{см.н}}}{d_{\text{тр}}} \times \\ \times \frac{\rho_* w_{\text{ж.в}}^2}{2(1-\varphi_r)^{1.75}} - \xi_{\text{AB}} \frac{\rho_* w_{\text{ж.в}}^2}{(1-\varphi_{\text{г.в}})^2} = p_2 + \lambda_{\text{в}} \frac{H_{\text{см.в}}}{d_{\text{тр}}} \times \\ \times \frac{\rho_* w_{\text{ж.в}}^2}{2(1-\varphi_{\text{г.в}})^{1.75}} + \xi_{\text{вых}} \frac{\rho_* w_{\text{ж.в}}^2}{2(1-\varphi_{\text{г.в}})^2} + \rho_* g H_{\text{см.в}}(1-\varphi_{\text{г.в}}). \end{aligned} \quad (17)$$

Преобразуем выражение (17) следующим образом:

$$\begin{aligned} (p_1 - p_2) + \frac{\rho_* v_0^2}{2}(1-\beta_r) + \rho_* g H_{\text{см.н}}(1-\varphi_r) - \\ - \rho_* g H_{\text{см.в}}(1-\varphi_{\text{г.в}}) = \lambda_{\text{в}} \frac{H_{\text{см.в}}}{d_{\text{тр}}} \frac{\rho_* w_{\text{ж.в}}^2}{2(1-\varphi_{\text{г.в}})^{1.75}} + \\ + \xi_{\text{вых}} \frac{\rho_* w_{\text{ж.в}}^2}{2(1-\varphi_{\text{г.в}})^2} + \lambda_{\text{н}} \frac{H_{\text{см.н}}}{d_{\text{тр}}} \frac{\rho_* w_{\text{ж.в}}^2}{2(1-\varphi_r)^{1.75}} + \xi_{\text{AB}} \frac{w_{\text{ж.в}}^2}{(1-\varphi_{\text{г.в}})^2}, \end{aligned} \quad (18)$$

или

$$\begin{aligned} (p_1 - p_2) + \frac{\rho_* v_0^2}{2}(1-\beta_r) + \rho_* g H_{\text{см.н}}(1-\varphi_r) - \\ - \rho_* g H_{\text{см.в}}(1-\varphi_{\text{г.в}}) = \frac{\rho_* w_{\text{ж.в}}^2}{2} \left[\lambda_{\text{в}} \frac{H_{\text{см.в}}}{d_{\text{тр}}} \frac{1}{(1-\varphi_{\text{г.в}})^{1.75}} + \right. \\ \left. + \lambda_{\text{н}} \frac{H_{\text{см.н}}}{d_{\text{тр}}} \frac{1}{(1-\varphi_r)^{1.75}} + \frac{\xi_{\text{вых}}}{(1-\varphi_{\text{г.в}})^2} + \frac{\xi_{\text{AB}}}{(1-\varphi_{\text{г.в}})^2} \right]. \end{aligned} \quad (19)$$

В уравнении (19) выражение в квадратных скобках представляет собой коэффициент сопротивления сети ξ_S , состоящей из опускной и подъемной труб, который может быть определен экспериментально, если известны все параметры левой части этого уравнения.

Тогда окончательно имеем

$$\begin{aligned} (p_1 - p_2) + \frac{\rho_* v_0^2}{2}(1-\beta_r) + \rho_* g H_{\text{см.н}}(1-\varphi_r) - \\ - \rho_* g H_{\text{см.в}}(1-\varphi_{\text{г.в}}) = \xi_S \frac{\rho_* w_{\text{ж.в}}^2}{2}. \end{aligned} \quad (20)$$

Полученное уравнение позволяет выполнить гидродинамические и конструкционные расчеты КСИА без рециркуляции фаз и, в частности, определять требуемую высоту труб КСИА, которая обеспечивает устойчивую и эффективную его работу в заданном режиме. Возможно и решение обратной задачи. При известных значениях $H_{\text{см}}$ в трубах появляется возможность оценки гидравлических сопротивлений циркуляционного контура, что крайне необходимо для составления методики расчета КСИА с рециркуляцией фаз в трубах (см. рис. 1, 2, 3).

Список литературы

1. Виестур У.Э., Кузнецов А.М., Савенков В.В. Системы ферментации. – Рига: Зинатне, 1986.
2. Кретов И.Т., Антипов С.Т. Технологическое оборудование предприятий бродильной промышленности: Учебник. – Воронеж: Издательство государственного университета, 1997.
3. Смирнов Н.Н., Плесовских В.А. Биохимические реакторы: – СПб: Химиздат, 1998.
4. Соколов В.Н., Доманский И.В. Газожидкостные реакторы. – Л.: Машиностроение, 1976.
5. Тишин В.Б., Новоселов А.Г., Лебедева Т.Я., Дужий А.Б. Проблемы уноса газа свободными турбулентными жидкостными струями. Анализ экспериментальных и теоретических исследований. – СПб: Известия СПбГУНиПТ, 2002.