

ГИДРАВЛИКА

А. М. ГАСПАРЯН, Э. А. МЕЛИКЯН

О ПРОДОЛЬНОМ СМЕЩЕНИИ ЖИДКОСТИ

Настоящее исследование касается влияния гидродинамической обстановки на интенсивность массообмена в двухфазном потоке, состоящем из жидкости и взвешенных частиц.

Известно, что для стационарного процесса массообмена

$$G = \alpha F \Delta x = \alpha W_k f \Delta x, \quad (1)$$

где G — вес вещества, перешедшего из одной фазы в другую за единицу времени; α — средний коэффициент массопередачи; $F = W_k f$ — поверхность контакта между фазами в аппарате, имеющем объем W_k ; f — среднее значение поверхности контакта в единице объема; $\Delta x = x_s - x$ — разность концентраций растворенного вещества (движущая сила).

Ранее было показано [1, 2], что путем изменения направления потока и формы аппарата можно в широких пределах изменить объемную концентрацию твердой фазы (φ), следовательно, и поверхность контакта (f) в аппарате. Известно, что

$$f = 6\varphi/\sigma, \quad (2)$$

где σ — диаметр сферических частиц. Также известно [3], что с ростом φ (или f) уменьшается скорость стесненного падения частиц, определяемая выражением

$$C = KC_0(1 - \varphi)^n, \quad (3)$$

и, следовательно, уменьшается скорость омывания (относительная скорость) частиц жидкостью:

$$C' = K'C_0(1 - \varphi)^{n-1}. \quad (4)$$

Для иллюстрации приведем следующее: в области ламинарного режима показатель степени n составляет 4.72. При значениях φ 0,05 и 0,50 скорость омывания C' соответственно будет $0,83KC_0$ и $0,076KC_0$. Иначе говоря, при увеличении φ (или f) в 10 раз, скорость омывания частиц жидкой фазой уменьшится в $0,83:0,076 = 11$ раз. На первый взгляд кажется, что уменьшение скорости C' должно отрицательно влиять на коэффициент массопередачи α , и, следовательно, увеличение φ при помощи соответствующих изменений гидроди-

важической обстановки должно иметь двойное влияние на процесс массообмена: ускоряющее (иследствии роста f) и замедляющее (по причине уменьшения C'). Отсюда возникает одна из задач наших исследований — определение влияния C' (или концентрации φ) на коэффициент α . Отметим, что влияние C' на α , как это показали наши теоретические и экспериментальные исследования, небольшое и во многих случаях им можно пренебречь.

На интенсивность процесса также влияет степень продольного смещения жидкой фазы; смещение, которое приводит к уменьшению движущей силы Δx . Нужно полагать, что концентрация φ является одним из важных факторов, влияющих на это. Выявление этой роли φ явилось второй задачей наших исследований.

Настоящая статья посвящена только определению коэффициента продольного смещения и его связи с движущей силой Δx .

Коэффициент продольного смещения. Еще в 1944 году А. Н. Плановский [1] (а позже А. Н. Плановский и Д. А. Гуревич [2]) подробно рассмотрели явление продольного смещения чистых жидкостей (в отсутствии извесей) и дал определения *аппарата идеального смещения* (АИС) и *аппарата идеального вытеснения* (АИВ). Здесь, в несколько ином изложении, соответствующем нашим целям, остановимся на этих определениях.

Пусть аппарат 1 (рис. 1), емкостью V , заполнен жидкостью „А“. По 2 начинается подача в аппарат жидкости „В“, во всех соотношениях растворимой и „А“. Она подается с постоянной объемной скоростью W . Пусть „В“, войдя в аппарат, мгновенно и равномерно распределяется по всему объему V , и выходящая через 3 жидкость имеет такой же состав, какой имеется в аппарате в данный момент.

Пусть в данное мгновение концентрация „В“ в аппарате равна x . Через промежуток времени dt она станет $(x + dx)$, а содержание „В“ в аппарате станет $V(x + dx)$. За время dt в аппарат поступило $W dt$ и ушло $W(x + dx)dt$ жидкости „В“. Поэтому

$$V(x + dx) = Vx + Wdt - W(x + dx)dt.$$

Отсюда

$$\frac{Wdt}{V} = -\ln(1 - x). \quad (5)$$

Здесь мы рассмотрели аппарат идеального смещения (АИС).

В аппарате идеального вытеснения (АИВ) жидкость «В» вытесняет «А» как поршнем, не смешиваясь. Жидкость «В» появляется в 3 только после полного удаления «А» из аппарата, т. е. когда $Wt/V = 1$.

На рис. 2 кривая 1 выражает $x = f\left(\frac{Wt}{V}\right)$ для аппарата идеального смещения (АИС), согласно (5). Прямые 2—3—4 дают эту же связь для аппарата идеального вытеснения (АИВ). Кривая 5, занимающая промежуточное положение, представляет изменение x для какого-либо реального аппарата.

Если в аппарат рис. 1 подана жидкость «В» объемом V , т. е. $W\tau/V=1$, то:

а. При АИС концентрация «В» в аппарате и на выходе из него будет

$$-\ln(1-x) = \frac{W\tau}{V} = 1 \quad \text{и} \quad x = 0,633.$$

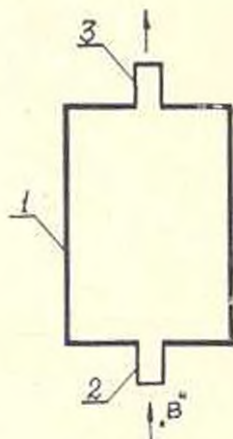


Рис. 1

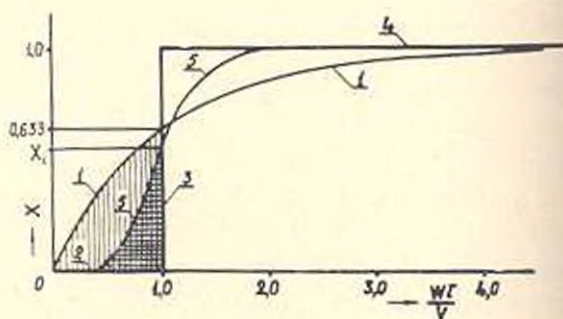


Рис. 2

Это означает, что в аппарате в рассматриваемый момент имеется жидкость «В» в объеме $0,633V$. Но, так как в аппарат подано этой жидкости в объеме V , то ушедшее из аппарата количество «В» составит $0,367V$. На рис. 2 этот объем «В» выражается вертикально заштрихованной областью. Средняя концентрация ушедшей из аппарата жидкости «В» составит $x_c = 0,367$.

б. При АИВ, когда $W\tau/V=1$, аппарат целиком заполнен жидкостью «В», а на выходе ее концентрация $x_0 = 0$.

в. В реальном аппарате, когда $W\tau/V=1$, концентрация «В» в различных частях аппарата будет разная, а на выходе составит некоторую x_1 . Изменение концентрации «В» на выходе пойдет по некоторой кривой 5, а объем ушедшего из аппарата компонента «В» определится площадью перекрестно заштрихованной области. Средняя концентрация x жидкости «В» в ушедшей смеси будет пропорциональна площади этой области.

г. Соотношения средних концентраций x и x_c ушедшей из аппарата жидкости (при $W\tau/V=1$), или соотношение площадей перекрестно заштрихованных областей, может служить мерилем степени близости данного реального аппарата к АИС. Обозначим это соотношение через γ и назовем его коэффициентом продольного смешения:

$$\gamma = \frac{x}{x_c} = \frac{x}{0,367} = 2,72x. \quad (6)$$

При идеальном смещении $\beta = 1$. При идеальном вытеснении $\beta = 0$. В реальном аппарате β имеет промежуточное значение между 0 и 1.

Зависимость движущей силы Δx от β . Пусть в аппарате рис. 1 имеет место растворение некоторой соли, частицы которой равномерной взвесью заполняют весь аппарат и их убывает непрерывно компенсируется вводом новых частиц. Концентрация частиц φ , их удельная поверхность f , скорость подачи растворителя W , начальная (x_1) и конечная (x_2) концентрации соли в растворителе постоянны во времени.

Допустим сначала, что процесс идет по режиму идеального вытеснения, т. е. $\beta = 0$, высота аппарата равна h_1 , а изменение концентрации соли по h_1 идет по кривой 1 (рис. 3). Очевидно, средняя движущая сила Δx_n будет:

$$\Delta x_n = \frac{x_2 - x_1}{\ln \frac{x_2 - x_1}{x_s - x_1}} = (x_s - x_2) \cdot \frac{\text{пл. } (x_2 - x_1 - \beta - x_1)}{h_1} \quad (7)$$

Числитель второй слагаемой в (7) представляет собой заштрихованную площадь выше кривой 1 (назовем ее площадью I).

Теперь допустим, что аппарат переходит на режим идеального смещения, когда $\beta = 1$. Тогда, при тех же условиях и при постоянстве производительности, потребуется другая высота аппарата

$$h_2 = \frac{\Delta x_n h_1}{\Delta x_s} \quad (8)$$

где Δx_s — средняя движущая сила при АИС, равная первой слагаемой в (7):

$$\Delta x_s = x_s - x_2 \quad (9)$$

Отличие АИС от АИВ заключается именно в полной утрате второго слагаемого (заштрихованная площадь исчезает). Потери в средней движущей силе всегда составляют

$$\Delta x_n - \Delta x_s = \frac{x_2 - x_1}{\ln \frac{x_2 - x_1}{x_s - x_1}} - (x_s - x_2) = \frac{\text{пл. } I}{h_1} \quad (10)$$

Допустим, что в реальном процессе, когда $0 < \beta < 1$, изменение концентрации в растворителе по высоте h_2 идет по кривой 2. В этом случае потери в средней движущей силе, по сравнению с АИВ, определяются разницей между заштрихованными площадями выше кривой 1 (площадь I) и выше кривой 2 (площадь II), а именно:

$$\Delta x_n - \Delta x = \frac{\text{пл. } I}{h_1} - \frac{\text{пл. } II}{h_2} \quad (11)$$

При $\beta = 0$ $\Delta x_n - \Delta x = 0$. С ростом β площадь II уменьшается, а h_2 растет [согласно (8)], т. е. уменьшается второй член правой части (11). При АИС этот член станет нулем и придем к выражению (10).

Сравнивая рисунки 2 и 3 нетрудно заметить следующее: когда заштрихованная площадь на рис. 2 достигает максимума (при АИНС, когда $\beta = 1$), на рис. 3 таковая исчезает, и наоборот, когда на рис. 2 исчезает заштрихованная площадь (АИВ, $\beta = 0$), то на рис. 3 таковая достигает максимума. Это обстоятельство подсказывает вывод (строго недоказанный, но, по-видимому, близкий к истине) о том, что потери в средней движущей силе пропорциональны коэффициенту продольного смещения β , т. е.

$$\frac{\Delta x_n - \Delta x}{\beta} = \frac{\Delta x_n - \Delta x_c}{1}$$

или

$$\Delta x = \frac{(x_2 - x_1)(1 - \beta)}{\ln \frac{x_s - x_1}{x_s - x_2}} + (x_s - x_2)\beta \quad (12)$$

Таким образом, при известном коэффициенте смещения β по (12) можно определить движущую силу Δx .

О соотношении $\Delta x_n/\Delta x_c$. Если аппарат, работающий в режиме идеального вытеснения, имеет высоту h_1 , то аппарат, действующий в режиме идеального смешения, при тех же f , x_1 , x_2 и W , должен иметь высоту h_2 , определяемую по (8). Соотношение высот

$$\frac{h_2}{h_1} = \frac{\Delta x_n}{\Delta x_c} = \frac{(x_s - x_2) + \frac{\text{площ. 1}}{h_1}}{(x_s - x_2)} = 1 + \frac{\frac{\text{площ. 1}}{h_1}}{(x_s - x_2)} \quad (13)$$

Из (13) видно, что соотношение высот зависит от разницы $(x_s - x_2)$ и с ее уменьшением оно резко растет.

Например, если $x_1 = 0$, а $x_s = 0,3$, то соотношение h_2/h_1 или $\Delta x_n/\Delta x_c$ в зависимости от x_2 меняется следующим образом

x_2	0,05	0,10	0,20	0,25	0,27	0,29	0,295
$\frac{h_2}{h_1} = \frac{\Delta x_n}{\Delta x_c}$	1,1	1,24	1,82	2,80	4,05	8,50	14,5

Из изложенного следует, что резкое увеличение продольного смещения в реальном аппарате может, в определенных условиях, привести к многократному снижению производительности единицы его объема (или единицы его высоты). Поэтому изучение влияния концентрации φ взвеси на коэффициент смещения β является важным.

Продольное смешение однородной жидкости. Продольное смешение частиц жидкости имеет место в любом потоке, в том числе и в потоке однородной, химически индивидуальной жидкости. Рассмотрим наиболее простой случай такого смешения — смешение в ламинарном потоке.

Пусть по трубе рис. 4, в ламинарном режиме течет жидкость с равномерным объемным расходом W . Для определения степени про-

дольного смещения жидкости рассмотрим объем $V = W$, заключенный между сечениями I и II. В некоторый момент установившегося потока в горизонтальной плоскости I будут находиться определенные частицы жидкости. Жидкость, находящуюся в этот момент ниже сечения I, назовем „нижней“. Остальную — „верхней“. Через 0,5 сек частицы, находившиеся в начале секунды в плоскости I, окажутся на поверхности параболоида 1. Расход за это время составит $0,5 W = 0,5 V$, средняя концентрация „нижней“ жидкости в рассматриваемом объеме V составит 0,5, через сечение II еще не прошла „нижняя“ жидкость

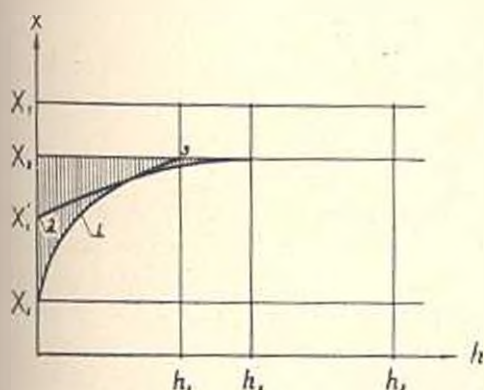


Рис. 3.

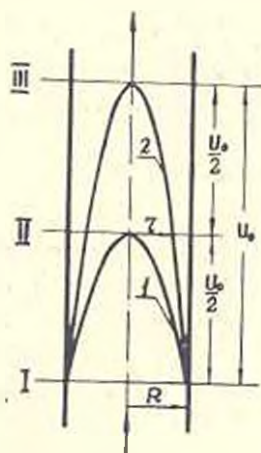


Рис. 4.

но вершина параболоида уже дошла до этого сечения, имея высоту $U_0/2$ (U_0 — осяевая скорость потока). Через одну секунду рассматриваемые частицы окажутся на поверхности параболоида 2, имеющего высоту U_0 . Через сечение II прошла жидкость общего объема $W = V$, в том числе „нижняя“ жидкость с объемом, равным объему верхней половины параболоида 2. Если бы имело место идеальное вытеснение, то в конце первой секунды объем между сечениями I и II оказался бы целиком заполненным „нижней“ жидкостью, а через сечение II еще не прошла бы эта „нижняя“ жидкость.

Объем параболоида 2 равен:

$$V = W = 0,5 U_0 \pi R^2. \quad (16)$$

Объем нижней половины параболоида 2 будет:

$$W_n = 0,25 U_0 \pi (R^2 + r^2). \quad (17)$$

Объем верхней половины:

$$W_n = W - W_n = 0,25 U_0 \pi (R^2 - r^2). \quad (18)$$

Величину радиуса r можно определить из параболического закона Стокса для ламинарного потока. Струи жидкости, достигшие за секунду сечения II, имеют скорость $0,5 U_0$, следовательно,

$$U = 0,5 U_0 = \frac{P_1 - P_2}{4\eta l} (R^2 - r^2) = k(R^2 - r^2). \quad (19)$$

Откуда, учитывая, что $U_0 = kR^2$, получается:

$$r^2 = 0,5 R^2. \quad (20)$$

Из (18) получается:

$$W_0 = 0,125 U_0 R^2 \quad \text{или} \quad W_0 = 0,25 W. \quad (21)$$

Таким образом, при ламинарном потоке, при $W_0:W=1$, средняя концентрация «нижней» жидкости в ушедшей через сечение II «смеси» составит согласно (21), $x_2 = 0,25$.

Коэффициент продольного смешения в этом случае имеет значительную величину и составляет

$$\beta = 2,72 x_2 = 0,68.$$

Методика определения β . При разработке методики опытного определения коэффициента β мы исходили из необходимости получения сравнительных данных, т. е. данных о том, насколько наличие взвеси и ее концентрация φ увеличивают или уменьшают степень продольного смешения слоев жидкости.

Нами были разработаны два способа экспериментального определения величины β . Первый из них состоял в следующем.

В стеклянную колонку 1 (рис. 5) через трубку 2 с постоянной объемной скоростью w подавалась жидкость «А», отбираемая в приемник через отвод 4. После достижения стационарного режима потока по колонке, быстрым поворачиванием тройного крана 5 поток жидкости «А» заменялся потоком жидкости «В» с той же объемной скоростью w . Одновременно с этим засекалось время, а прием жидкости из отвода 4 переключался в другой приемник. С этого момента начинался также отбор проб из отвода 4 (через определенные промежутки времени) до тех пор, пока из отвода стала сливаться стопроцентная жидкость «В». Далее, взятые пробы анализировались на содержание жидкости «В» и по полученным результатам составлялся график, пример которого приведен на рис. 6. В качестве жидкости «А» служила деаэрированная вода комнатной температуры, а жидкостью «В» служили растворы чистой поваренной соли и повар. с той же температурой. На рис. 6 по оси абсцисс отложено количество жидкости «В», поданное в колонку во время опыта, выраженное через объем колонки V , по оси ординат — концентрации жидкости «В» в сливе из отвода 4. Нетрудно заметить, что горизонтально заштрихованная область I, представляющая собой x в выражении (6), должна быть равна вертикально заштрихованной области II, представляющей собой объем жидкости «А» (выраженный в долях объема колонки V), задержанный в колонке после подачи в нее жидкости «В» в объеме V . Значение x определено как среднее арифме-

тическое площадей областей I и II. Значение коэффициента β определено по (6).

При опытах с наличием извести навеска частиц кварцевого песка предварительно засыпалась в колонку, на сетку 6 (рис. 5). При подаче жидкости «А» частицы переходили во взвесь и оставались в таком

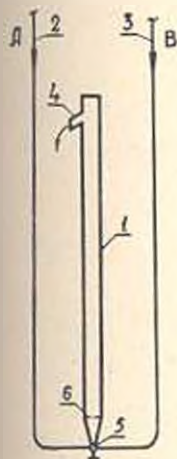


Рис. 5.

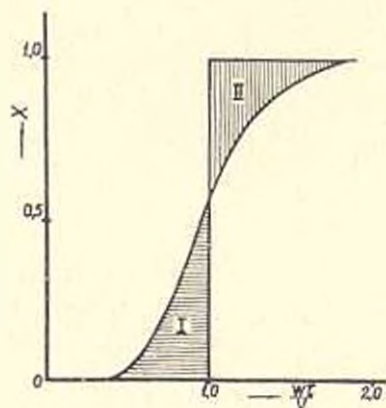


Рис. 6.



Рис. 7.

состоянии до конца опыта. Навеска частиц и скорость жидкости W подбирались так, чтобы при опыте почти вся колонка до отвода 4 была заполнена равномерной взвесью. Песок для опытов брался по возможности монодисперсный; узкая ситовая фракция подвергалась многократной гидросепарации для улучшения степени монодисперсности.

Второй метод определения β отличался от описанного тем, что анализ состава вытекающей из отвода 4 жидкости производился непрерывно, при помощи полярографа. Каломельный и капельно-ртутные электроды помещались в отвод 4 специальной конструкции. Жидкостями «А» и «В» служили, по-прежнему, вода и растворы поваренной соли. Фоном служила соль кадмия. Разработка деталей метода, его освоение и применение осуществлялись самой активной помощью Айказяна Э. А. и Исабекияна С. Е., за что авторы выражают свою глубокую признательность. Второй метод служил, в основном, как контроль для первого метода.

Определение β для разных участков аппарата. В колонке (рис. 7) коэффициенты смешения β_1 и β_2 для участков h_1 и h_2 могут быть различными. При определении β по вышеописанному способу, можно утверждать, что $\beta_1 > \beta_2$, так как на участке h_1 имеются факторы, вызывающие местное, более интенсивное смешение обеих жидкостей. Такими факторами являются: внезапное переклечение потоков, наличие тройного крана, расширение потока жидкости до диаметра колонки, наличие сетки внизу колонки и другие. Кроме того, установление окончательной эпюры скоростей, как известно, наступает после прохождения определенного пути, считая с места входа. Очевидно,

что местные эффекты смешения накладываются на истинное значение β колонны, искажая и увеличивая его.

Коэффициент β_2 может быть определен так: сначала опытом находят x_1 , отбирая жидкость через отвод 1, а затем, закрывая отвод 1 и отбирая жидкость через отвод 2, определяют x для всей колонны высотой h , xV будет объем жидкости „В“, проникшей в жидкость „А“, при прохождении „В“ до отвода 2 (V —объем колонки до этого отвода). x_1V_1 —то же самое, при прохождении „В“ с начала колонки до отвода 1 (V_1 —объем колонки до этого отвода). Очевидно, что $x_2V_2 = xV - x_1V_1$ представляет собой объем „В“, проникшей в „А“ на пути h_2 . Поэтому

$$x_2 = \frac{xV - x_1V_1}{V_2} \quad (22)$$

В (22) все величины, входящие в правую часть, определяются опытом. Зная x_2 , по (6) определяется β_2 . Аналогичным способом можно определять β для любого участка колонны (аппарата).

Институт органической химии
АН Арм. ССР

Поступило 24. V. 1971

Ա. Մ. ԳԱՍՊԱՐՅԱՆ, Է. Ա. ՄԵԼԻԿՅԱՆ

ՀԵՂՈՒԿԻ ԸՆԴԵՐՈՒՄՆԵՐԿԱՆ ԽԱՌՆԵՐԱՆ ՎԵՐԱԲԵՐՅԱԼ

Ա մ փ ո փ ու մ

Հողվածք վերաբերում է մասսափոխանակման ինտենսիվության վրա հիդրոդինամիկական իրադրության ազդեցության ուսումնասիրությանը երկ ֆազ հոսքում, որը բաղկացած է հեղուկից և նրա մեջ կախված պինդ մաս ներկներին:

Առաջարկված է լեղելակայանային խառնման գործակից հասկացությունը և տրված է նրա քանակական ընդդրումը: Շարադրված է այդ գործակիցի մեծության փորձարարական եղանակով որոշման մեթոդիկան և տեսականորեն որոշված է նրա արժեքը համասեռ հեղուկի լամինար շարժման ժամանակ: Բացահայտված է լեղելակայանական խառնման գործակիցի ազդեցությունը շարժիչ ուժի միջին արժեքի վրա մասսափոխանակման ապարատում:

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Гаспарян А. М., Меликян Э. А. ДАН Арм. ССР, XXXIII, № 1, 1961.
2. Гаспарян А. М., Меликян Э. А. ЖПХ, т. XXXVI, 1963.
3. Гаспарян А. М., Икрян Н. С. «Известия АН Арм. ССР (серия Т. II.)», т. XV, № 2, 1962.
4. Пилинский А. И. «Химическая промышленность», № 5, 1944.
5. Пилинский А. И., Гуревич Д. А. Аппаратура промышленности и красителей. Госхимиздат, 1961.