

*Л. М. ГУХМАН, А. И. ЕРШОВ, И. М. ПЛЕХОВ*

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИКИ И МАССОПЕРЕДАЧИ В ЦИЛИНДРИЧЕСКОМ КОНТАКТНОМ УСТРОЙСТВЕ ПРИ ДВУХФАЗНОМ ЗАКРУЧЕННОМ ПОТОКЕ**

На 1-й сессии Научного совета по теоретическим основам химической технологии при АН СССР, состоявшейся в 1964 г., было принято решение о необходимости форсирования исследований и разработки методов расчета в области тепло- и массообменных процессов, проводимых в интенсифицированных режимах.

Очень перспективным методом интенсификации тепло- и массообмена в системах газ — жидкость и пар — жидкость оказалось применение закрученного потока [1]. Здесь имеется в виду закрученный двухфазный поток, образующийся при подводе газа и жидкости в цилиндрическое пространство через тангенциальные щели либо через статические винтовые закручиватели.

В настоящее время исследователи по-разному объясняют причину высокой эффективности закрученного двухфазного потока. Одни из них [2] считают, что происходит обтекание массоотдающей поверхности плоской тонкой струей газа со значительной скоростью, другие [3] — что при крутке заметно увеличивается продолжительность контакта фаз.

Анализ предложенной физической модели переноса вещества в двухфазном закрученном потоке [4], основанной на законах конвективной диффузии и винтового движения среды, позволил раскрыть причины влияния закрутки потока и более высокой интенсивности восходящего закрученного потока, чем нисходящего.

В данной статье приводятся результаты экспериментальной проверки основных положений, вытекающих из анализа физической модели переноса вещества в двухфазном закрученном потоке.

Для исследования гидродинамики и массопередачи необходимо было создать такую конструкцию контактного элемента, которая свела бы к минимуму возможность взаимодействия фаз вне закрученного потока. Следовательно, нужно было разработать такие узлы входа и разделения фаз, которые оказывали бы незначительное влияние на эффективность процесса массообмена. Кроме того, конструкция должна была позволять проводить исследования как восходящего, так и нисходящего закрученных потоков без изменения геометрических характеристик всего устройства. Наконец, необходимо было предусмотреть возможность замены статических закручивателей в одном и том же контактном элементе с целью исследования влияния угла подъема винта на гидродинамику и эффективность массопередачи.

Исходя из изложенных требований, мы разработали конструкцию контактного устройства (рис. 1). Для возможности визуального наблюдения собственно контактный элемент и все детали были выполнены из органического стекла.

Принцип работы конструкции заключается в следующем. Поток газа, проходя входной патрубком, подхватывает из напорной камеры через кольцевую щель шириной около 1,5 мм жидкую фазу, и образовавшийся двухфазный поток попадает на лопасти статического закручивателя. В поле центробежных сил жидкость отбрасывается к стенкам контактной трубки и в виде турбулизованной пленки движется по спирали на

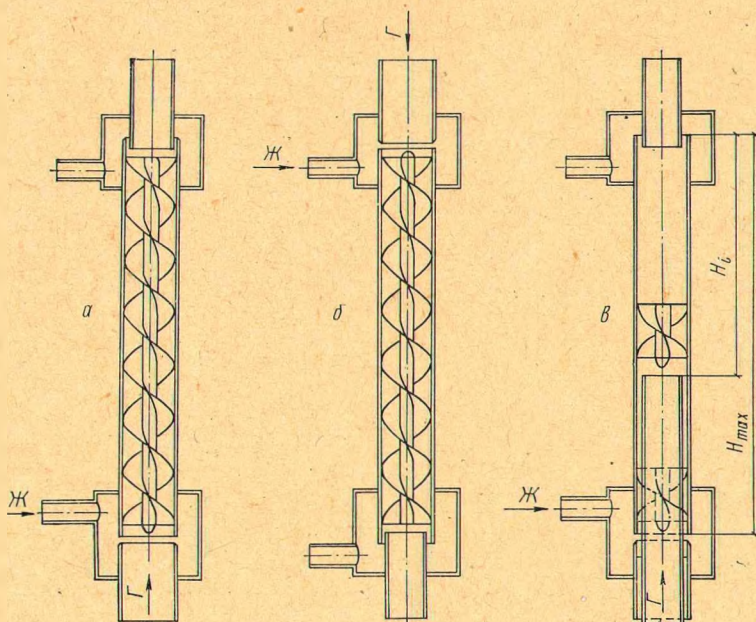


Рис. 1. Конструкция контактных устройств:

а, б — контактное устройство для потока I вида; в — контактное устройство для потока II вида.

ее внутренней поверхности. В конце контактной трубки концентрично на глубину 5 мм введена выхлопная труба меньшего диаметра, образуя кольцевой зазор около  $1,5 \div 1,75$  мм. Жидкая фаза, находящаяся у стенок трубки, попадает в этот кольцевой зазор и отводится в приемную камеру. Газовый поток через выхлопную трубку удаляется в атмосферу.

При закрученном потоке первого вида [4] контактные трубки длиной 170 мм исследовались трех диаметров 20, 25 и 29 мм.

Для выяснения влияния крутки потока, которая является функцией угла подъема винтовой линии, на интенсивность массопередачи и гидравлическое сопротивление двухзаходные статические закручиватели диаметром 25 мм были выполнены с шагом 20, 25, 44 и 65 мм.

При исследовании закрученного потока второго вида использовался статический двухзаходный закручиватель общей длиной 45 мм и шагом 28 мм. В опытах по определению влияния длины контакта на гидродинамику и массопередачу закручиватель устанавливали через каждые 20 мм. При этом входной патрубок, подводящий газ, соответственно перемещался на такое же расстояние (см. рис. 1, в), что исключало предварительное взаимодействие фаз до закручивателя.

Контактное устройство монтировалось на опорном фланце, в котором имелись два отверстия диаметром 2,5 мм для отбора давления газа до входа в элемент.



Схема экспериментальной установки для исследования восходящего закрученного потока представлена на рис. 2.

Воздух ввиду высокой пропускной способности контактного элемента подавался двумя подключенными параллельно вентиляторами 1. Питание из электросети подводилось через автотрансформатор 2, что

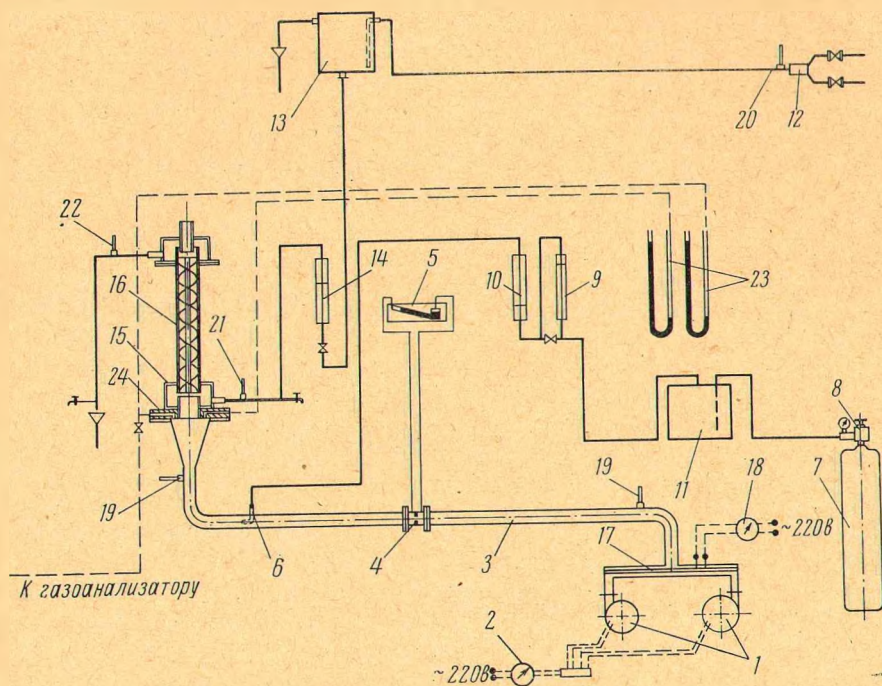


Рис. 2. Схема экспериментальной установки.

позволяло осуществлять плавную регулировку расхода газовой фазы. Воздуховод 3 был выполнен из винипластовой гладкой цилиндрической трубы  $D_B = 50$  мм.

Расход чистого воздуха замерялся по перепаду давления на камерной диафрагме 4, рассчитанной и установленной на трубопроводе в соответствии с нормальными [5], наклонным микроманометром 5 типа ММН.

При исследовании массопередачи в процессе абсорбции  $CO_2$  водой перед контактным узлом в воздуховоде устанавливался распылитель подмешиваемого углекислого газа 6, который представлял собой сопло с внутренним диаметром 6 мм, закрытое с торца и имеющее на боковой поверхности ряд отверстий  $\varnothing = 1,2$  мм.

Углекислый газ из баллона 7 через редуктор 8, снижающий давление, подавался в ресивер 11, а затем через ротаметр 9 марки РС-3 при малых расходах либо через ротаметр 10 марки РС-5 при увеличенной производительности к распылителю. Применение ресивера обеспечивало достаточно равномерную подачу  $CO_2$  в систему.

Ротаметры 9, 10 служили преимущественно для предварительной настройки  $CO_2$  на подмешивание, так как содержание углекислого газа в смеси до входа в контактный элемент определялось газоанализатором.

Вода холодная и горячая, проходя через смеситель 12, поступала в напорный бак 13 с переливом, откуда через ротаметр 14 марки РС-5, отградуированный по воде, попадала в нижнюю приемную камеру 15 контактного элемента.

С целью уменьшения влияния процесса теплопередачи на результаты по массопереносу температура поступающей газовой смеси и воды поддерживалась одинаковой. Для термостатирования газового потока в коллекторе, соединяющем оба вентилятора был вмонтирован электронагреватель 17, подключенный в сеть через автотрансформатор 18.

Температура газовой смеси перед входом в контактный элемент замерялась ртутным термометром 19 с ценой деления  $0,5^{\circ}\text{C}$ . Температура воды после смесителя 20, после напорного бака и на выходе из контактного элемента замерялась ртутными термометрами с ценой деления  $0,5^{\circ}\text{C}$ .

Содержание  $\text{CO}_2$  в воде определялось по известной методике [6] прямым титрованием щелочью.

Анализ газовой смеси на содержание  $\text{CO}_2$  проводился до входа в контактный элемент аппаратом ГХП-3М с ценой деления 0,2 объемного процента.

Гидравлическое сопротивление контактного элемента замерялось независимо друг от друга двумя U-образными манометрами 23, подключенными к двум различным штуцерам, закрепленным в опорном фланце 24.

Схема установки для исследования нисходящего закрученного потока была совершенно аналогичной, только контактное устройство повернуто на  $180^{\circ}$ .

Основной целью первого этапа экспериментальной части работы являлось исследование влияния направления движения фаз на интенсивность массообмена для закрученного потока первого и второго видов.

Во время опытов изучалась зависимость интенсивности процесса от режимов движения обеих фаз и угла подъема винтовой линии статических закручивателей.

Поскольку кинетика массопереноса исследовалась на процессе абсорбции труднорастворимого газа  $\text{CO}_2$  водой, когда основное сопротивление диффузии сосредоточено в жидкой фазе, то вместо коэффициента массоотдачи  $\beta_{\text{ж}}$  при обработке опытных данных рассчитывался объемный коэффициент массопередачи  $Kv_{\text{ж}}$  по формуле:

$$Kv_{\text{ж}} = \frac{G_{\text{CO}_2}}{V \Delta x_{\text{ср}}} \quad (1)$$

где  $G_{\text{CO}_2}$  — количество абсорбированного углекислого газа, кг/час;  
 $V = \frac{\pi (d_{\text{п}}^2 - d_{\text{ст}}^2)}{4} \Delta x_{\text{ср}}$  — объем контактной трубы,  $\text{м}^3$ ;  
 $\Delta x_{\text{ср}}$  — средняя логарифмическая движущая сила процесса,  $\text{кг}/\text{м}^3$ .

Для более полного представления о кинетике процесса массопередачи, кроме  $Kv_{\text{ж}}$ , рассчитывалась степень приближения к равновесию по жидкой фазе по формуле:

$$\eta_{\text{ж}} = \frac{x_{\text{к}} - x_{\text{н}}}{x_{\text{к}}^* - x_{\text{н}}} \quad (2)$$



Результаты опытов во всех режимах и при всех геометрических характеристиках (рис. 3, 4) подтвердили более высокую интенсивность восходящего закрученного потока по сравнению с нисходящим.

Рассмотрим результаты исследования закрученного потока первого вида.

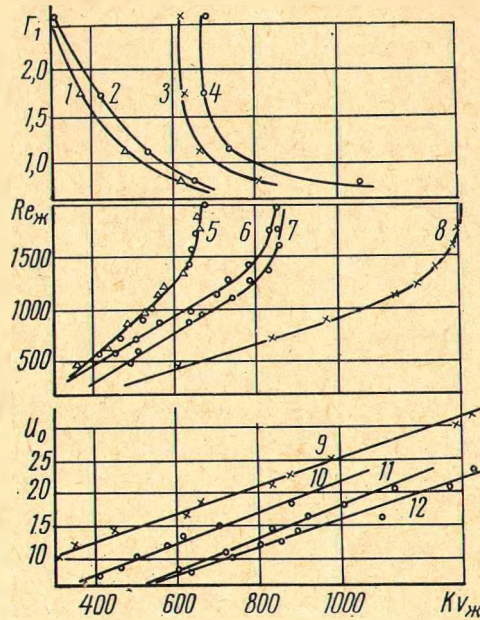


Рис. 3. Зависимость  $K_{vж}$  от скорости газа, режима движения жидкости и угла подъема винта для закрученного потока первого вида:

1 — $U_0 = 8$ ;	$Re_{ж} = 1420$	} нисходящий поток
2 — $U_0 = 12$ ;	$Re_{ж} = 850$	
3 — $U_0 = 12$ ;	$Re_{ж} = 850$	} восходящий поток
4 — $U_0 = 12$ ;	$Re_{ж} = 1120$	
5 — $d_n = 29$ ;	$\Gamma_1 = 1,1$ ; $U_0 = 12,2$	} нисходящий поток
6 — $d_n = 25$ ;	$\Gamma_1 = 1,1$ ; $U_0 = 12,0$	
7 — $d_n = 29$ ;	$\Gamma_1 = 1,1$ ; $U_0 = 12,2$	} восходящий поток
8 — $d_n = 20$ ;	$\Gamma_1 = 1,1$ ; $U_0 = 13,6$	
9 — $d_n = 25$ ;	$Re_{ж} = 1420$ ; $\Gamma_1 = 2,6$	} нисходящий поток
10 — $d_n = 29$ ;	$Re_{ж} = 14,75$ ; $\Gamma_1 = 1,1$	
11 — $d_n = 25$ ;	$Re_{ж} = 1420$ ; $\Gamma_1 = 1,1$	} восходящий поток
12 — $d_n = 25$ ;	$Re_{ж} = 1420$ ; $\Gamma_1 = 1,76$	

Согласно графикам (рис. 3), с уменьшением угла подъема винтовой линии статического закручивателя коэффициент массопередачи резко увеличивается в случае нисходящего потока. При восходящем движении фаз с уменьшением угла первоначально интенсивность процесса возрастает незначительно, оставаясь по абсолютному значению выше, чем для нисходящего потока, но при шаге  $t < 1,5d_n$  коэффициент массопередачи быстро увеличивается.

Такой характер графической зависимости  $K_{vж} = f(\Gamma_1)$  можно объяснить следующим образом.

В нисходящем закрученном потоке действие силы тяжести пленки, способствующее некоторому спрямлению крутки в пределах каждого витка и снижению величины касательного напряжения в слое жидкости [4], уменьшается с уменьшением угла подъема винтовой линии.

Поэтому использование малого угла подъема винта статического закручивателя, кроме того, что оно вызывает увеличение величины полной и тангенциальной скоростей движения [4], приводит к возрастанию касательных напряжений в слое жидкости, вызывающее интенсификацию вихревого переноса массы и уменьшение толщины пограничных диффузионных слоев.

В случае же восходящего закрученного потока, когда действие силы тяжести способствует увеличению касательных напряжений, первоначально, при значительном угле подъема винтовой линии преимущественное влияние на величину вихревого переноса вещества, по-видимому, оказывает составляющая веса слоя жидкости и поэтому изменение угла подъема винта или симплекса  $\Gamma_1 = \frac{t}{d_n}$  незначительно влияет на величину  $Kv_{ж}$ .

Однако при углах подъема, соответствующих  $t < 1,5d_n$ , т. е. при малых значениях угла  $\alpha$ , основное влияние на интенсивность процесса начинает оказывать действие поле центробежных сил, следствием чего является резкое увеличение коэффициента массопередачи.

Обработка экспериментальных данных показала, что зависимость  $Kv_{ж} = f(\Gamma_1)$  с достаточной точностью можно представить в виде степенной:

$$\text{для восходящего потока } Kv_{ж} \sim \Gamma_1^{-0,23}, \quad (3)$$

$$\text{для нисходящего потока } Kv_{ж} \sim \Gamma_1^{-0,65}. \quad (4)$$

Полученные соотношения позволили сделать следующее существенное заключение. Для обеспечения одинаковой интенсивности в случае восходящего потока можно устанавливать статические закручиватели со значительно большим углом подъема, чем при нисходящем потоке. При этом гидравлическое сопротивление, как будет показано ниже, снижается.

Характер влияния режима движения жидкой фазы на величину коэффициента массопередачи для восходящего и нисходящего потоков в основном одинаков (см. рис. 3). С возрастанием  $Re_{ж}$  первоначально происходит значительное увеличение  $Kv_{ж}$ , затем приблизительно при  $Re_{ж} \sim 1450$  скорость увеличения снижается. Все же в случае восходящего потока коэффициент массопередачи несколько выше, чем для нисходящего. В результате чего получено:

$$\text{для восходящего потока } Kv_{ж} \sim Re_{ж}^{0,6}, \quad (5)$$

$$\text{для нисходящего потока } Kv_{ж} \sim Re_{ж}^{0,45}. \quad (6)$$

Увеличение расхода жидкости и, следовательно, величины критерия Рейнольдса приводит в обоих случаях к турбулизации слоя, повышению касательного напряжения [4], что неизбежно ведет к интенсификации процесса переноса. С другой стороны, сила тяжести жидкого слоя, возрастающая с увеличением расхода, в случае нисходящего потока уменьшает, а при восходящем потоке дополнительно увеличивает



значение касательного напряжения, чем и объясняется более слабая интенсификация коэффициента массопередачи в зависимости от  $Re_{ж}$  для нисходящего потока.

Вместе с тем для обоих потоков при данной производительности по газовой фазе с увеличением  $Re_{ж}$  происходит соответственное утолщение слоя жидкой фазы и возрастание его диффузионного сопротивления, что выражается (рис. 3) в уменьшении влияния режима движения жидкости на величину коэффициента массопередачи.

Характер влияния средней скорости движения газового потока (см. рис. 3) на величину коэффициента массопередачи совершенно одинаков как для восходящего, так и для нисходящего потоков. В обоих случаях

$$Kv_{ж} \sim U_0^{1,0}. \quad (7)$$

Аналогичная зависимость была установлена при высокоскоростных режимах проведения процессов массообмена в прямотоке [7].

После обработки результатов для закрученного потока первого вида нами получены соотношения:

$$\text{при восходящем потоке } Kv_{жI} \sim U_0 Re_{ж}^{0,6} \Gamma_1^{-0,23}, \quad (8)$$

$$\text{при нисходящем потоке } Kv_{жI} \sim U_0 Re_{ж}^{0,45} \Gamma_1^{-0,65}. \quad (9)$$

Характер полученных зависимостей достаточно хорошо согласуется с основными выводами, полученными при анализе физической модели переноса.

Сравнительное исследование эффективности закрученного потока второго вида проводилось только на одном статическом двухзаходном закручивателе с  $\Gamma_1 = 1,0$ .

При этом установлено, что влияние средней скорости газа и режима движения жидкости на величину коэффициента массопередачи подобно потоку первого вида (рис. 4).

Обработка опытных данных позволила получить следующие соотношения для потока второго вида:

$$\text{восходящий поток } Kv_{жII} \sim U_0 Re_{ж}^{0,49} \Gamma_2^{-0,80}, \quad (10)$$

$$\text{нисходящий поток } Kv_{жII} \sim U_0 Re_{ж}^{0,37} \Gamma_2^{-0,40}, \quad (11)$$

где  $\Gamma_2 = \frac{H_n}{d_n}$ .

Согласно уравнениям (10), (11) и рис. 4, разница в эффективности восходящего и нисходящего потоков уменьшается с увеличением длины трубы. Это объясняется тем, что в восходящем закрученном потоке ввиду высокой интенсивности процесса очень быстро концентрация в жидкой фазе приближается к равновесной, движущая сила процесса уменьшается и увеличение длины трубки приводит к более резкому, чем в нисходящем потоке, снижению коэффициента массопередачи.

Хотя интенсивность процесса массопереноса для закрученного восходящего потока обоих видов выше, чем для нисходящего, для выяснения общей эффективности того и другого вида потоков необходимо было выполнить сравнительное исследование по гидравлическому сопротивлению в зависимости от направления движения.

**Закрученный поток первого вида.** Исследования проводились в интервале  $Re_{ж} = 480—2500$  и  $Re_{г} = 5 \cdot 10^3—3,0 \cdot 10^4$ .

Как видно из представленной на рис. 5 графической зависимости, скорость увеличения критерия Эйлера зависит от направления движения:

$$\text{для восходящего потока } Eu \sim Re_{г}^{-0,5}, \quad (12)$$

$$\text{для нисходящего потока } Eu \sim Re_{г}^{-0,35}. \quad (13)$$

Анализ полученных соотношений (12), (13) и графической зависимости (рис. 5) показал, что разница в гидравлическом сопротивлении

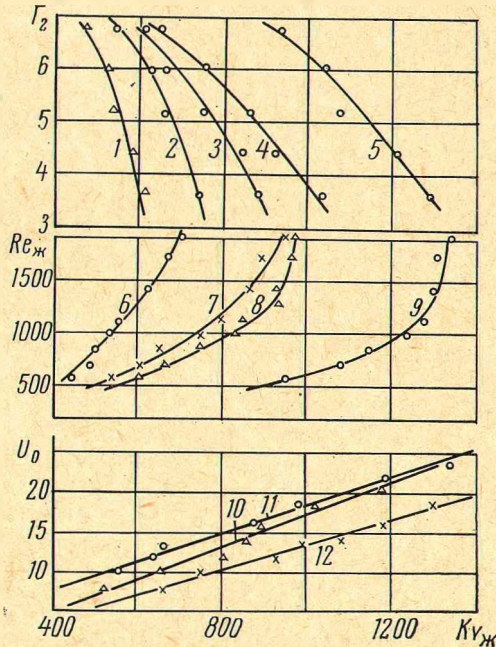


Рис. 4. Зависимость  $Kv_{ж}$  от скорости газа, режима движения жидкости и длины контактной трубки для закрученного потока второго вида.

1 — $U_0 = 12$ ;	$Re_{ж} = 700$	} нисходящий поток
2 — $U_0 = 10,2$ ;	$Re_{ж} = 1420$	
3 — $U_0 = 12$ ;	$Re_{ж} = 1710$	
4 — $U_0 = 10,2$ ;	$Re_{ж} = 1420$	
5 — $U_0 = 12$ ;	$Re_{ж} = 1710$	
6 — $U_0 = 12$ ;	$\Gamma_2 = 6,8$	} нисходящий поток
7 — $U_0 = 12$ ;	$\Gamma_2 = 3,6$	
8 — $U_0 = 12$ ;	$\Gamma_2 = 6,8$	} восходящий поток
9 — $U_0 = 12$ ;	$\Gamma_2 = 3,6$	
10 — $Re_{ж} = 1420$ ;	$\Gamma_2 = 6,8$	} восходящий поток
11 — $Re_{ж} = 1420$ ;	$\Gamma_2 = 6,8$	
12 — $Re_{ж} = 1420$ ;	$\Gamma_2 = 3,6$	

контактного элемента с восходящим и нисходящим потоком уменьшается с ростом скорости движения газа и при значительных числах  $Re_{г}$  достигает нуля. Этот факт может быть объяснен следующим образом. При сравнительно малых числах  $Re_{г}$ , когда действие собственного



веса жидкой фазы соизмеримо с прочими затратами кинетической энергии несущего газового потока, сопротивление восходящего потока заметно превышает сопротивление нисходящего.

При больших значениях  $Re_r$ , приблизительно 30000, действие силы тяжести тонкого слоя жидкости является настолько незначительным по

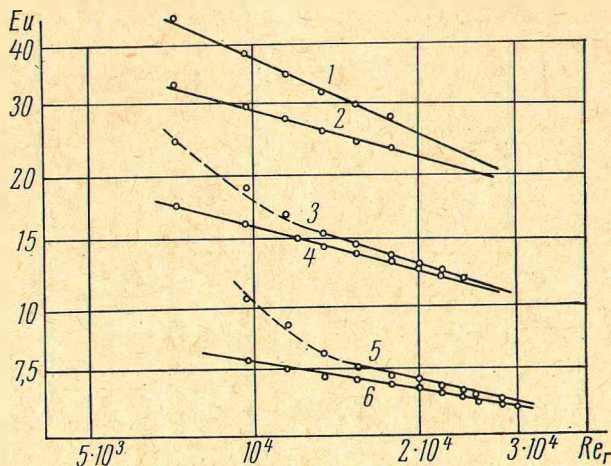


Рис. 5. Зависимость  $Eu$  от режима движения газа:

- |                     |                    |
|---------------------|--------------------|
| 1 — $\Gamma_1=1,12$ | } восходящий поток |
| 3 — $\Gamma_1=1,76$ |                    |
| 5 — $\Gamma_1=2,60$ |                    |
| 2 — $\Gamma_1=1,12$ | } нисходящий поток |
| 4 — $\Gamma_1=1,76$ |                    |
| 6 — $\Gamma_1=2,60$ |                    |

сравнению с остальными источниками гидравлических потерь, что в пределах погрешности опыта разница в гидравлическом сопротивлении становится близкой к нулю.

В зависимости от  $Re_{ж}$  в контактном элементе имеют место два режима движения (рис. 6). В обоих случаях с увеличением  $Re_{ж}$  величина критерия Эйлера растёт.

$$\text{При } Re_{ж} \leq 1000 \text{ получено } Eu \sim Re_{ж}^{0,3} \tag{14}$$

$$\text{и при } Re_{ж} > 1000 \text{ — } Eu \sim Re_{ж}^{0,42}. \tag{15}$$

Существенное влияние угла подъема винтовой линии статического закручивателя на величину гидравлического сопротивления (рис. 7) вполне объяснимо.

Ранее [4] было показано, что при равенстве осевых скоростей  $U_{01}=U_{02}$  соотношение между полными скоростями в винтовом канале равно

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{\sin \alpha_2}{\sin \alpha_1}. \tag{16}$$

Приняв обозначение  $\Gamma_1 = \frac{t}{d}$  и учитывая, что  $\text{tg } \alpha = \frac{t}{\pi d}$ , можно запи-

сать

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{\Gamma_{12} \sqrt{\pi^2 + \Gamma_{12}^2}}{\Gamma_{11} \sqrt{\pi^2 + \Gamma_{11}^2}}. \tag{17}$$

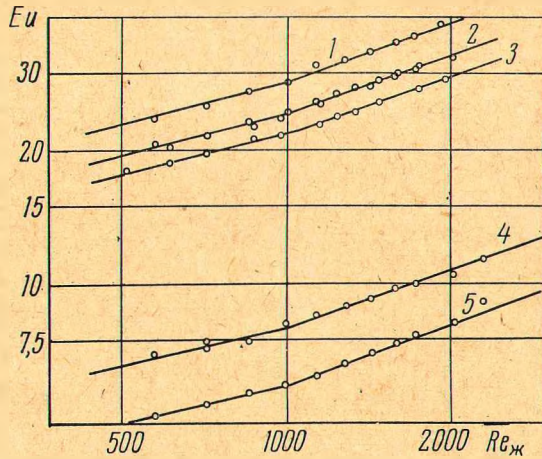


Рис. 6. Зависимость  $Eu$  от режима движения жидкости:

- |                       |          |                    |
|-----------------------|----------|--------------------|
| 1 — $\Gamma_1=1,12$ ; | $d_n=25$ | } восходящий поток |
| 2 — $\Gamma_1=1,10$ ; | $d_n=29$ |                    |
| 4 — $\Gamma_1=2,60$ ; | $d_n=25$ | } нисходящий поток |
| 3 — $\Gamma_1=1,10$ ; | $d_n=29$ |                    |
| 5 — $\Gamma_1=2,60$ ; | $d_n=25$ |                    |

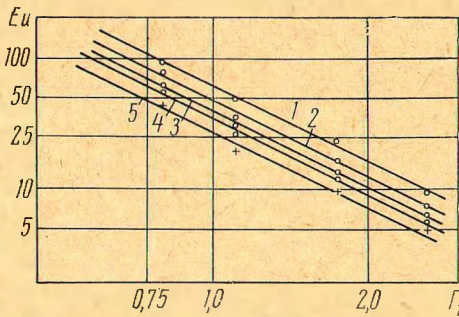


Рис. 7. Зависимость  $Eu$  от геометрической характеристики  $\Gamma_1$ :

- |                  |               |                    |
|------------------|---------------|--------------------|
| 1 — $U_0=7,3$ ;  | $Re_{ж}=1420$ | } восходящий поток |
| 3 — $U_0=11,5$ ; | $Re_{ж}=850$  |                    |
| 2 — $U_0=7,3$ ;  | $Re_{ж}=1420$ | } нисходящий поток |
| 4 — $U_0=11,5$ ; | $Re_{ж}=850$  |                    |
| 5 — $U_0=11,5$ ; | $Re_{ж}=574$  |                    |

Или при значениях  $\Gamma_1 \leq 1$

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{\Gamma_{1_2}}{\Gamma_{1_1}}, \tag{18}$$

так как

$$Eu = \frac{\Delta\rho}{\rho U_0^2}, \tag{18}$$

можно было предположить, что в результате экспериментов получится

$$Eu \sim \Gamma_1^{-2}. \tag{19}$$



Действительно, в интервале исследованных геометрических характеристик и режимов движения зависимость оказалась близкой к (19):

$$Eu \sim \Gamma_1^{-1,8}. \quad (20)$$

На основе экспериментальных данных для потока первого вида получены уравнения для расчета гидравлического сопротивления контактного элемента:

нисходящий погонк при  $500 < Re_{ж} < 1000$

$$Eu = 115 Re_{\Gamma}^{-0,35} Re_{ж}^{0,3} \Gamma_1^{-1,8}; \quad (21)$$

при  $Re_{ж} > 1000$

$$Eu = 48 Re_{\Gamma}^{-0,35} Re_{ж}^{0,42} \Gamma_1^{-1,8}; \quad (22)$$

восходящий поток при  $500 < Re_{ж} < 1000$

$$Eu = 515 Re_{\Gamma}^{-0,5} Re_{ж}^{0,3} \Gamma_1^{-1,8}; \quad (23)$$

при  $Re_{ж} > 1000$

$$Eu = 230 Re_{\Gamma}^{-0,5} Re_{ж}^{0,42} \Gamma_1^{-1,8}. \quad (24)$$

Совместное решение уравнений для одинаковых режимов движения жидкости позволяет найти область значений  $Re_{\Gamma}$ , в которой сопротивление восходящего и нисходящего потоков становится одинаковым.

При  $500 < Re_{ж} < 1000$

$$\frac{Eu_n}{Eu_b} = \frac{115 Re_{\Gamma}^{-0,35} Re_{ж}^{0,3} \Gamma_1^{-1,8}}{515 Re_{\Gamma}^{-0,5} Re_{ж}^{0,3} \Gamma_1^{-1,8}} = 0,2234 Re_{\Gamma}^{0,15}. \quad (25)$$

При  $\frac{Eu_n}{Eu_b} = 1$  получим  $Re_{\Gamma} = 10^{4,35} = 22400$ .

Для случая  $Re_{ж} > 1000$

$$\frac{Eu_n}{Eu_b} = 0,209 Re_{\Gamma}^{0,15}, \quad (26)$$

откуда  $Re_{\Gamma} = 10^{4,528} = 33800$ .

Эти значения удовлетворительно согласуются с графическими зависимостями (см. рис. 5).

**Закрученный поток второго вида.** Как показали опыты, гидродинамическая обстановка в контактном патрубке при установке закручивателя только на начальном участке принципиально отличается от таковой для потока первого вида из-за образования при сравнительно небольших значениях  $Re_{\Gamma}$  автомодельного режима.

Нижней границей автомодельного режима для восходящего и нисходящего потоков является  $Re_{\Gamma_{кр}} = 17500 \div 17900$ .

Появление автомодельного режима в случае потока второго вида объясняется по-видимому развитием нестесненного турбулентного дви-

жения в объеме патрубка, свободного от статического закручивателя, при этом происходит некоторое перераспределение компонентов скорости движения.

Для обоих режимов движения получены следующие соотношения: восходящий поток при  $Re_{\Gamma} \leq 17800$

$$Eu \sim Re_{\Gamma}^{-0,44}, \quad (27)$$

при  $Re_{\Gamma} > 17800$

$$Eu \sim Re_{\Gamma}^{0,00}, \quad (28)$$

нисходящий поток при  $Re_{\Gamma} \leq 17800$

$$Eu \sim Re_{\Gamma}^{-0,36}, \quad (29)$$

при  $Re_{\Gamma} > 17800$

$$Eu \sim Re_{\Gamma}^{0,0}.$$

Характер влияния режима движения жидкой фазы на величину критерия Эйлера аналогичен как и для потока первого вида, но скорость увеличения  $Eu$  несколько меньшая и граница между режимами смещается до значения  $Re_{ж} \approx 1200$ :

при  $Re_{ж} \leq 1200$

$$Eu \sim Re_{ж}^{0,16}, \quad (30)$$

и при  $Re_{ж} > 1200$

$$Eu \sim Re_{ж}^{0,5}. \quad (31)$$

Обобщенные зависимости для закрученного потока второго вида, исследованного только для одного значения  $\Gamma_1 = 1,0$ , имеют вид:

восходящий поток

$$Re_{ж} \leq 1200, Re_{\Gamma} \leq 17800, Eu = 339 Re_{ж}^{0,16} Re_{\Gamma}^{-0,44}, \quad (32)$$

$$Re_{ж} \leq 1200, Re_{\Gamma} > 17800, Eu = 4,4 Re_{ж}^{0,16}, \quad (33)$$

$$Re_{ж} > 1200, Re_{\Gamma} \leq 17800, Eu = 31,25 Re_{ж}^{0,5} Re_{\Gamma}^{-0,44}, \quad (34)$$

$$Re_{ж} > 1200, Re_{\Gamma} > 17800, Eu = 0,4 Re_{ж}^{0,5}; \quad (35)$$

нисходящий поток

$$Re_{ж} \leq 1200, Re_{\Gamma} \leq 17800, Eu = 155 Re_{ж}^{0,16} Re_{\Gamma}^{-0,36}, \quad (36)$$

$$Re_{ж} \leq 1200, Re_{\Gamma} > 17800, Eu = 3,6 Re_{ж}^{0,16}, \quad (37)$$

$$Re_{ж} > 1200, Re_{\Gamma} \leq 17800, Eu = 11,7 Re_{ж}^{0,50} Re_{\Gamma}^{-0,36}, \quad (38)$$

$$Re_{ж} > 1200, Re_{\Gamma} > 17800, Eu = 0,338 Re_{ж}^{0,50}. \quad (39)$$



В интервале всех исследованных гидродинамических режимов как в случае восходящего, так и нисходящего закрученного потока гидравлическое сопротивление потока второго вида значительно ниже, чем при установке закручивателя по всей длине контактного патрубка.

Рациональным является также проведение технологических процессов при высоких скоростях газовой фазы и умеренной закрутке потока.

Эти положения, обоснованные с точки зрения интенсификации процессов и экономичности использования закрученного потока, легли в основу создания и исследования скоростного контактного аппарата с взаимодействием фаз в восходящем закрученном потоке [8, 9, 10].

### Выводы

1. Выполнено сравнительное исследование гидравлического сопротивления и интенсивности массоотдачи при взаимодействии фаз в закрученном потоке первого и второго видов.

2. Выяснен характер влияния гидродинамических и геометрических параметров на интенсивность переноса вещества и гидравлическое сопротивление.

3. Установлено, что наиболее целесообразным является использование закрученного восходящего потока второго вида.

Полученные соотношения для коэффициента массопередачи и критерия  $Ei$  соответствуют рассмотренной ранее физической модели процесса.

### Литература

- [1] А. И. Ершов, Л. М. Гухман. ИФЖ, 10, 4, 559 (1966). [2] Р. З. Алимов. ЖПХ, 35, 3, 524 (1962). [3] Б. М. Азизов, А. М. Николаев. Вест. техн. и эконом. информ. ГК хим. пром. при Госплане СССР, М., НИИТЭХИМ, 8 (1964). [4] Л. М. Гухман, А. И. Ершов. Настоящий сб., 127. [5] Правила № 27—54 по измерению и проверке расходомеров с нормальными диафрагмами, соплами, трубами Вентури. М., 1960. [6] Г. Шарло. Методы аналитической химии. М., 1966. [7] Н. А. Николаев. Канд. дисс. [8] Казань, 1965. [8] А. И. Ершов, И. М. Плехов. Авт. свид. № 182108. Бюлл. изобр., 11 (1966). [9] Л. М. Гухман, А. И. Ершов, И. М. Плехов. Изв. вузов. Энергетика, 5, 57—63 (1968). [10] Л. М. Гухман, А. И. Ершов, И. М. Плехов. Изв. вузов. Энергетика, 5, 84—91 (1969).