

УДК 66.02 : 532,529.5

ИССЛЕДОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИКИ ВОСХОДЯЩЕГО ДВУХФАЗНОГО ЗАКРУЧЕННОГО ПОТОКА

*Кандидат техн. наук А. И. ЕРШОВ, кандидат техн. наук Л. М. ГУХМАН,
инженер Е. С. БЛЯХЕР*

Белорусский технологический институт имени С. М. Кирова

С целью интенсификации процессов тепло- и массообмена в настоящее время разрабатываются и исследуются [1—6] конструкции скоростных контактных аппаратов с взаимодействием газожидкостных систем на отдельных тарелках в восходящем и нисходящем закрученных потоках. Основными рабочими элементами таких аппаратов являются цилиндрические патрубки, в которых происходит контакт фаз. Это позволяет при их исследовании и разработке методов расчета использовать принцип элементного моделирования.

Поскольку закрученный двухфазный поток может быть восходящим, нисходящим, с закруткой по всей длине контактного устройства или только на начальном участке, важно было на первой стадии выявить преимущество того или иного варианта по гидравлическому сопротивлению и интенсивности массопереноса. В процессе абсорбции труднорастворимого газа водой установлено [6], что по количеству передаваемого вещества в единицу времени с единицы объема, приходящегося на единицу затраченной энергии, наиболее экономичным является восходящий закрученный поток с закруткой на начальном участке.

Последнее обстоятельство побудило нас провести более широкое исследование по изучению влияния гидродинамических параметров и физических свойств обеих фаз на гидравлическое сопротивление контактных устройств.

Строгое аналитическое решение задачи для турбулентного двухфазного закрученного потока в трубах представляет пока значительные трудности. Поэтому определенный практический интерес представляет получение расчетной критериальной зависимости, позволяющей находить гидравлическое сопротивление элемента при работе на различных газожидкостных системах.

Преобразование уравнения Навье — Стокса, записанного для однофазного закрученного газового потока, методами теории подобия [7—9] приводит к уравнению вида

$$Eu = f(Re_r, \Gamma_1, \Gamma_2), \quad (1)$$

где $\Gamma_1 = \frac{t}{d}$ — симплекс подобия, учитывающий степень закрутки потока [9],

t и d — шаг и диаметр закручивателя;

$\Gamma_2 = \frac{l}{d}$ — симплекс, учитывающий потери энергии по длине патрубка.

Введение в канал жидкости вызывает увеличение касательных напряжений в несущем потоке газа и, следовательно, дополнительные гидравлические сопротивления, которые определяются главным образом линейной плотностью орошения, вязкостью, толщиной пленки, степенью закрутки потока и длиной канала [9].

Первые три параметра можно учесть введением критерия Рейнольдса, определяемого по уравнению

$$Re_{ж} = \frac{4L}{\nu_{ж}}. \quad (2)$$

Степень закрутки потока и относительная длина канала учитываются симплексами Γ_1 и Γ_2 в уравнении (1).

В критерии Рейнольдса для жидкости и газа входят молекулярные вязкости. В то же время в развитом турбулентном потоке влияние молекулярной вязкости на сопротивление должно быть значительно слабее и определенную роль начинает играть турбулентная вязкость. Эту особенность развитого вихревого течения целесообразно учитывать поправочным безразмерным отношением $\frac{\mu_{ж}}{\mu_{г}}$.

На границе раздела фаз существенное значение приобретает действие силы межфазного поверхностного натяжения, являющегося физической константой для данной системы жидкость — газ.

Поскольку для двухфазного закрученного потока определение истинной скорости движения фаз вызывает значительные трудности, то влияние поверхностного натяжения может быть учтено введением в уравнение ((1) критерия Вебера в виде

$$We = \frac{\sigma}{\rho g d^2}, \quad (3)$$

где σ — коэффициент поверхностного натяжения, н/м;

ρ — плотность жидкости, кг/м³;

d — диаметр патрубка, м.

Таким образом, для двухфазного закрученного потока при неизменных геометрических параметрах контактного элемента (угол подъема винтовой линии, диаметр и длина патрубка) зависимость (1) принимает вид

$$Eu = f_1 \left(Re_{г}; Re_{ж}; We; \frac{\mu_{ж}}{\mu_{г}} \right). \quad (4)$$

Получение зависимости в явном виде являлось главной задачей экспериментальных исследований. Схема установки и методика исследований подробно описаны в работе [9].

Принцип работы контактного элемента заключается в следующем. Поток газа, проходя входную трубку, увлекает из питающей камеры через кольцевую щель шириной около 1,5 мм жидкую фазу и сразу же попадает на лопасти статического винтового закручивателя, где происходит формирование двухфазного закрученного потока. В поле центробежных сил жидкость отбрасывается к стенке контактного патрубка и в виде турбулизованной пленки движется по спирали вверх. В верхней части контактного патрубка концентрично на глубину 5 мм введена выхлопная трубка меньшего диаметра, образуя кольцевой зазор около 1,5 мм. Жидкость, находящаяся у стенок патрубка, попадает в этот зазор и отводится в верхнюю приемную камеру. Газ через выхлопную трубку удаляется в атмосферу.

Для установления закономерностей влияния гидродинамической обстановки в контактном элементе, а также физических свойств обеих фаз на значения критерия Eu опыты ставились в широком диапазоне расходов

жидкости и газа и разных системах: воздух — вода; воздух — растворы глицерина в воде; воздух — растворы этилового спирта в воде; смесь (СО) с воздухом — вода. Основные физические характеристики фаз изменялись в следующих пределах: $\mu_{ж} = 0,80 \div 1,812 \text{ снз}$; $\sigma = (40,6 \div 71,03) \cdot 10^{-3} \text{ н/м}$; $\rho_{ж} = 968,6 \div 1065,7 \text{ кг/м}^3$; $\rho_{г} = 1,1637 \div 1,356 \text{ кг/м}^3$; $\mu_{г} = 0,017 \div 0,0188 \text{ снз}$

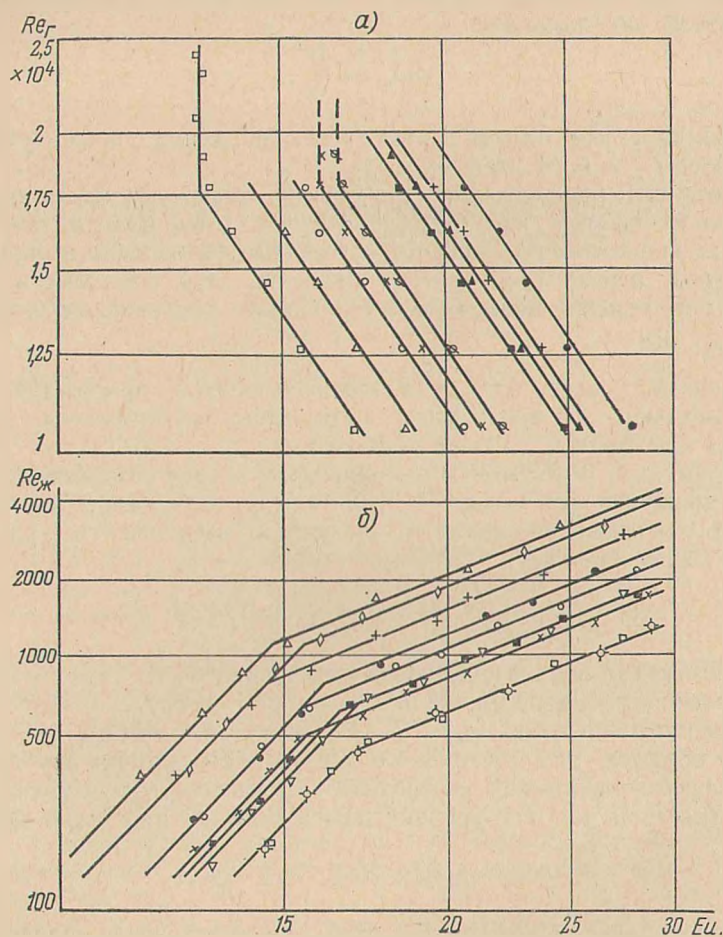


Рис. 1. Влияние режимов движения газовой и жидкой фаз на величину критерия Эйлера:

а — \circ — 29% р-р глицерина в воде, $Re_{Г} = 16\ 250$; \square — 20% р-р этил. спирта в воде, $Re_{Г} = 16\ 250$; ∇ — 20% р-р глицерина в воде, $Re_{Г} = 16\ 250$; \blacksquare — 10% р-р этил. спирта в воде, $Re_{Г} = 16\ 250$; \times — 29% р-р глицерина в воде, $Re_{Г} = 12\ 580$; \bullet — 10% р-р глицерина в воде, $Re_{Г} = 16\ 250$; \circ — 20% р-р глицерина в воде, $Re_{Г} = 12\ 580$; $+$ — 10% р-р глицерина в воде, $Re_{Г} = 12\ 580$; \diamond — вода, $Re_{Г} = 16\ 250$; \triangle — вода, $Re_{Г} = 12\ 580$;
 б — \bullet — 20% р-р глицерина в воде, $Re_{ж} = 1342$; $+$ — 20% р-р этил. спирта в воде, $Re_{ж} = 850$; \blacktriangle — 29% р-р глицерина в воде, $Re_{ж} = 747$; \blacksquare — 10% р-р глицерина в воде, $Re_{ж} = 1420$; \circ — 10% р-р этил. спирта в воде, $Re_{ж} = 850$; \times — 20% р-р глицерина в воде, $Re_{ж} = 778$; \circ — вода, $Re_{ж} = 1420$; \triangle — 10% р-р глицерина в воде, $Re_{ж} = 850$; \square — вода, $Re_{ж} = 850$

При обработке опытных данных установлено (рис. 1б), что с изменением расхода жидкости в контактном элементе имеют место два гидродинамических режима, наличие которых объясняется изменением степени турбу-

ленности в зависимости от $Re_{ж}$, а именно: во втором режиме наблюдалось частичное диспергирование газа в слой жидкости.

С увеличением $Re_{г}$ (рис. 1а) происходит значительное уменьшение критерия Эйлера и в ряде экспериментов наблюдался выход на автомодельный режим, т. е. когда Eu не зависит от режима движения газа.

С гидродинамической обстановкой в первом и втором режимах связано различное влияние поверхностного натяжения и поправочного отношения $\frac{\mu_{ж}}{\mu_{г}}$ на величину критерия Эйлера.

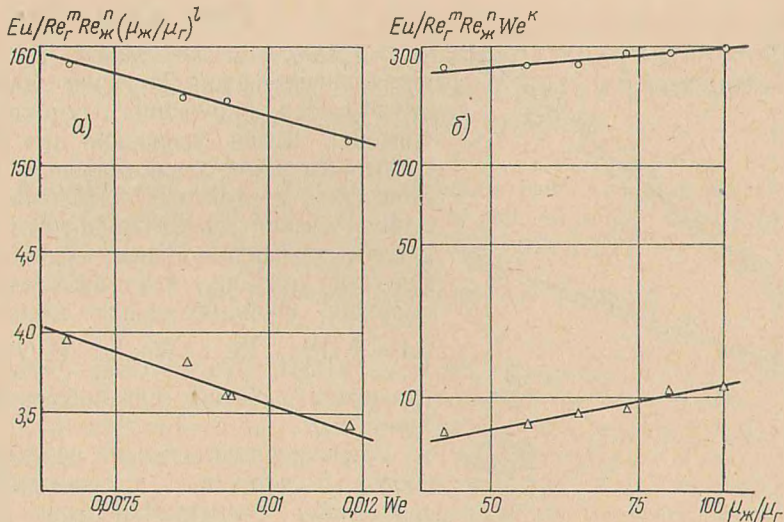


Рис. 2. Влияние физических свойств фаз на величину критерия Эйлера:

○ — I режим; △ — II режим

В первом режиме, когда имеет место сравнительно стабильная поверхность раздела фаз, влияние критерия We (рис. 2а) на величину Eu невелико.

Во втором же режиме, когда, по-видимому, большая часть энергии газа затрачивается на работу против сил поверхностного натяжения, влияние критерия Вебера более значительно.

Гораздо сложнее обстоит дело с учетом влияния вязкостей фаз на гидравлическое сопротивление контактного элемента (рис. 2б).

Поскольку в реальных условиях проведения массообменных процессов вязкость газа меняется в весьма узком интервале, то эксперименты ставились в основном при различной вязкости жидкости. Лишь узкая серия опытов была проведена при переменной вязкости газа, причем из-за ограниченной мощности установки эта серия выполнена лишь для первого режима.

Обработкой экспериментальных данных (рис. 1, 2) получены уравнения для каждого из режимов

$$Eu = 109 Re_{г}^{-0.44} Re_{ж}^{0.16} We^{-0.073} \left(\frac{\mu_{ж}}{\mu_{г}} \right)^{0.215} \quad \text{— I режим;} \quad (5)$$

$$Eu = 0,798 Re_{г}^{-0.44} Re_{ж}^{0.5} We^{-0.325} \left(\frac{\mu_{ж}}{\mu_{г}} \right)^{0.585} \quad \text{— II режим.} \quad (6)$$

Граница между режимами определяется из уравнения

$$Re_{жкр} = 2 \cdot 10^6 We^{0,742} \left(\frac{\mu_r}{\mu_ж} \right)^{1,087} \varphi, \quad (7)$$

где

$$\varphi = 0,032 Re_r^{0,37} - \quad (8)$$

поправка, учитывающая влияние режима движения газа на степень турбулизации жидкого слоя.

Сопоставление обобщенных уравнений (5) и (6) с опытными данными представлено на рис. 3.

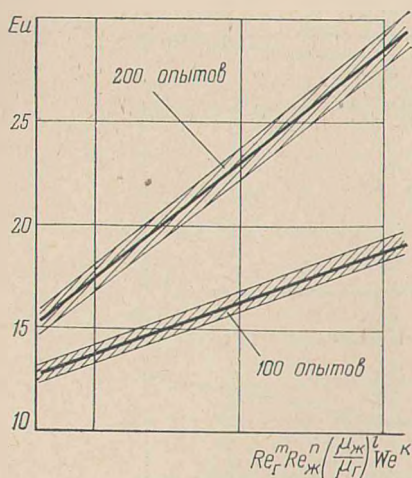


Рис. 3. Сопоставление обобщенных уравнений с опытными данными

ВЫВОДЫ

1. Ввиду чрезвычайной сложности гидродинамической картины движения двухфазного закрученного потока аналитический вывод уравнения для расчета гидравлического сопротивления цилиндрических контактных элементов представляет значительные трудности. Путем анализа уравнения Навье — Стокса и физической модели взаимодействия фаз получена функциональная зависимость $Eu = f \left(Re_r; Re_ж; We; \frac{\mu_ж}{\mu_r}; \Gamma_1; \Gamma_2 \right)$, учитывающая действие центробежных массовых сил.

2. Экспериментальные исследования позволили установить в явном виде критериальные зависимости для расчета гидравлического сопротивления контактных элементов при двух режимах взаимодействия фаз в восходящем закрученном потоке.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ершов А. И., Гухман Л. М. ИФЖ, т. 4, 1966, № 4.
2. Ершов А. И., Плехов И. М. Авт. свид. № 182108. «Бюлл. изобр.», 1966, № 11.
3. Киселев В. М. Авт. свид. № 203622. «Бюлл. изобр.», 1967, № 21.
4. Николаев Н. А. Автореф. канд. дисс. Казань, 1964.
5. British Chemical Engineering, т. 7, 1966.
6. Гухман Л. М., Ершов А. И. Сб. докл. III Всесоюзного совещ. по тепло- и массообмену, т. IV. Минск, 1968.
7. Делягин Т. Н. Автореф. канд. дисс., АН СССР, 1959.
8. Щукин В. К. Тр. КАИ, вып. 76, 1963.
9. Гухман Л. М. Автореф. канд. дисс., Минск, 1969.
10. Чен-Ше-Фу. Тр. американского об-ва инженеров-механиков. «Теплопередача», т. 80, сер. С, № 1, 1964.
11. Тагинцев Б. Г., Дильман В. В., Лейтес И. С. ЖВХО им. Д. И. Менделеева, № 4, 13, 1968.
12. Николаев Н. А., Жаворонков Н. М. «Хим. пром.», 1965, № 11.

Представлена кафедрой
процессов и аппаратов химических
производств

[17.XI.1969]