

УДК 66.02 : 532.529.5

## ИССЛЕДОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИКИ КОНТАКТНОЙ ТАРЕЛКИ С ВЗАИМОДЕЙСТВИЕМ ФАЗ В ВОСХОДЯЩЕМ ЗАКРУЧЕННОМ ПОТОКЕ

*Инженер Л. М. ГУХМАН, кандидат техн. наук доц. А. И. ЕРШОВ,  
кандидат техн. наук доц. И. М. ПЛЕХОВ*

*Белорусский технологический институт имени С. М. Кирова*

Современные темпы развития производств немислимы без исследования и разработки аппаратов, позволяющих осуществлять технологические процессы в скоростных режимах.

В процессах тепло- и массопередачи при взаимодействии газовой и жидкой фаз пошли по пути создания скоростного прямоточного движения газожидкостного потока на отдельных контактных элементах с последующим разделением фаз между ступенями. Были изучены гидродинамика и массопередача в режимах восходящего и нисходящего прямотока [1, 2]. Установлено, что в нисходящем прямотоке эффективность массопередачи выше при меньших энергетических затратах.

Еще большей эффективности взаимодействия газожидкостных систем можно достигнуть, сообщив фазам наряду с осевым и вращательное движение, т. е. создав двухфазный закрученный поток [3, 4].

Обзор литературы [5] показал, что большинство исследователей, по-видимому, по аналогии с прямоточным движением фаз, без экспериментальной проверки принимают нисходящий закрученный поток более эффективным, чем восходящий. На основании этого были созданы и конструкции контактных устройств с нисходящим движением фаз [3, 7].

Вместе с тем известно [3, 4], что эффективность взаимодействия фаз в закрученном потоке возрастает с увеличением крутки потока — отношения окружной скорости вращения к осевой. Следовательно, при создании рациональных конструкций контактных устройств необходимо стремиться к обеспечению максимальной крутки потока.

Авторами создана [6] и исследована конструкция скоростного аппарата (рис. 1) для проведения процессов тепло-массообмена с взаимодействием фаз в восходящем закрученном потоке. Аппарат состоит из корпуса 1, в котором установлены тарелки 2 с контактными элементами. Контактный элемент включает в себя цилиндрический патрубок 3, сливную трубку 4, оканчивающуюся закручивателем потока 5. В месте соединения сливной трубки и закручивателя имеются отверстия для выхода жидкой фазы.

Принцип действия аппарата заключается в следующем.

Газовая (паровая) фаза подается в аппарат снизу вверх. На входе в цилиндрические контактные патрубки закручиватели придают потоку вращательное движение. Жидкость с вышележащей тарелки по сливной трубке подается к выходным отверстиям над верхним срезом закручи-

вателя, подхватывается потоком газа, диспергируется и также приобретает вращательное движение.

Под действием центробежных сил жидкость отбрасывается к внутренней стенке патрубка и движется вверх в виде турбулизованной закрученной пленки. На всем пути до выхода из контактного патрубка при спиралеобразном движении двухфазного потока обеспечивается интенсивное

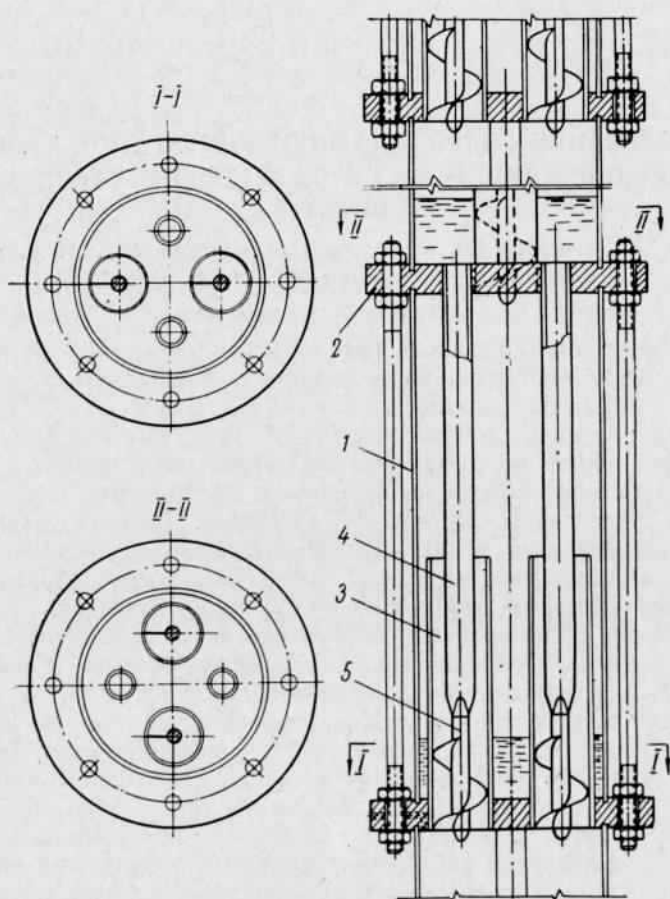


Рис. 1. Устройство скоростного колонного аппарата

взаимодействие газа и жидкости. Поднявшись до верхнего среза патрубка, жидкость под действием центробежных сил отбрасывается в межтрубное пространство, где теряет скорость, скапливается на тарелке и по сливным трубкам стекает на нижележащую ступень. Газ попадает в патрубки следующей по высоте тарелки.

Таким образом, при противотоке по аппарату в целом взаимодействие газожидкостной системы на отдельных ступенях происходит в восходящем закрученном потоке с последующим разделением фаз в центробежном поле.

Необходимым условием внедрения разрабатываемой скоростной аппаратуры в производство является комплексное исследование вопросов гидродинамики, тепло- и массообмена и разработка инженерных методов расчета.

В настоящей статье приводятся результаты исследования гидродинамики сухой и орошаемой модели скоростного тарельчатого аппарата.

Модель аппарата была выполнена из оргстекла и имела следующие геометрические размеры: внутренний диаметр колонны  $D = 78$  мм, внутренний диаметр контактных патрубков  $d_n = 25$  мм, расстояние между тарелками  $H = 200$  мм, наружный диаметр сливных трубок  $d_{сл} = 12$  мм. Контактные патрубки устанавливались длиной 50, 65, 75, 100, 125 и 150 мм.

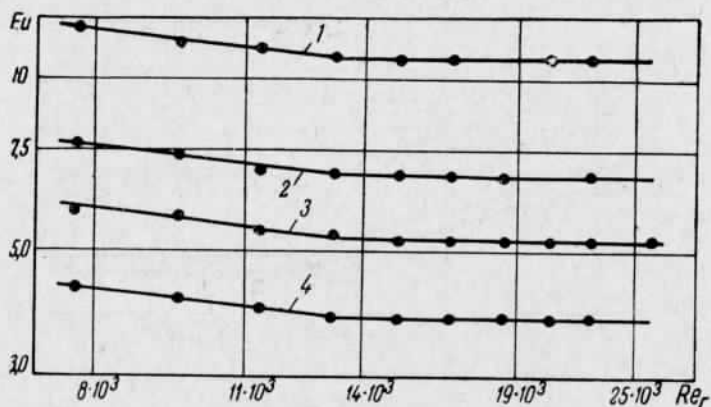


Рис. 2. Зависимость критерия  $Eu$  от  $Re_r$  для неорошаемой тарелки:  
1 —  $\Gamma_1 = 0,56$ ; 2 —  $\Gamma_1 = 0,80$ ; 3 —  $\Gamma_1 = 0,96$ ; 4 —  $\Gamma_1 = 1,12$

Влияние угла подъема винтовой линии и числа заходов винта изучалось на закручивателях, характеристика которых приведена в табл. 1.

Таблица 1

Шаг винтовой линии $t$ , мм	14	20	24	28	36	24	24	24
Число заходов $z$	1	1	1	1	1	2	3	4
Геометрический симплекс $\Gamma_1 = \frac{t}{d_n}$	0,56	0,8	0,96	1,12	1,44	0,96	0,96	0,96

Для создания различных гидродинамических режимов исследование проводилось в интервале скоростей газа в контактных патрубках от 9,0 до 27 м/сек и чисел Рейнольдса для жидкой фазы от 0 до 900. Температура потоков воздуха и воды до аппарата замерялась ртутными термометрами и изменялась на данном этапе исследования соответственно от 8 до 12°С и от 9 до 15°С. Физические константы — плотность газа, вязкость газа и жидкости — брались при средней для каждого опыта температуре. Сопротивление тарелки замерялось U-образными манометрами. Для контроля за показателями манометры имели различные точки подключения в поперечном сечении верхней и нижней тарелок.

При исследовании сухой, неорошаемой тарелки установлено наличие двух гидродинамических режимов (рис. 2).

При первом режиме — обозначим его  $A$  — с увеличением  $Re_r$  значение критерия  $Eu$  уменьшается. Сравнительно небольшой угол наклона графической зависимости  $Eu = f(Re_r)$  говорит о том, что имеет место турбу-

лентный режим с относительно малым влиянием молекулярной вязкости газа. Верхняя граница этого режима, независимо от характеристики закручивателя, соответствует  $Re_r \approx 13\,000$ .

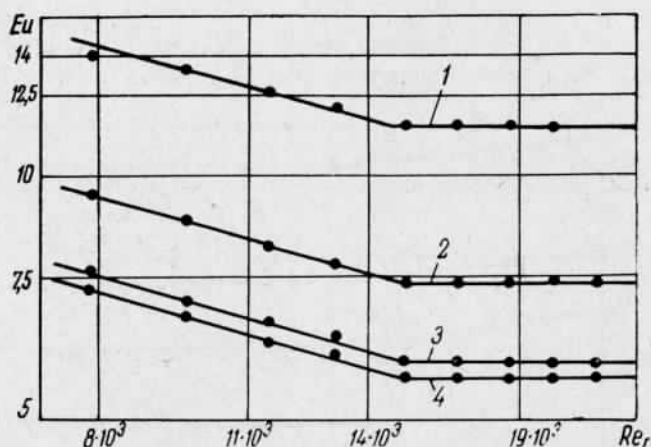


Рис. 3. Зависимость критерия  $Eu$  от  $Re_r$  для орошаемой тарелки:  
 1 —  $\Gamma_1 = 0,56$ ,  $Re_{ж} = 604$ ; 2 —  $\Gamma_1 = 0,80$ ,  $Re_{ж} = 604$ ; 3 —  $\Gamma_1 = 0,96$ ,  
 $Re_{ж} = 604$ ; 4 —  $\Gamma_1 = 0,96$ ,  $Re_{ж} = 317,5$

При втором режиме — обозначим его  $B$  — критерий  $Eu$  не зависит от  $Re_r$ , что характерно для развитого турбулентного режима движения потока.

Шаг винтовой линии закручивателя оказывает существенное влияние на сопротивление тарелки. Введя в качестве геометрической характеристики симплекс  $\Gamma_1 = \frac{t}{d_n}$ , который пропорционален тангенсу угла подъема винта, на основе опытных данных построили графическую зависимость критерия Эйлера от  $\Gamma_1$ .

Характер полученной зависимости может быть объяснен следующим образом.

При равном расходе газовой фазы для одного и того же диаметра контактных патрубков при установке закручивателей с различными шагами  $t_1$  и  $t_2$  средние осевые скорости газа равны. Окружные же скорости вращения газового потока будут тем больше, чем меньше шаг или аналогично симплекс  $\Gamma_1$ . Следовательно, энергия расширения сжатого до входа в колонну газа будет затрачиваться на увеличение скорости вращения тем больше, чем меньше шаг винтовой линии закручивателя.

Совместный анализ графических зависимостей (рис. 2, 3) и аналитический контроль опытных данных для однозаходных закручивателей приводит к уравнению

$$Eu = A_0 Re_r^{m_0} \Gamma_1^{l_0}, \quad (1)$$

где  $Re_r = \frac{\omega_r d_э}{\nu_r}$ ,  $d_э = d_n - d_{сл}$ .

Для гидродинамического режима  $A$

$$Eu = 41,0 Re_r^{-0,222} \Gamma_1^{-1,4}. \quad (2)$$

Для гидродинамического режима  $B$

$$Eu = 4,95 \Gamma_1^{-1,4}. \quad (3)$$

Показатель степени при  $Re_r$  в уравнении (2) достаточно близок к данным, полученным при исследовании гидродинамики однофазного потока в трубах с ленточными завихрителями [8], где для турбулентного режима приводится  $m_0 = -(0,28 \div 0,35)$ .

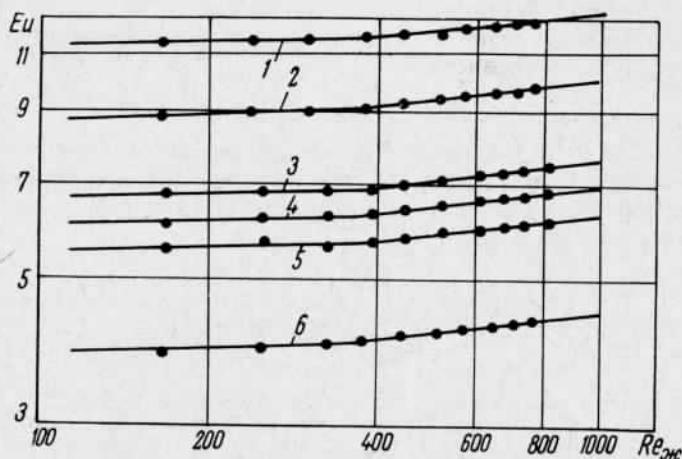


Рис. 4. Зависимость критерия  $Eu$  от  $Re_{ж}$ :

- 1 —  $\Gamma_1 = 0,56$ ,  $Re_r = 16,1 \cdot 10^3$ ,  $z = 1$ , 2 —  $\Gamma_1 = 0,96$ ,  $Re_r = 11,28 \cdot 10^3$ ,  $z = 4$ ,  
 3 —  $\Gamma_1 = 0,80$ ,  $Re_r = 16,1 \cdot 10^3$ ,  $z = 1$ , 4 —  $\Gamma_1 = 0,96$ ,  $Re_r = 19,25 \cdot 10^3$ ,  $z = 1$ ,  
 5 —  $\Gamma_1 = 0,96$ ,  $Re_r = 11,28 \cdot 10^3$ ,  $z = 1$ , 6 —  $\Gamma_1 = 1,44$ ,  $Re_r = 11,28 \cdot 10^3$ ,  $z = 1$ .

Потери напора при разной длине контактных патрубков практически не менялись, поэтому уравнения (2) и (3) с погрешностью не более 8,5% можно рекомендовать для расчета подобных аппаратов с длиной патрубков от 50 до 150 мм.

В случае применения закручивателей с числом заходов  $z = 2, 3, 4$  влияние  $Re_r$  совершенно аналогично, как и для однозаходных закручивателей. Однако с увеличением числа заходов при неизменном угле подъема винтовой линии сопротивление тарелки возрастает по абсолютной величине. Так, например, для сухой тарелки с однозаходными закручивателями в контактных патрубках шагом 24 мм сопротивление при  $\omega_r = 18,4$  м/сек составляет 223 мм вод. ст., а для двух-, трех- и четырехзаходных закручивателей — соответственно 241,5; 303; 347 мм вод. ст.

Исследование гидродинамики орошаемой тарелки показало, что при постоянной величине орошения и геометрического симплекса  $\Gamma_1$  в зависимости от  $Re_r$  имеются два гидродинамических режима (рис. 3).

Обозначим их соответственно  $C$  и  $D$ .

При гидродинамическом режиме  $C$  с увеличением  $Re_r$  критерий Эйлера уменьшается и это уменьшение идет заметнее, чем при аналогичном режиме для сухой тарелки. В результате верхняя граница режима смещается до значения  $Re_r \approx 14\,000$ .

Режим  $D$  характеризуется независимостью критерия  $Eu$  от  $Re_r$ , т. е. является автомодельным.

В свою очередь, при всех значениях  $Re_r$  и геометрического симплекса  $\Gamma_1$  с изменением величины  $Re_{ж}$  в контактных патрубках создаются два гидродинамических режима:  $E$  и  $F$  (рис. 4).

Для обоих режимов характерно увеличение критерия  $Eu$  с увеличением орошения. Отличие лишь в том, что в режиме  $E$  эта зависимость проявляется слабее, чем в режиме  $F$ .

Границы режимов следующие:

$$\text{режим } E \quad 150 < \text{Re}_ж \leq 320;$$

$$\text{режим } F \quad 320 < \text{Re}_ж < 900.$$

Таким образом, в зависимости от расхода газовой и жидкой фаз возможны четыре гидродинамических режима:  $C + E$ ;  $C + F$ ;  $D + E$  и  $D + F$ .

Обработка опытных данных для однозаходных закручивателей позволила получить общее уравнение вида

$$\text{Eu} = A \text{Re}_г^m \text{Re}_ж^n \Gamma_1^l \quad (4)$$

В зависимости от гидродинамического режима в контактных патрубках, который определяется величиной критерия Рейнольдса для жидкой и газовой фаз, показатели степени и коэффициент пропорциональности имеют значения, приведенные в табл. 2.

Таблица 2

Режим	Границы режима		$m$	$n$
	$\text{Re}_г$	$\text{Re}_ж$		
$C + E$	$7,5 \cdot 10^3 < \text{Re}_г \leq 14 \cdot 10^3$	$150 < \text{Re}_ж < 320$	-0,388	0,03
$C + F$	$7,5 \cdot 10^3 < \text{Re}_г \leq 14 \cdot 10^3$	$320 < \text{Re}_ж < 900$	-0,388	0,09
$D + E$	$14 \cdot 10^3 < \text{Re}_г < 23 \cdot 10^3$	$150 < \text{Re}_ж < 320$	0,0	0,03
$D + F$	$14 \cdot 10^3 < \text{Re}_г < 23 \cdot 10^3$	$320 < \text{Re}_ж < 900$	0,0	0,09

Режим	$l$	$A$	Уравнение (4)
$C + E$	-1,2	135	$\text{Eu} = 135 \text{Re}_г^{-0,388} \text{Re}_ж^{0,03} \Gamma_1^{-1,2}$
$C + F$	-1,2	185	$\text{Eu} = 185 \text{Re}_г^{-0,388} \text{Re}_ж^{0,09} \Gamma_1^{-1,2}$
$D + E$	-1,2	3,5	$\text{Eu} = 3,5 \text{Re}_ж^{0,03} \Gamma_1^{-1,2}$
$D + F$	-1,2	4,6	$\text{Eu} = 4,6 \text{Re}_ж^{0,09} \Gamma_1^{-1,2}$

При обработке опытных данных критерий Рейнольдса для жидкой фазы рассчитывался по формуле

$$\text{Re}_ж = \frac{4L}{\nu_ж},$$

где  $L$  — величина орошения на единицу длины периметра контактных патрубков.

Сопоставление экспериментальных данных (точки) со значениями, вычисленными по уравнению (4) для контактных устройств с различными геометрическими параметрами, представлено на рис. 5.

Как видно из графика, получено достаточно точное соответствие опытных данных расчетному уравнению (4).

Гидравлическое сопротивление исследованной контактной тарелки оказалось выше по сравнению с известными барботажными тарелками. Однако



ранее установлено [4, 5], что с точки зрения энергетического использования закрученные потоки дают выигрыш в теплообмене на 60—73% по сравнению с незакрученным потоком при одинаковой затрате мощности. Следует также отметить, что гидравлическое сопротивление нашей контактной тарелки и тарелки с взаимодействием фаз в нисходящем закрученном потоке [9] при близких геометрических характеристиках и прочих равных условиях практически одинаковы.

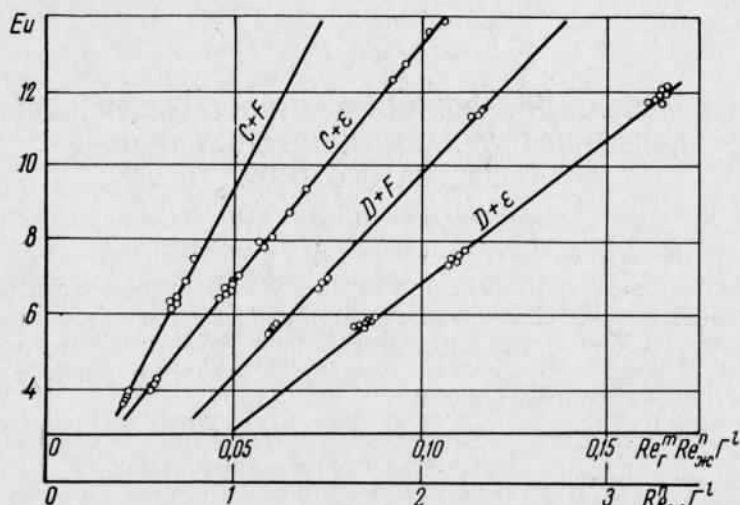


Рис. 5. Сопоставление экспериментальных данных (точки) со значениями, вычисленными по уравнению (4)

### ВЫВОДЫ

1. Разработана конструкция скоростного тарельчатого аппарата для проведения процессов тепло- и массообмена с взаимодействием фаз в восходящем закрученном потоке.

2. Исследована гидродинамика сухой и орошаемой контактной тарелки в интервале скоростей газа в контактных патрубках от 9,0 до 25 м/сек и режимах орошения  $Re_{ж} = 0 \div 900$ .

3. Установлено наличие двух гидродинамических режимов на неорошаемой тарелке и четырех режимов на орошаемой.

4. Выяснено влияние угла подъема винтовой линии закручивателей на гидравлическое сопротивление тарелки.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Семенов П. А. ЖТФ, 14, вып. 7—8, 1944.
2. Конобеев Б. И., Малюсов В. А., Жаворонков Н. М. «Химическая промышленность» № 7, 1961.
3. Алимов Р. З. «Теплоэнергетика» № 3, 1965.
4. Ермолин В. К. «Изв. АН СССР», ОТН. Энергетика и автоматика, № 1, 1960.
5. Ершов А. И., Гухман Л. М. ИФЖ, т. X, 4, 1966.
6. Ершов А. И., Плехов И. М. Авт. свид. № 182 108. «Бюлл. изобр.» № 11, 1966.
7. Николаев Н. А., Жаворонков Н. М. Тр. Казанского химико-технологич. ин-та, вып. XXXII, 1964.
8. Щукин В. К. ИФЖ, т. XI, 2, 1966.
9. Николаев Н. А. Автореф. канд. дисс. Казань, 1965.