

ИССЛЕДОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИКИ ДВУХФАЗНОГО ЗАКРУЧЕННОГО ПОТОКА В ВЕРТИКАЛЬНЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ КОНТАКТНЫХ УСТРОЙСТВАХ

Results of experimental researches of the mechanism of interaction of gas and liquid in the biphase twirled stream, and also influences of account parameters on an overall performance of contact devices and their geometrical sizes are carried out.

Введение. Как известно [1–3], одним из эффективных гидродинамических способов интенсификации процессов тепло- и массопереноса является использование в контактных устройствах закрученного движения газа (пара) и жидкости. В целом ряде разработанных авторами конструкций аппаратов [4–8] взаимодействие фаз происходит в закрученном потоке, создаваемом внутри вертикальных труб или цилиндрических патрубков с помощью статических завихрителей разного типа: шнеков, многолопастных розеток и тангенциальных каналов. При наличии вращательного движения жидкая фаза под действием центробежных сил смещается к внутренним стенкам контактных устройств и перемещается по ним в виде кольцевой пленки, взаимодействуя с газом. При этом на любой выделенный элемент поверхности пленки со стороны потока газа действует сдвигающее касательное напряжение, направленное вверх. И если сила трения оказывается меньше силы тяжести выделенного кольцевого элемента, то жидкая пленка стекает вниз и происходит противоточное движение фаз в контактной зоне. С увеличением расхода газа касательные напряжения на границе раздела возрастают и, как следствие, скорость стекания пленки замедляется. Одновременно касательные напряжения по толщине самой пленки уменьшаются в направлении от оси к стенке и становятся равными нулю на ее поверхности при достижении определенной скорости газа, соответствующей моменту инверсии и последующему однонаправленному движению фаз.

Таким образом, гидродинамические особенности газожидкостного закрученного потока и интенсивность взаимодействия фаз внутри его во многом определяются структурой и режимом движения газа, а также геометрией контактных устройств.

Основная часть. Из-за большого разнообразия перерабатываемых сред и условий проведения процессов в химической технологии с участием авторов разработаны тепло- и массообменные аппараты различного принципа действия: противоточные (рис. 1) и прямоточные (рис. 2, а, б, в). Необходимым условием их широкого применения в производстве является наличие информации и расчетных зависимо-

стей для определения оптимальных гидродинамических и конструктивных параметров. С этой целью на первоначальном этапе нами была исследована конструкция колонного противоточного аппарата с несколькими многолопастными закручивателями по высоте труб и получена расчетная зависимость для определения величины среднерасходной скорости газа, при которой происходит инверсия фаз:

$$-\lg \left[\frac{U_{\text{ср}}^2 \sin \alpha}{hg} \frac{\rho_{\text{г}}}{\rho_{\text{ж}}} \left(\frac{\mu_{\text{ж}}}{\mu_{\text{г}}} \right)^{0,16} \right] = \quad (1)$$

$$= 0,97 + 2,59 \left(\frac{L}{G} \right)^{1/4} \left(\frac{\rho_{\text{г}}}{\rho_{\text{ж}}} \right)^{1/8},$$

где $U_{\text{ср}}$ — среднерасходная скорость потока газа, м/с; α — угол наклона лопастей закручивателей к горизонтали, град.; h — расстояние между закручивателями по высоте трубы, м; g — ускорение свободного падения, м/с²; $\rho_{\text{г}}$, $\rho_{\text{ж}}$ — плотность газа и жидкости соответственно, кг/м³; $\mu_{\text{г}}$, $\mu_{\text{ж}}$ — динамическая вязкость газа и жидкости соответственно, Па·с; G , L — массовые расходы газовой и жидкой фаз соответственно, кг/с.

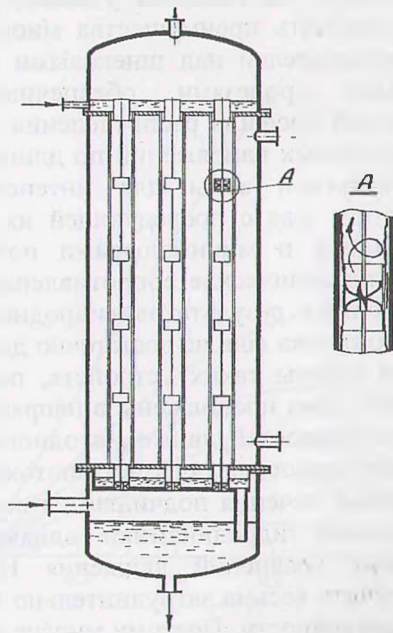


Рис. 1. Противоточный теплообменный аппарат

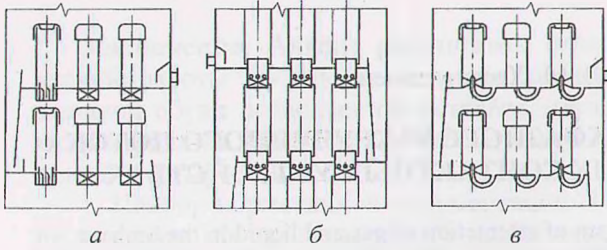


Рис. 2. Прямоточно-центробежные контактные устройства: *а* – с тангенциальными прорезями; *б* – шнековые закручиватели; *в* – многолопастные закручиватели

Как видим, величина среднерасходной скорости газа U_{cp} в момент инверсии движения фаз зависит не только от конструктивных и расходных параметров, но и от физико-химических свойств газа и жидкости. Ее значение следует принимать при расчете и проектировании максимально допустимой для противоточных и минимально возможной для прямоточно-центробежных контактных устройств.

Поскольку большинство современных предприятий химической и нефтеперерабатывающей промышленности являются крупнотоннажными, то в интересах уменьшения габаритов оборудования, а также ресурсо- и энергосбережения признано рациональным при оформлении тепло- и массообменных процессов применение скоростных контактных устройств, к числу которых относятся и прямоточно-центробежные (рис. 2, *а*, *б*, *в*). С целью изучения их оптимальной работы нами ранее проведены сравнительные исследования [9] структуры однофазного газового потока в вертикальных каналах со сменными статическими закручивателями на входном участке, позволившие установить преимущества многолопастных закручивателей над шнековыми и тангенциальными прорезями, обеспечивающих благоприятный профиль распределения скоростей и касательных напряжений по длине и сечению контактной зоны для интенсивного взаимодействия фаз с последующей их хорошей сепарацией и минимальными потерями напора на гидравлические сопротивления. Однако полученных результатов гидродинамики однофазного потока еще не достаточно для полной оценки работы таких устройств, поэтому исследования нами продолжены в направлении изучения особенностей движения однонаправленного закрученного двухфазного потока.

Двухфазные течения подчиняются всем основным законам гидродинамики, однако точные решения уравнений движения Навье – Стокса получить весьма затруднительно вследствие их нелинейности. Поэтому многие исследователи при получении инженерных расчетных зависимостей используют аналитические модели, в том числе отдельного и гомогенного

течений, в основу которых положены определенные допущения, приводящие к заметному упрощению общих уравнений движения двухфазных потоков.

Чтобы принять модель отдельного течения за рабочую, нам потребовалось проведение дополнительных исследований структуры газового ядра потока, и лабораторную установку, на которой выполнялись опыты в однофазном потоке [9], пришлось модернизировать (рис. 3).

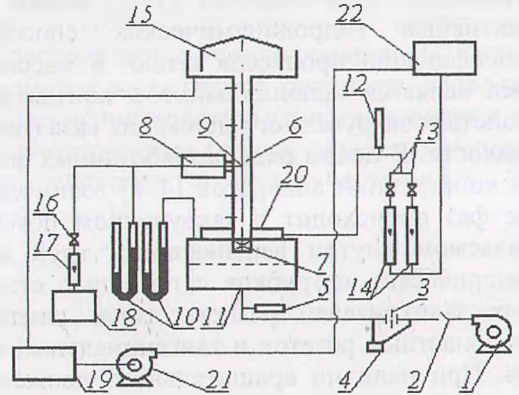


Рис. 3. Схема экспериментальной установки

Для формирования двухфазного восходящего закрученного течения в вертикальной трубе *б* диаметром 70 мм на ее начальном участке внутри устанавливался статический многолопастный завихритель с углом наклона лопаток к горизонтали 30° , снаружи – кольцевая камера для жидкости *20*, а на верхнем срезе – сепаратор *15*. Во время опытов жидкость из сливного бака *19* центробежным насосом *21* подавалась в напорный бак *22*, откуда она сливалась в камеру *20*, из которой через кольцевую щель в стенке поступала в зону контакта. Воздух газодувкой *1* через приемную камеру *11* направлялся в трубу *б* и с помощью завихрителя *7* приобретал наряду с осевым вращательное движение. При этом жидкость увлекалась газовым потоком и в виде пленки двигалась вверх по внутренней стенке трубы под действием касательных напряжений со стороны газа. После разделения фаз в сепараторе *15* жидкость поступала в сливной бак *19*, а газ выбрасывался в атмосферу. Температура и расход жидкости контролировались термометром *12*, кранами *13*, ротаметрами *14* марки РС-5 и РС-7. Расход воздуха регулировался заслонкой *2* и измерялся диафрагмой *3* в паре с дифманометром *4*, а температура фиксировалась термометром *5*. При проведении опытов среднерасходная скорость газа в трубе изменялась от 10 до 30 м/с, а плотность орошения $q = 0,35-1,05 \text{ м}^3/(\text{м}\cdot\text{ч})$.

Предварительные визуальные наблюдения позволили установить, что поверхность пленки в зоне контакта покрыта сложной системой волн, амплитуда которых в несколько раз мо-

жет превышать ее минимальную толщину. Газовый поток, двигаясь вдоль волновой поверхности, приводит к деформации крупных волн и срыву капель, которые увлекаются ядром потока, но под действием центробежных сил снова возвращаются обратно. В результате этого изокINETический датчик, использованный нами при измерении трения и касательных напряжений в однофазном потоке, оказался мало пригодным из-за непостоянства статического давления по сечению трубы. В данном случае была использована методика отдельных замеров углов направления вектора полной скорости и давлений датчиком-угломером со скошенными кромками и пневмометрическими трубками 8, 9. Поскольку жидкие капли периодически забивали каналы датчиков, то через каждые 20 с они продувались компрессором 18 посредством двухходового крана 16, с замером расхода воздуха ротаметром 17 и дифманометрами 10. Снятие показаний проводилось в 6 сечениях по высоте трубы и до 5–6 раз в каждой точке, что значительно увеличивало трудоемкость экспериментов.

По измеренным данным угла направления потока φ , полного P_n и статического $P_{ст}$ давлений, а также температуры воздуха определялись значения среднего полного давления $P_{п,ср}$, среднерасходной $U_{ср}$, осевой U_z и тангенциальной U_φ скоростей по следующим формулам:

$$P_{п,ср} = 2\pi \int_0^R P_0 r dr; \quad (2)$$

$$U_{ср} = 2\pi \int_0^R U r dr; \quad (3)$$

$$U_z = \sqrt{\frac{2(P_n - P_{ст})}{\rho}} \cos \varphi; \quad (4)$$

$$U_\varphi = \sqrt{\frac{2(P_n - P_{ст})}{\rho}} \sin \varphi. \quad (5)$$

Получаемые таким образом величины использовались для дальнейших расчетов на ЭВМ и графических построений профилей относительных скоростей в каждом сечении. На рис. 4 и 5 наглядно видна деформация профилей осевой и тангенциальной составляющих скорости газа по длине вертикальной трубы для разных плотностей орошений. Рассмотрение формы профилей показывает, что у тангенциальной составляющей U_φ в приосевой зоне имеет место область так называемого свободного вихревого течения, характер которого меняется, но не существенно по мере удаления от входного участка и изменения плотности орошения. Осевая же составляющая скорости U_z в этой зоне резко увеличивается с удалением от входа, а обратные токи исчезают уже при $l/d = 2,5$. Максимумы осевой и тангенциальной составляющих в пристенной зоне по мере удаления от закручивателя под действием касательных напряжений на поверхности раздела фаз уменьшаются по величине и сдвигаются к оси трубы. Наиболее заметная их деформация происходит на начальном участке при $l/d < 4,5$.

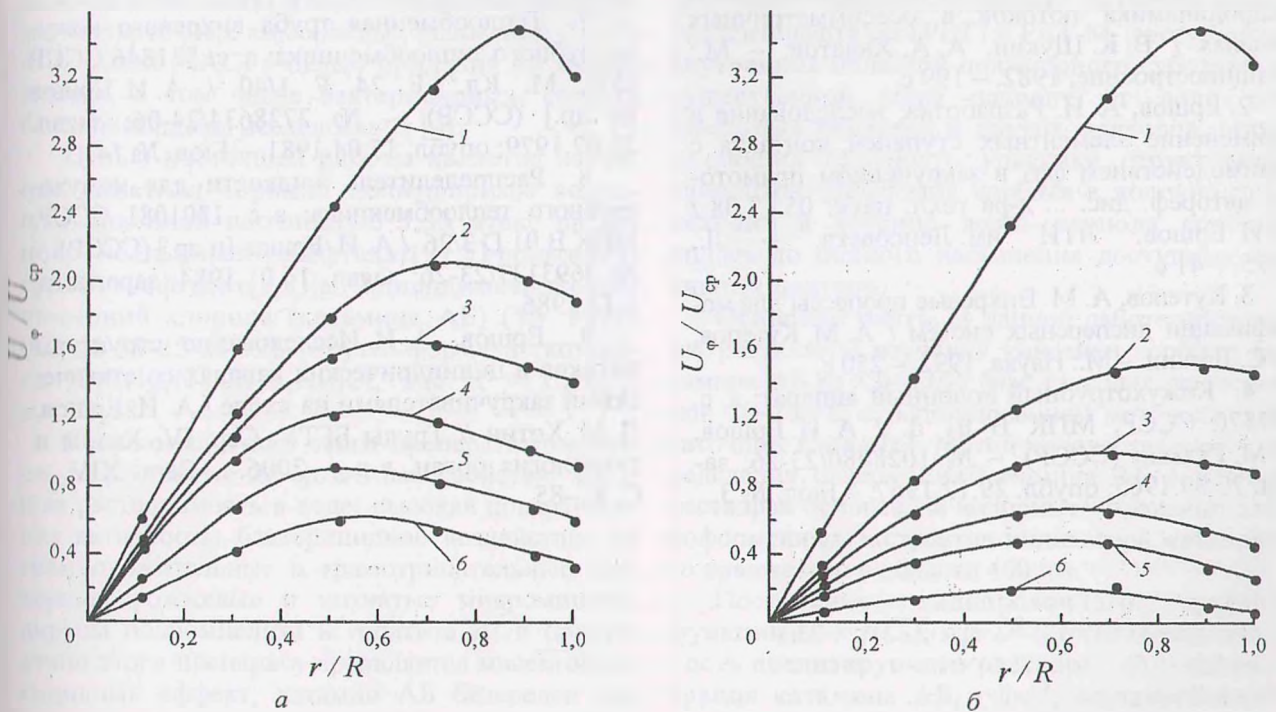


Рис. 4. Изменение профиля тангенциальной скорости по радиусу и длине трубы: а – при $q = 0,55 \text{ м}^3/(\text{м}\cdot\text{ч})$; б – при $q = 1,05 \text{ м}^3/(\text{м}\cdot\text{ч})$; 1 – $l/d = 0,1$; 2 – 2,5; 3 – 4,5; 4 – 8,5; 5 – 13,5; 6 – 19,5

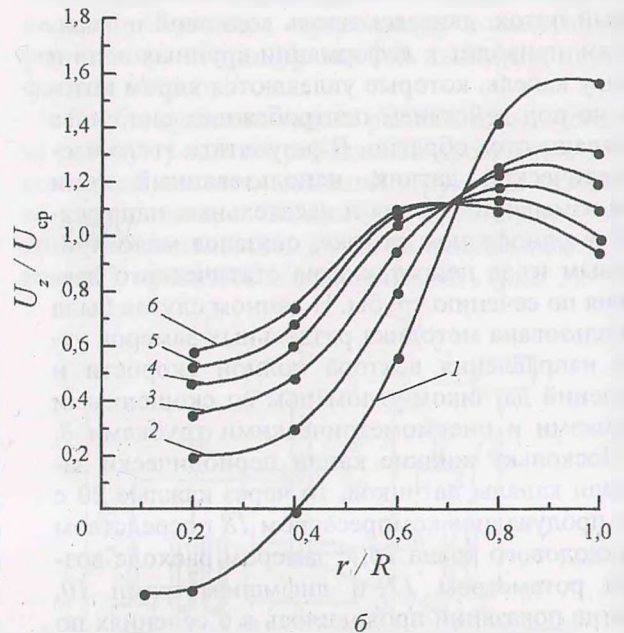
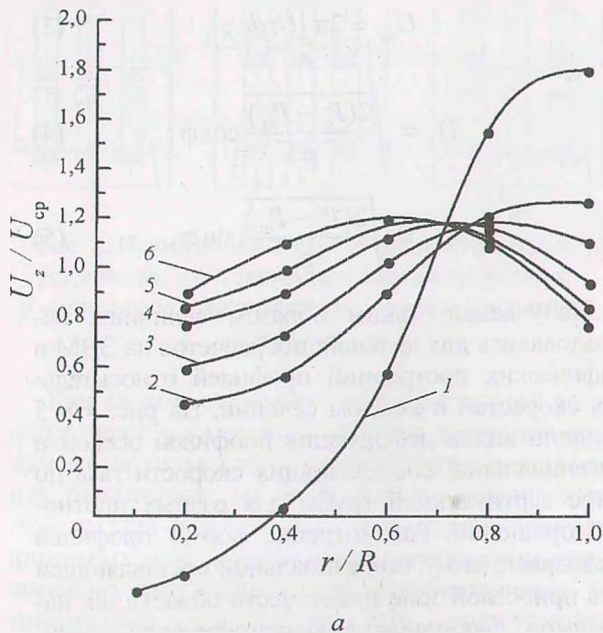


Рис. 5. Изменение профиля осевой скорости по радиусу и длине трубы: а – при $q = 0,55 \text{ м}^3/(\text{м}\cdot\text{ч})$; б – при $q = 1,05 \text{ м}^3/(\text{м}\cdot\text{ч})$; 1 – $l/d = 0,1$; 2 – 2,5; 3 – 4,5; 4 – 8,5; 5 – 13,5; 6 – 19,5

Заключение. Анализ полученных результатов по гидродинамике двухфазного потока показывает, что соотношение высоты к диаметру прямоточно-центробежных контактных устройств должно ограничиваться до $l/d \leq 3$ во избежание снижения интенсивности процессов тепло- и массообмена.

Литература

1. Шукин, В. К. Теплообмен, массообмен и гидродинамика потоков в осесимметричных каналах / В. К. Шукин, А. А. Халатов. – М.: Машиностроение, 1982. – 199 с.

2. Ершов, А. И. Разработка, исследование и применение элементарных ступеней контакта с взаимодействием фаз в закрученном прямоотке: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.17.08 / А. И. Ершов; ЛТИ им. Ленсовета. – Л., 1975. – 41 с.

3. Кутепов, А. М. Вихревые процессы для модификации дисперсных систем / А. М. Кутепов, А. С. Латкин. – М.: Наука, 1992. – 250 с.

4. Кожухотрубный колонный аппарат: а. с. 207870 СССР, МПК В 01 d. / А. И. Ершов, Л. М. Гухман (СССР). – № 1028080/23-26; заявл. 20.09.1965; опубл. 29.12.1967. – Бюл. № 3.

5. Контактная тарелка: а. с. 550161 СССР, М. Кл.² В 01 D. 3/26 / А. И. Ершов, И. М. Плехов, В. А. Малюсов (СССР). – № 2093483/26; заявл. 6.01.1975; опубл. 15.03.1977. – Бюл. № 10.

6. Массообменный аппарат для проведения процессов в системах газ (пар) – жидкость: а. с. 835455 СССР (51), М. Кл.³ В 01 D. 3/26 / В. А. Марков [и др.] (СССР). – № 2793649/23-26; заявл. 9.07.1979; опубл. 7.06.1981. – Бюл. № 21.

7. Теплообменная труба вихревого кожухотрубного теплообменника: а. с. 821846 СССР (51), М. Кл.³ F 24 F 1/40 / А. И. Ершов [и др.] (СССР). – № 2728634/24-06; заявл. 22.02.1979; опубл. 15.04.1981. – Бюл. № 14.

8. Распределитель жидкости для кожухотрубного теплообменника: а. с. 1301081 СССР, МПК В 01 D 3/26 / А. И. Ершов [и др.] (СССР). – № 3693137/23-26; заявл. 16.01.1984; зарегистр. 1.12.1986.

9. Ершов, А. И. Исследование структуры потоков в цилиндрических каналах со статическими закручивателями на входе / А. И. Ершов, Л. М. Хотин // Труды БГТУ. Сер. IV, Химия и технология орган. в-в. – 2006. – Вып. XIV. – С. 81–85.