

УДК 621.5.041

Трошин А.Г., Питак И.В.

## О РЕЖИМАХ ДВИЖЕНИЯ ЖИДКОЙ ФАЗЫ В РОТОРНОМ ВИХРЕВОМ МАССООБМЕННОМ АППАРАТЕ

Роторные массообменные аппараты являются высокоинтенсивными аппаратами, которые могут использоваться для проведения очистки газоздушных систем от пыли, абсорбции, проведения химических реакций газ-жидкость и других процессов [1].

Преимуществом вихревого роторного аппарата [2], по сравнению с центробежными аппаратами, является возможность получения хорошей гидродинамической обстановки для взаимодействия жидкой и твердой фазы при относительно небольшой частоте вращения ротора. Под этим понимается развитое вихревое движение газовой фазы с постоянным добавлением энергии от рабочего колеса, а также возможность осуществления многократных интенсивного диспергирования и коалесценции жидкой фазы, что, очевидно, должно способствовать течению процессов массообмена.

Данный вихревой аппарат представляет собой вихревой нагнетатель, имеющий устройство для подачи жидкой фазы в проточную часть.

Проведенные экспериментальные работы [3–4] подтвердили работоспособность и высокую эффективность аппарата. Однако, для дальнейшего развития конструкции аппарата и создания инженерных методик его расчета требуется теоретическое изучение гидродинамики газожидкостных потоков внутри аппарата.

Огромный объем работ по изучению движения газовой фазы в вихревых нагнетателях (компрессорах) освещен в [5,6]. Несмотря на то, что в этих работах производилось исследование относительно небольших и скоростных устройств (диаметр колеса обычно не более 0,2 м, окружная скорость свыше 50 м/с), основные закономерности движения газовой фазы будут сохраняться и для более крупных устройств типа вихревого массообменного аппарата.

Движение жидкой фазы внутри роторных вихревых аппаратов данного типа пока еще не достаточно изучено. Хотя, например, в [7] упоминалось об экспериментах с подачей жидкости в проточную часть вихревого компрессора. Однако, это делалось с целью охлаждения проточной части компрессора и рабочей среды во время сжатия. Как будет показано ниже, режим движения жидкости в аппарате сильно зависит от его размеров, и пренебрегать масштабным фактором при переходе от вихревых компрессоров к относительно крупным и тихоходным вихревым роторным массообменным аппаратам нельзя.

Целью настоящей статьи является разработка относительно простой модели движения жидкой фазы в роторном вихревом аппарате, интегрально учитывающей основные силовые факторы, действующие на пленку жидкой фазы на поверхности его проточной части и, на основании её, выбор предпочтительных режимов работы аппарата и путей совершенствования его конструкции.

Движение жидкой фазы принимаем как движение пленки по тороидальной поверхности проточной части под воздействием контактирующей с ней движущейся газовой фазы. Данное положение соответствует нашим экспериментальным наблюдениям с тем лишь замечанием, что основной объем жидкости движется в виде достаточно «толстой» турбулентной пленки.

Согласно [5] линии тока газовой фазы имеют спиралевидную форму и направлены от входного патрубка к выходному. Таким образом, газовая фаза по выходу из колеса имеет окружную составляющую (от входного патрубка к выходному) и меридиональную (рис. 1). Соотношение между окружной и меридиональной составляющей определяется так называемым коэффициентом расхода, равным отношению расхода газа через аппарат, к гипотетическому расходу, полученному при условии, что газ движется по проточной части равномерно со скоростью, равной окружной скорости рабочего колеса. Согласно нашим наблюдениям, при коэффициенте расхода порядка 0,3-0,4 данное соотношение порядка единицы, а уменьшение коэффициента расхода приводит к уменьшению окружной составляющей скорости газа.

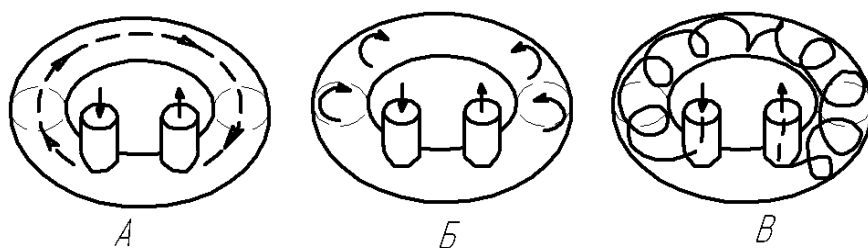


Рисунок 1

Рассмотрим движение элементарного объема пленки жидкой фазы по тороидальной поверхности проточной части аппарата как движение материальной точки под воздействием внешних сил.

Пусть  $dS$  поверхность элементарного объема, а  $h$  толщина пленки. Положение элемента пленки на поверхности тора со «средним» радиусом  $R$  и радиусом меридионального сечения  $r$  можно задать с помощью двух угловых координат:  $\psi$  - в окружном направлении,  $\varphi$  - в меридиональном сечении. В соответствии с принятой системой координат внешние силы мы будем раскладывать на два составляющих направления: окружное и меридиональное (рис. 2).

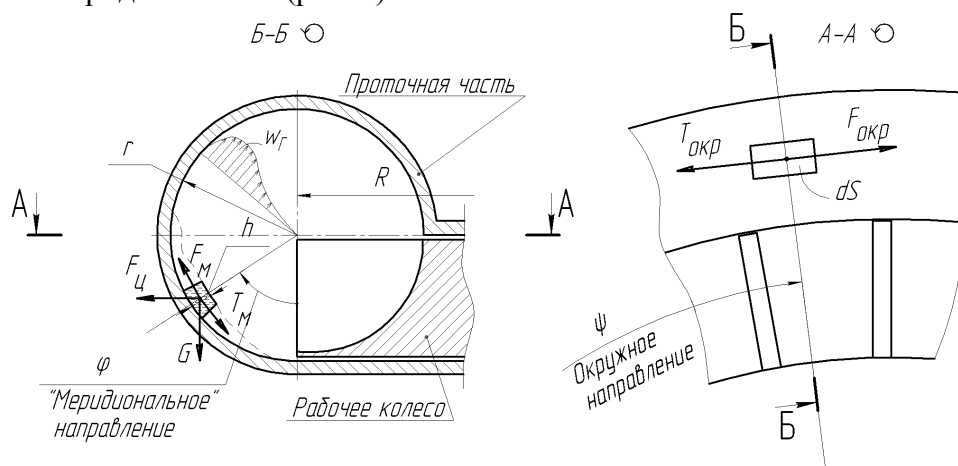


Рисунок 2 – Разрез проточной части роторного вихревого аппарата

Примем, что эпюры распределения скоростей газа  $w_r$  вдоль стенки проточной части в меридиональном сечении не зависят от угла  $\varphi$  (в пределах  $0 < \varphi < 1,5\pi$  и при-

близительно соответствуют рис. 2, а окружная составляющая движения газа не зависит от угла  $\psi$ .

Учитывая принятые допущения, на поверхность элемента пленки со стороны газа действует касательная сила, имеющая окружную составляющую:

$$F_{\text{окр}} = \tau_{\text{окр}} dS$$

и меридиональную:

$$F_{\text{м}} = \tau_{\text{м}} dS,$$

где  $\tau_{\text{окр}}$  и  $\tau_{\text{м}}$ , соответственно, окружная и меридиональная составляющие касательных напряжений на границе газ-жидкость. Примем, что касательные напряжения не зависят от скорости жидкости, поскольку её скорость на порядок меньше скорости газа.

При движении элемента пленки в окружном направлении со стороны стенки на него будет действовать сила вязкого трения. Для окружной составляющей силы трения:

$$T_{\text{окр}} = \lambda' \rho w_{\text{пл.окр}}^2 dS,$$

где  $\lambda'$  - коэффициент трения, соответствующий окружному направлению движения элемента пленки, зависящий от режима движения жидкости ( $\lambda \propto 1/Re$  в ламинарном режиме, а в турбулентном –  $\lambda \propto 1/Re^{0,25}$ );  $w_{\text{пл.окр}}$  - окружная составляющая скорости элемента пленки.

Аналогично, для меридионального направления:

$$T_{\text{м}} = \lambda'' \rho w_{\text{пл.м}}^2 dS,$$

где  $\lambda''$  - коэффициент трения, соответствующий меридиональному направлению движения элемента пленки;  $w_{\text{пл.м}}$  - меридиональная составляющая скорости элемента пленки, м/с.

Величина силы тяжести, действующая на элемент пленки, в проекции на меридиональное направление составляет:

$$G_{\text{м}} = \rho g h \cdot \sin \varphi \cdot dS,$$

где  $\rho$  – плотность жидкой фазы, кг/м<sup>3</sup>;  $g$  – ускорение свободного падения.

Проекция силы тяжести на окружное направление равна нулю (при вертикальном расположении оси вращения рабочего колеса).

При движении элемента пленки в окружном направлении на него действует центробежная сила. Её проекция на меридиональное направление:

$$F_{\text{ц.м}} = \frac{w_{\text{пл.окр}}^2}{R} \cdot \rho h \cos \varphi \cdot dS.$$

Проекция центробежной силы на окружное направление равна нулю.

Влиянием кориолисовых сил на движение элемента пленки пренебрегаем. Силы нормальной реакции со стороны стенки и нормального давления со стороны газа имеют нулевые проекции и на окружное, и на меридиональное направление.

Исходя из вышеизложенного, можно составить уравнения движения элемента пленки жидкости. Для окружного направления ( $dS$  сократили):

$$\rho h R \cdot \frac{d^2 \psi}{dt^2} = \tau_{\text{окр}} - \lambda' \rho w_{\text{пл.окр}}^2. \quad (1)$$

Аналогично для меридионального направления:

$$\rho h \cdot \frac{d^2 \varphi}{dt^2} = \tau_m - \rho g h \sin \varphi + \frac{w_{\text{пл.окр}}^2}{R} \cdot \rho h \cos \varphi - \lambda'' \rho \left( \frac{rd\varphi}{dt} \right)^2. \quad (2)$$

Дальнейший анализ этих уравнений будет направлен на поиск устойчивых режимов движения.

Примем установившийся режим движения жидкости в окружном направлении ( $\frac{d^2 \psi}{dt^2} = 0$  или  $w_{\text{пл.окр}} = \text{const}$ ). Это допущение основывается на том, что длина пути пленки воды многократно больше ее толщины, и на движение пленки большое воздействие оказывает вязкое трение, а также на том, что начальная скорость пленки, при  $\psi = 0$ , не равна нулю.

Тогда уравнение (1) будет выражать равновесие сил вязкого трения и касательных сил, действующих со стороны газовой фазы:

$$\tau_{\text{окр}} = \lambda' \rho w_{\text{пл.окр}}^2. \quad (3)$$

Анализ уравнения (2) можно начать с того, что принять к рассмотрению два варианта установившегося процесса: при преобладающем влиянии сил вязкости на движение пленки и преобладающем влиянии сил инерции.

Для первого случая можно будет пренебречь влиянием сил тяжести и центробежной силы. Кроме того,  $d^2 \varphi / dt^2$  тоже будет стремиться к нулю, так как скорость в данном случае быстро выйдет на постоянную величину (пренебрежение силами инерции). Тогда скорость движения пленки в меридиональном направлении будет постоянной и определяться соотношением напряжений на границе газ-жидкость и коэффициента вязкого трения:

$$\lambda'' \rho \cdot \frac{rd\varphi}{dt} = \tau_m. \quad (4)$$

Уравнения (3) и (4) описывают «вязкий» режим, назовем его первым. Этот режим может быть реализован при повышенной вязкости жидкой фазы, например, если она сильно загрязнена частицами уловленной пыли или если жидкая фаза – это вязкое поглотительное масло и т.п. Другим вариантом реализации этого режима будет работа с очень малым расходом жидкой фазы, когда на стенках образуется тонкая пленка жид-

кости. В обоих случаях жидкость будет двигаться по спиралеобразной траектории, повторяя пристенные потоки газа. Доходя до  $\varphi = 3\pi/2$ , пленка будет отрываться от поверхности тора и попадать на лопатки рабочего колеса. В виде брызг жидкая фаза попадет опять на поверхность тора. В случае с тонкой пленкой разбрызгивание жидкой фазы колесом, очевидно, будет неинтенсивным.

В случае преобладающего влияния сил инерции, пройдя через несколько циклов колебаний, под действием даже небольших сил вязкости система придет к установившемуся режиму с  $d^2\varphi/dt^2 = 0$  и  $d\varphi/dt = 0$ .

Обозначим соотношение меридиональных и окружных напряжений на границе газ-жидкость коэффициентом  $k_m = \tau_m / \tau_{окр}$ . Тогда, учитывая уравнение (3), можно переписать уравнение (2) для установившегося режима следующим образом:

$$k_m \lambda' \rho w_{пл.окр}^2 - \rho g h \sin \varphi + \frac{w_{пл.окр}^2}{R} \cdot \rho h \cos \varphi = 0. \quad (5)$$

В целях упрощения анализа принимаем в первом приближении:

$$\sin \varphi \approx \begin{cases} 2\varphi/\pi, & \text{при } 0 < \varphi < \pi/2 \\ -2\varphi/\pi + 2, & \text{при } \pi/2 < \varphi < \pi \end{cases} \quad (6)$$

$$\cos \varphi \approx -2\varphi/\pi + 1, \quad \text{при } 0 < \varphi < \pi.$$

Тогда на диапазоне  $0 < \varphi < \pi/2$  можно получить следующее решение:

$$k_m \lambda' \rho w_{пл.окр}^2 - \frac{2\varphi}{\pi} \cdot \rho g h + \frac{w_{пл.окр}^2}{R} \cdot \rho h - \frac{2\varphi}{\pi} \cdot \frac{w_{пл.окр}^2}{R} \cdot \rho h = 0;$$

$$\varphi = \frac{\pi}{2} \cdot \frac{k_m \lambda' \rho w_{пл.окр}^2 + \frac{w_{пл.окр}^2}{R} \cdot \rho h}{\rho g h + \frac{w_{пл.окр}^2}{R} \cdot \rho h} = \frac{\pi}{2} \cdot \frac{k_m \lambda' \frac{w_{пл.окр}^2}{gh} + \frac{w_{пл.окр}^2}{gR}}{1 + \frac{w_{пл.окр}^2}{gR}} = \frac{\pi}{2} \cdot \frac{Fr_m + Fr_{ц}}{1 + Fr_{ц}}. \quad (7)$$

В знаменатель уравнения (7) входит критерий Фруда, учитывающий соотношение центробежных сил, возникающих при окружном движении пленки, а в числителе, кроме того, критерий Фруда  $Fr_m$ , учитывающий соотношение меридиональных касательных напряжений, действующих со стороны газовой фазы (поскольку  $k_m \lambda' w_{пл.окр}^2 = \tau_m / \rho$ ). Анализ уравнения (7) показывает, что угол  $\varphi$  возрастает с увеличением  $Fr_{ц}$ , особенно при  $Fr_m$  порядка единицы, поскольку  $d\varphi/dFr_{ц} > 0$  при  $Fr_m < 1$  (в случае если  $Fr_m > 1$ ,  $\varphi$  станет больше чем  $\pi/2$ , что выходит за рассматриваемый предел).

Данный режим, «второй» может быть реализован в аппарате слишком больших размеров при слишком малой частоте вращения рабочего колеса. В этом случае доминирует сила тяжести, которая не позволяет пленке жидкой фазы подняться выше чем  $\varphi = \pi/2$ . Улавливание пыли при этом возможно только за счет инерционного механиз-

ма (удар потока газа, выходящего из рабочего колеса в участок стенки  $0 < \varphi < \pi/2$ ) и будет, по всей видимости, крайне неэффективным.

На участке  $\pi/2 < \varphi < \pi$ , с учетом (6) уравнение (5) запишется следующим образом:

$$k_m \lambda' \rho w_{\text{пл.окр}}^2 + 2\varphi \rho g h / \pi - 2 \cdot \rho g h + \frac{w_{\text{пл.окр}}^2}{R} \cdot \rho h - \frac{2\varphi}{\pi} \cdot \frac{w_{\text{пл.окр}}^2}{R} \cdot \rho h = 0;$$

$$\varphi = \frac{\pi}{2} \cdot \frac{k_m \lambda' \frac{w_{\text{пл.окр}}^2}{hg} + \frac{w_{\text{пл.окр}}^2}{Rg} - 2}{\frac{w_{\text{пл.окр}}^2}{Rg} - 1} = \frac{\pi}{2} \cdot \frac{Fr_m + Fr_{\text{ц}} - 2}{Fr_{\text{ц}} - 1}. \quad (8)$$

Как видно из (8), для того, чтобы угол  $\varphi$  стал больше, чем  $\pi/2$ , меридиональные силы со стороны газа должны превышать силы тяжести ( $Fr_m > 1$ ). Данный «третий» режим более интенсивный, чем второй, однако он имеет тот же недостаток: большая часть жидкости проходит по периферии проточной части аппарата, не попадая на лопатки. В наших экспериментальных исследованиях этот режим является основным для модели аппарата с размерами  $R \approx 0.2$  м,  $r \approx 0.1$  м. Угол составляет порядка  $\varphi \approx 2\pi/3$  при частоте вращения колеса 1500 об/мин. На практике третий режим всегда сопровождается тонкопленочным вязким течением жидкой фазы, срываемой с её основного потока по поверхности проточной части.

Увеличение  $\varphi$  свыше  $\pi$  и дальнейшая потеря устойчивого в смысле  $\varphi$  решения возможна, как видно, при  $Fr_m > Fr_{\text{ц}}$ . Этот режим, «четвертый», будет выражаться в том, что пленка жидкости будет подниматься в самую верхнюю точку  $\varphi = \pi$ , а затем продолжит свое движение до  $\varphi = 3\pi/2$ , после чего жидкая фаза попадет на лопатки рабочего колеса. На лопатках произойдет интенсивное разбрызгивание жидкости. Летящие брызги резко улучшат условия проведения процессов массообмена и пылеулавливания. Достаточно сказать, что поверхность брызг намного превысит поверхность проточной части аппарата.

Критерий, позволяющий определить возможность перехода к четвертому режиму, можно получить из упомянутого соотношения  $Fr_m > Fr_{\text{ц}}$ :

$$\frac{Fr_m}{Fr_{\text{ц}}} > 1 \Rightarrow \frac{k_m \lambda' R}{h} > 1 \quad (9)$$

Аппараты, удовлетворяющие условию (9), будут работать в четвертом, наиболее эффективном, режиме.

#### Выводы

1. Разработана математическая модель, описывающая движение жидкой фазы по внутренней поверхности проточной части вихревого роторного аппарата под воздействием движущейся газовой фазы.

2. Анализ полученных дифференциальных уравнений позволил выявить основные режимы движения жидкой фазы и охарактеризовать их с точки зрения эффективности проведения процессов массообмена и пылеулавливания.

3. Наиболее эффективным является режим, в котором жидкая фаза в турбулентном режиме движется в меридиональном направлении и попадает на лопатки рабочего колеса, где происходит ее разбрызгивание.

4. Предложен безразмерный критерий, позволяющий предсказать возможность осуществления данного, наиболее эффективного режима.

5. Необходимо провести экспериментальные исследования, с целью уточнения модели и её параметрической идентификации.

#### Литература

1. Страус В. Промышленная очистка газов: Пер. с англ. – М., Химия, 1981, 616с.
2. А.с. № 1604388, В 01 D 3/30 от 07.11.1988 г.
3. Пітак І.В., Моїсєєв В.Ф., Трошин О.Г., Васильєв М.І. Гідравлічна характеристика роторного вихрового апарату для очищення пило-газової суміші. Шоста міжнародна наукова конференція «Молодь у вирішенні регіональних та транскордонних проблем екологічної безпеки», м. Чернівці, 2007 р.
4. Питак И.В., Трошин А.Г., Моисеев В.Ф. Определение эффективности очистки газо-воздушного потока в роторном массообменном аппарате. Восточно-Европейский журнал передовых технологий 5/4 (29) 2007 г.
5. Виршубский И.М. и др. Вихревые компрессоры /И.М. Виршубский, Ф.С. Рекстин, А.Я. Шквар. – Л.: Машиностроение. Ленинградское отделение, 1988. – 271 с.
6. Хмара В.Н. Теория и расчет вихревых вакуумных компрессоров. – Учебное пособие по курсу «Динамические машины». – Москва, 1988 г.
7. Рыжов С.В., Куличенко В.А., Половец Ю.А. Увлажнение воздуха в судовых кондиционерах с помощью вентиляторов // Судостроение. 1972. № 7. с. 20–23.

УДК 621.5.041

Трошин О.Г., Пітак І.В.

#### **ПРО РЕЖИМИ РУХУ РІДКОЇ ФАЗИ У РОТОРНОМУ ВИХРОВОМУ МАСООБМІННОМУ АПАРАТІ**

У статті проведено дослідження гідродинаміки внутрішніх потоків рідкої та газової фази у роторному вихровому масообмінному апараті. Показана можливість існування різних режимів руху рідкої фази. Запропоновано безрозмірний критерій, який дозволяє визначити можливість роботи апарата у найефективнішому режимі з інтенсивним розпилуванням рідкої фази.