

где $M_{тр}$ - суммарный момент сил трения на стенках камеры.
Момент сил трения, входящий в (4), определялся из выражения

$$M_{тр} = TR_{ц},$$

где T - сила трения на стенках камеры.

Тогда дифференциал силы трения

$$dT = \tau_0 dF = \tau_0 2\pi R_{ц} dx.$$

Интегрируя выражения (1)-(3) в пределах от $x=-\delta$ до $x=L-\delta$, находим силу трения и момент сил трения на цилиндрических стенках камеры $M_{трц}$.

Расчет показал, что потери момента количества движения на трение при разных условиях входа и выхода воздуха составляют от 7 до 40%.

Л и т е р а т у р а

1. А б р а м о в и ч Н.Г., Б у х м а н М.А., У с т и - м е н к о Б.П. Исследование влияния условий входа на структуру течения и сопротивление циклонных камер. - В сб.: Проблемы теплоэнергетики и прикладной теплофизики. - Алма-Ата: Наука, вып. II, 1976, с. 27-31.
2. П р е с т о н Дж. Определение турбулентного поверхностного трения при помощи трубки Пито. - В сб.: Переводы иностр. период. литер. - Механика, 1955, № 6.
3. С е д о в Л.И. Механика сплошной среды. Ч. I. - М.: МГУ, 1968.

УДК 536.244+532.501

Е.Л.Каспин

ПРОЦЕССЫ ПЕРЕНОСА ПРИ ВИХРЕВОМ ДВИЖЕНИИ
ВО ВРАЩАЮЩЕЙСЯ ТРУБЕ

П р и н я т ы е о б о з н а ч е н и я

G_c - расход воздуха; G_m - расход жидкости в трубу;
 G_k - расход наружной охлаждающей жидкости; Re - осевое число

Рейнольдса, определяемое по газовой фазе; d - диаметр трубы; T_k - температура жидкости на входе во вращающуюся трубу; T - температура жидкости на выходе из вращающейся трубы; P - давление на входе трубы, определяемое по газовой фазе; T_c - температура наружной охлаждающей жидкости; V - окружная скорость на внутренней стенке канала.

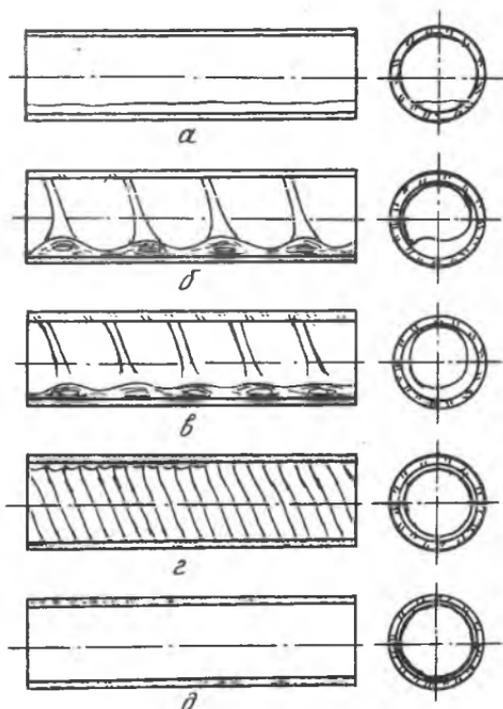
В работе [1] показано, что на поток, протекающий во вращающейся трубе, действует поле массовых сил, которое принципиальным образом влияет на сопротивление и турбулентный перенос, так как в одних случаях подавляет турбулентные возмущения, а в других - способствует возникновению вихрей Тейлора-Гертлера.

Как отмечается в обзорной статье [2], для обоснованного описания теплопередачи во вращающихся каналах в первую очередь необходимо определить физическую картину течения и данные о гидродинамических характеристиках, описывающих особенности течения.

В данной работе рассматриваются режимы течения двухфазного водо-воздушного потока во вращающейся относительно собственной оси горизонтально расположенной цилиндрической трубе и определяется качественный характер изменения гидравлического сопротивления газожидкостного потока в зависимости от скорости вращения трубы, соотношения фаз и их расходов.

Эксперименты проводились на технически гладкой стальной вращающейся трубе диаметром $d = 40$ мм и длиной $30d$, имеющей для возможности визуализации потока прозрачную цилиндрическую вставку длиной $15d$. Установка обеспечивала возможность плавного изменения окружной скорости на внутренней стенке трубы до $V = 12,5$ м/с, соосность и герметичность сочлененных через специальные уплотняющие устройства подвижных и неподвижных участков канала, а также отсутствие вибрации. Подача в систему воздуха и жидкой фазы осуществлялась по аналогии со схемой, описанной в работе [3]. Для визуализации и фотографирования течения двухфазного водо-воздушного потока в воду добавлялось красящее вещество.

В неподвижной горизонтальной трубе при умеренных расходах жидкости и газа наблюдалось расслоенное течение с длинными ламинарными волнами на поверхности жидкой фазы (рис. 1,а). С началом вращения трубы ламинарный режим течения пленки жидкости терял свою устойчивость и переходил в волновой режим с регулярно распо-



Р и с. 1. Режимы течения двухфазного газожидкостного потока во вращающейся относительно собственной оси горизонтально расположенной цилиндрической трубе в зависимости от V м/с; $G_m = 10^{-5}$ м³/с; $G_c = 14 \cdot 10^{-3}$ м³/с; $Re = 2,8 \cdot 10^4$; $d = 0,04$ м; $V = 0; 4,2; 6,3; 8,4; 10,5$ м/с (а, б, в, г, д соответственно)

ных вихрей, сопровождающееся снижением их высоты и уменьшением толщины слоя жидкости (рис. 1, г).

При окружной скорости, указанной на рис. 1, д, под воздействием значительной по величине центробежной силы вихревой характер течения кольцевого слоя жидкости подавлялся, и ее поверхность принимала гладкую форму.

Наблюдаемый эффект ламинаризации течения кольцевого слоя жидкости проявлялся только при вращении жидкости совместно с трубой.

ложенными макровихрями (рис. 1, б, здесь и далее рисунки показаны в сечении).

При этом под воздействием сил трения со стороны стенки во вращательное движение совместно с трубой увлекалась лишь небольшая часть жидкости, а основная оставалась в нижней части канала, приобретала сложное циркуляционное движение вокруг собственной продольной оси, параллельной оси трубы.

С увеличением скорости вращения трубы количество увлекаемой стенкой жидкости возрастало. Наблюдалось сближение вихрей, сопровождающееся снижением их высоты и уменьшением средней толщины пленки (рис. 1, в).

При повышенных оборотах вся подаваемая в трубу жидкость увлекалась стенкой канала и сравнительно равномерно распределялась по ее внутренней поверхности. Одновременно продолжалось дальнейшее сближение торидаль-

После быстрой остановки трубы продолжающееся по инерции вращательное движение кольцевого слоя жидкости вновь становилось вихревым, а его истечение из канала сопровождалось мощным кратковременным пульсирующим выбросом в осевом направлении.

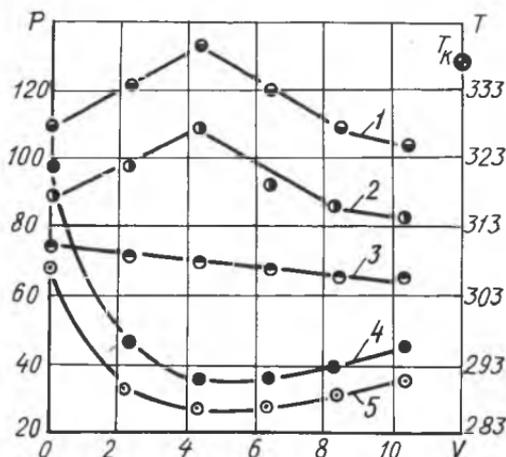
На рис. 2 показан характер изменения давления, определяемого по газовой фазе, на входе во вращающуюся трубу для нескольких режимов расхода жидкости и газа в зависимости от скорости вращения трубы.

Сопротивление системы при течении двухфазного потока (линии 1, 2) вначале возрастает до максимума, что, очевидно, происходит из-за образования на всей поверхности кольцевого слоя жидкости регулярно чередующихся тороидально-винтовых волн.

Этот рост происходит тем интенсивнее, чем больше расход жидкой фазы, определяющей одновременно толщину слоя и вихревой характер течения.

При дальнейшем увеличении окружной скорости канала сопротивление системы начинает уменьшаться вследствие превалирующей роли ламинаризации течения. В отличие от рассмотренного случая, при течении турбулентного однофазного потока во вращающемся канале (линия 3) гидравлическое сопротивление системы сразу существенно уменьшается, что согласуется с данными [4].

Качественно характер изменения сопротивления двухфазного газожидкостного потока в изучаемом случае сохранялся при числе Рей-



Р и с. 2. Характер изменения P н/м² двухфазного газожидкостного потока на входе во вращающуюся трубу и изменение T_k жидкости на входе из вращающейся трубы в зависимости от V м/с: 1 - $G_m = 2,5 \cdot 10^{-5}$ м³/с; $G_c = 14 \cdot 10^{-3}$ м³/с; 2 - $G_m = 14 \cdot 10^{-5}$ м³/с; $G_c = 14 \cdot 10^{-3}$ м³/с; 3 - $G_m = 0$, $G_c = 14 \cdot 10^{-3}$ м³/с; 4 - $G_m = 10^{-5}$ м³/с, $G_c = 0$, $G_c = 5 \cdot 10^{-5}$ м³/с, $T_k = 334,2$ К, $T_c = 277,6$ К; 5 - $G_m = 10^{-5}$ м³/с, $G_c = 14 \cdot 10^{-3}$ м³/с, $G_c = 5 \cdot 10^{-5}$ м³/с; $T_k = 334,2$ К, $T_c = 277,6$ К

нольдса, определяемых по расходной скорости газовой фазы, в диапазоне $Re = 10^4 - 5 \cdot 10^4$.

Очевидно, что водной режим течения вращающегося слоя жидкости с образующимися регулярно чередующимися тороидальными или спиральными вихрями сопровождается очень интенсивным перемешиванием пленки, что должно существенно интенсифицировать процессы переноса в изучаемой системе.

В качестве примера на рис. 2 показана зависимость охлаждения воды (начальная температура T_k), протекающей через вращающуюся трубу с подачей воздуха (линия 5) и без подачи воздуха (линия 4) от окружной скорости вращения трубы.

В этих экспериментах наружная поверхность трубы орошалась водой с неизменными расходом и температурой.

Приведенные экспериментальные данные показывают существенную интенсификацию теплопередачи от вращающейся совместно с трубой кольцевой пленки жидкости к стенке канала. Максимальная степень интенсификации теплопередачи совпадает с режимом наибольшей турбулизации пленки, что характеризуется некоторым увеличением гидравлического сопротивления двухфазного газожидкостного потока во вращающейся трубе.

Л и т е р а т у р а

1. Щ у к и н В.К. Теплообмен и гидродинамика внутренних потоков в полях массовых сил. - М.: Машиностроение, 1970.
2. П е т у х о в Б.С., П о л я к о в А.Ф. Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт, № 3, 1977, с. 116.
3. А л и м о в Р.З., К а с п и н Е.Л. - В сб.: Тепломассообмен-У. Т.4. - Минск, 1976, с. 118.
4. К а с ь я н о в В.М. Труды Московского нефтяного института. 1953, вып. 13, с. 145.