

УДК 532.529.5

**ВЛИЯНИЕ ЖИДКОСТИ НА СТРУКТУРУ ТУРБУЛЕНТНОГО ЗАКРУЧЕННОГО ГАЗОВОГО ПОТОКА В КОРОТКИХ ТРУБАХ***Инженер В. М. СОБИН, кандидат техн. наук, доц. А. И. ЕРШОВ**Белорусский технологический институт имени С. М. Кирова*

Двухфазные газожидкостные потоки широко используются в аппаратах для проведения процессов тепломассообмена.

Задачей дальнейших исследований является изыскание способов интенсификации этих процессов. Одним из таких способов является гидродинамическое воздействие с помощью закрутки потока.

При использовании статических закручителей только на входе в трубу крутка затухает, что приводит к уменьшению влияния закрутки потока по мере удаления от входа. Поэтому наиболее эффективно использовать короткие трубы, которые и применяются в конкретных конструкциях аппаратов [1—3].

Степень совершенства таких аппаратов зависит от характера взаимодействия фаз, определяемого режимом течения. При взаимодействии фаз складываются определенные профили скоростей, касательных напряжений и т. д.

Теоретически получить решение указанной задачи можно только в простейших случаях, а в реальных условиях не представляется возможным ввиду трудности постановки адекватных граничных условий взаимодействия. Экспериментальный путь изучения, таким образом, является весьма желательным, но не всегда возможным, так как измерение поля скоростей двухфазного потока сопряжено с большими трудностями. В литературе мало работ [4—7], посвященных исследованию поля скоростей в осевом двухфазном потоке, а по двухфазному закрученному потоку (газ — твердое) проведены исследования в циклонах и циклонных камерах [9, 10]. Однако характер течения закрученных потоков в циклонных устройствах и трубах, несмотря на некоторое сходство, существенно различен.

Как отмечается в работах [4—6], при введении жидкости профиль скорости газа изменяется от плоского, соответствующего турбулентному режиму течения, до заостренного, соответствующего ламинарному. В работе [7] также найдено, что значения константы пути перемешивания  $K$  заключены в интервале 0,1—0,2 (для однофазного течения  $K=0,4$ ). На основании этих данных в [8] делается вывод о том, что двухфазные течения соответствуют течению неньютоновской жидкости.

Структура двухфазного закрученного потока внешне сходна с кольцевым режимом течения осевого двухфазного потока: жидкость в виде пленки под действием касательного напряжения со стороны закрученно-

го газа перемещается по стенке, а газ — по центральной части трубы. С увеличением закрутки потока распределение жидкости по стенке становится все более и более равномерным. Если в осевом двухфазном потоке кольцевой режим наблюдается при небольших скоростях газа и жидкости, то в двухфазном закрученном потоке этот диапазон значительно шире.

На этом, собственно, и заканчивается сходство между двухфазными закрученным и осевым потоками. Под действием центробежных сил в закрученном потоке наблюдаются явления, которые полностью отсутствуют в осевом: градиент давления по радиусу, обратные токи, повышенные скорости у стенки, нелинейность профиля касательных напряжений и их увеличение и т. д. Все эти явления в итоге должны привести к существенному отклонению профиля скоростей газовой фазы в двухфазных закрученном и осевом потоках.

Целью настоящей работы является изучение влияния жидкости на структуру турбулентного закрученного газового потока. На первой стадии важно выяснить качественную сторону явления. Исследования проводились в трубе диаметром 51 мм на системе воздух — вода. Исследуемый элемент представлял собой короткую трубу относительной длины  $l/d=5$ . В качестве закручивателей использовались шесть тангенциальных щелей на начальном участке трубы высотой, равной диаметру, при соотношении суммарной площади щелей и площади сечения трубы (критерий крутки потока)  $n=1,0$ . Подача воды осуществлялась через кольцевую щель выше тангенциальных каналов.

Опыты проводились на лабораторной установке, схема которой представлена на рис. 1. Воздух, забираемый из помещения, и вода, поступающие соответственно через тангенциальные каналы и питатель 12, в трубе 1 образовывали двухфазный закрученный поток, который, пройдя трубу, попадал в сепарационную камеру 2. В сепарационной камере вода под действием центробежных сил и с помощью сепаратора 3 отделялась от воздуха и по трубопроводу 7 поступала в бак 8, далее центробежным насосом 9 через ресивер 10, ротаметр 11 опять подавалась в питатель 12. Воздух, пройдя сепарационную камеру, по трубопроводу 4 и через диафрагму 5 выбрасывался вентилятором 6.

Измерения полей скоростей и давлений проводились в 4-х сечениях по длине трубы. Первое из них было расположено непосредственно за питателем 12, последующие — через интервалы длины, равные диаметру. Замеры осуществлялись по специально разработанной методике. Нами принят способ отдельных замеров направления вектора полной скорости (угол закрутки), полного и статического давлений пневмометрическими трубками диаметром  $\sim 1$  мм. Для определения угла закрутки скорости служил двухканальный зонд-угломер со скосами под  $45^\circ$  (рис. 2а), полного и статического давлений — одноканальные зонды (рис. 2б и в).

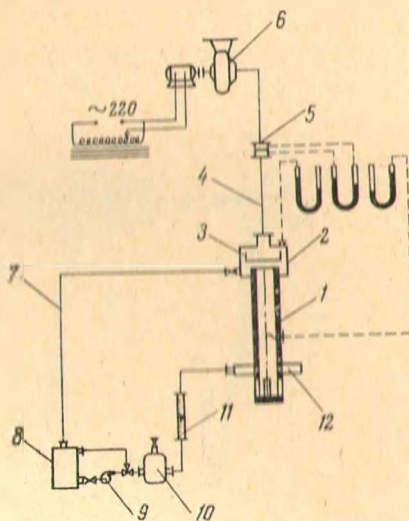


Рис. 1. Схема экспериментальной установки



Ориентация зондов в потоке выполнялась с помощью координатника, имеющего на корпусе резьбу для крепления на трубе, показанного на рис. 2. Для предотвращения проворачивания микрометрического винта 4 в корпусе 1 поставлена шпонка, а на самом винте имеется шпоночный паз, которые на схеме не показаны. Лимб 5 неподвижно закреплен на винте 4 с помощью гайки 10, а лимб 6 с делениями неподвижно закреплен винтом 7 с трубкой 8, на другом конце которой крепится зонд 9. Вращая

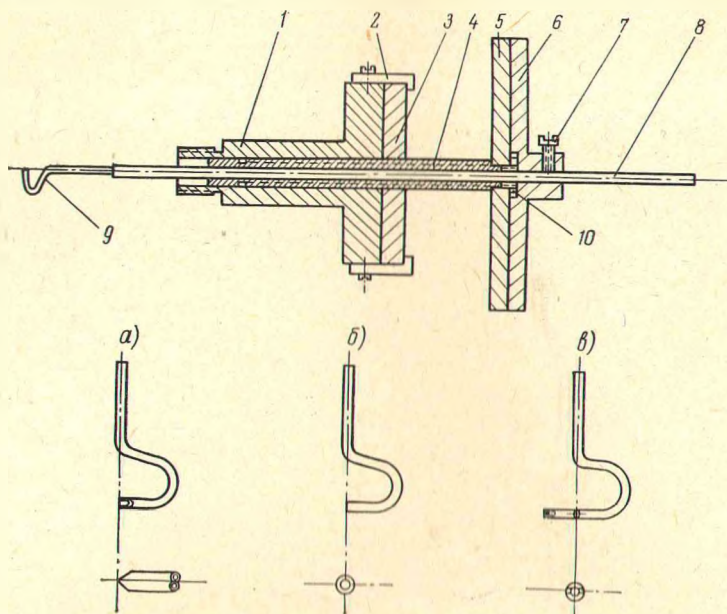


Рис. 2. Координатник с пневмометрическими трубками

лимб 3, можно перемещать винт 4, а вместе с ним и зонд 9 вдоль оси, вращая лимб 6, можно поворачивать зонд 9 вокруг оси.

Координатник, таким образом, позволяет перемещать трубки вдоль и вокруг собственной оси с точностью, соответственно, 0,01 мм и 0,5°.

Опыты проводились при  $Re_T$ , подсчитанном по средней расходной скорости воздуха, в пределах  $(5,1-8,5) \cdot 10^4$  и в основном диапазоне  $Re_{пл} = 68-410$ . В районе оси трубы замеры проведены до  $Re_{пл} = 635$ .

Перед каждым замером зонды периодически продувались.

Максимальная толщина пленки жидкости в исследованном диапазоне  $Re_{пл}$  равнялась  $\sim 1,5$  мм, поэтому замеры вблизи поверхности пленки оказались возможными на расстоянии 3,5 мм от стенки. Более детальное изучение динамики закрученной пленки составляет предмет самостоятельного исследования и здесь не рассматривается.

Результаты измерений безразмерных профилей осевой и тангенциальной скорости последовательно в 4-х сечениях по длине трубы представлены на рис. 3 и 4. Для сравнения здесь же показаны профили скоростей однофазного газового закрученного потока в этой трубе.

В [11] была установлена автомодельность по  $Re_T$  для однофазного потока. В исследованном диапазоне  $Re_{пл}$  автомодельность по  $Re_T$  при  $Re_{пл} = \text{const}$  также сохраняется, максимальные отклонения для тангенциальной и осевой скоростей составляют, соответственно, 5 и 8%.

Сравнение углов закрутки при различных скоростях газа показывает: хотя максимальные отклонения не превышают  $2-3^\circ$ , однако они являются систематическими, что указывает на более быстрое спрямление потока при меньших скоростях газа. Естественно, что с увеличением  $Re_{пл}$  автомодельность по  $Re_r$  будет все более нарушаться. При этом начинают сказываться абсолютные значения давлений и скоростей, что, в свою очередь, порождает более заметное диспергирование газа в жидкость, волнообразование, вихреобразование и т. д.

Обращает на себя внимание факт увеличения осевой скорости вблизи поверхности пленки с увеличением  $Re_{пл}$  (рис. 3). Такое явление можно

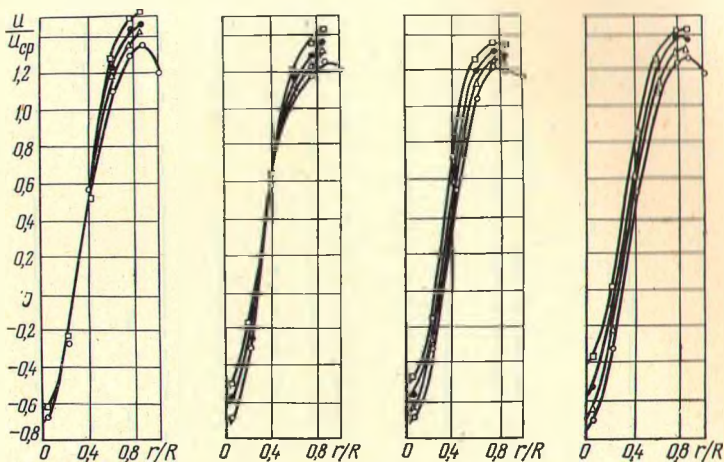


Рис. 3. Безразмерный профиль осевой скорости:  
 $\circ$  — без жидкости;  $\triangle$  —  $Re_{пл} = 124$ ;  $\bullet$  —  $Re_{пл} = 238$ ;  $\square$   $Re_{пл} = 350$

объяснить, если учесть, что на величину осевой скорости влияют два фактора: уменьшение полной скорости газовой фазы в результате увеличения сил трения на границе раздела фаз и увеличение осевой скорости в результате оттеснения газа пленкой жидкости. Под действием первого фактора осевая скорость вблизи поверхности пленки должна уменьшаться, под действием второго — увеличиваться. По-видимому, второй фактор на начальном участке трубы, где центробежные силы еще влияют на профиль осевой скорости, имеет решающее значение. Следует заметить, что на указанное выше отклонение от автомодельности также влияет различная степень оттеснения газа пленкой, так как с увеличением  $Re_r$  при  $Re_{пл} = \text{const}$  пленка становится тоньше.

Из рис. 3 видно, что в первом сечении профиль осевой скорости изменяется только вблизи пленки. Изменения профиля на оси трубы практически не обнаружено даже при  $Re_{пл} = 635$ . С удалением от входа возмущения все более проникают в центр трубы. Отчетливо заметно, что зона обратных токов в районе оси трубы быстро уменьшается с удалением от входа. При  $Re_{пл} = 635$  зона обратных токов исчезала в четвертом сечении. В отличие от осевой для тангенциальной скорости при введении жидкости не установлено никаких особенностей. Тангенциальная скорость уменьшается по всему сечению и ее максимумы располагаются на расстоянии  $0,4 R$  от оси как для однофазного, так и для двухфазного потока для всех  $Re_{пл}$  (рис. 4).

Проведенные расчеты показывают, что подобие профилей тангенциальных скоростей в различных сечениях, установленное для однофаз-



ного потока [11], в двухфазном закрученном потоке строго не соблюдается. Но, в первом приближении, профили тангенциальных скоростей можно считать подобными и описать одной универсальной кривой. Вблизи пленки затухание скорости идет быстрее, и максимальное отклонение от подобия для различных  $Re_{пл}$  достигает 20%.

Более детальный анализ полученных профилей скорости позволяет сделать вывод о том, что коэффициент турбулентного обмена газовой

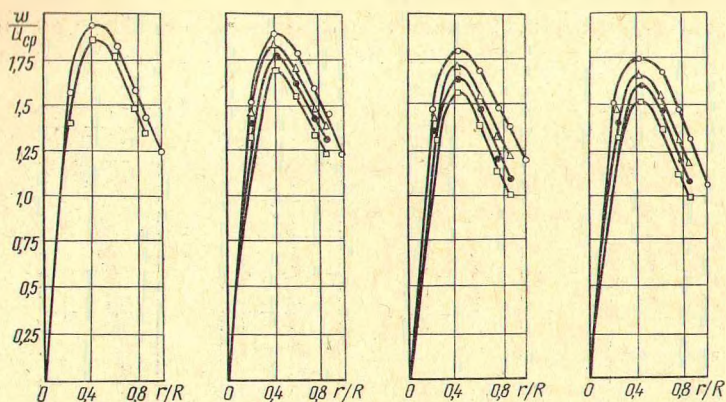


Рис. 4. Безразмерный профиль тангенциальной скорости (обозначения см. рис. 3)

фазы двухфазного закрученного потока больше соответствующего коэффициента однофазного потока и увеличивается с увеличением  $Re_{пл}$ . Максимум коэффициента турбулентного обмена располагается вблизи пленки, что способствует интенсификации процессов теплообмена в двухфазном закрученном потоке.

### ВЫВОДЫ

1. В работе получены профили скоростей газовой фазы закрученного газо-жидкостного потока в пленочном режиме течения и на их основе установлено наличие автомодельности по  $Re_r$  при  $Re_{пл} = const$  в исследованном диапазоне.

2. Установлено, что характер влияния жидкости на закрученный газовый поток существенно отличается от характера влияния жидкости на осевой газовый поток.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Ершов А. И., Плехов И. М. Авт. свид. СССР, № 182108, «Бюлл. изобр.», 1966, № 11.
2. Николаев Н. А., Жаворонков Н. М. Авт. свид. СССР, № 190345, «Бюлл. изобр.», 1966, № 24.
3. Ершов А. И., Плехов И. М. и др. Авт. свид. СССР, № 257439, «Бюлл. изобр.», 1969, № 36.
4. Красякова Л. Ю. ЖТФ, т. 22, 1952, № 4.
5. Gill L. E., Hewitt G. F., Hitchon J. W. Chem. Eng. Sci., 18, 1963.
6. Gill L. E., Hewitt G. F., Lacey P. M., Rept U. K. AERE-R 3955, 1963.
7. Adorni N. et al. CISE Rept. R-89, Milan, 1963.
8. Тонг. Л. Теплоотдача при кипении и двухфазное течение. М., «Мир», 1969.
9. Козулин Н. А., Ершов А. И. «Теплоэнергетика», 1962, № 2.
10. Доррендорф К. К., Сидельский Л. Н. Докл. НТК по итогам НИР за 1968—1969, подсек. пром. огнет. и энергетехн. теплоиспольз., МЭИ, 1969.
11. Собин В. М., Ершов А. И. «Изв. АН БССР», серия физико-энергетич., 1972, № 3.