

ОБ АНАЛОГИИ ТЕЧЕНИЯ КУЭТТА В КОЛЬЦЕВОМ И ПОЛУКОЛЬЦЕВОМ КАНАЛАХ

В.Н. Зиновьев¹, В.А. Лебига^{1,2}, Д.С. Миронов¹, А.Ю. Пак¹

¹Институт теоретической и прикладной механики

им. С.А. Христиановича СО РАН, Новосибирск, lebiga@itam.nsc.ru

²Новосибирский государственный университет, Новосибирск

Одним из простейших классических течений является течение между коаксиальными цилиндрами, впервые предложенное и использованное Куэттом для определения вязкости жидкости. В дальнейшем и течение в зазоре между плоскими пластинами стали называть течением Куэтта, в котором определяющую роль играет относительная скорость пластин. Это течение хорошо изучено и теоретически, и экспериментально для разных условий – ламинарного, турбулентного состояния потока, влияния теплообмена и т.д. [1–4]. Изучению течения Куэтта в кольцевом канале, ввиду его важности для практики, уделяется много внимания, имеются многочисленные результаты, полученные теоретическими, вычислительными методами, требующими верификации.

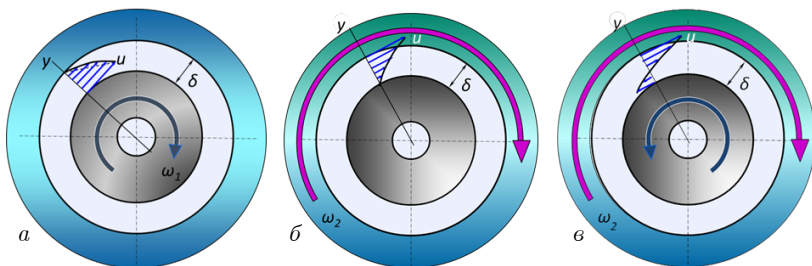


Рис. 1. Различные варианты кольцевого течения Куэтта:
а – вращение внутреннего цилиндра; б – вращение наружного цилиндра; в – одновременное вращение обоих цилиндров в противоположных направлениях

В отличие от плоского течения, характер течения Куэтта в кольцевом канале зависит не только от относительной скорости стенок и вязкости рабочей жидкости, но и от действия центробежных сил, приводящих к возникновению вихрей Тейлора-Гёртлера. В зависимости от вращения отдельно каждого

из цилиндров, либо одновременного их вращения, скорости и взаимного относительного направления, профили скоростей и структура течения меняется существенно, рис. 1.

Применение экспериментальных методов для изучения таких кольцевых течений даже для простейших случаев весьма ограничено. Это требующие прозрачных стенок оптические методы и визуализация поверхностных линий тока на стенках, которые дают некоторую, в основном качественную информацию о структуре течения, преимущественно для жидкостей, кроме того, практически невозможно изучение нестационарных характеристик потока. Введение в поток любых датчиков приводит к созданию ими возмущений, занимающих весь объем в канале и искажающих всё течение, [5–7].

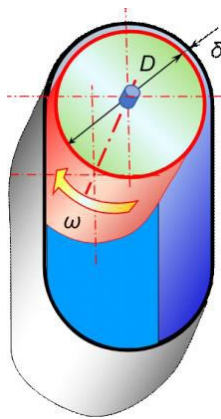


Рис. 2. Схема установки для изучения течения Куэтта

Возможным решением этой проблемы для случая вращения внутреннего цилиндра (рис. 1а) может быть реализация течения в канале, образованном концентрическими неподвижной стенкой в виде полуцилиндра и вращающимся цилиндром диаметром $D = 2R = 200$ мм и высотой $H = 100$ мм, рис. 2. Зазор между поверхностями цилиндров составлял $\delta = 4$ мм, но можно было его изменять за счёт применения цилиндров других диаметров.

Максимальная скорость вращения цилиндра могла достигать 60 об/с, а линейная скорость поверхности цилиндра до ~ 40 м/с. Внутренний объём стенда был герметизирован, что позволяло изменять давление в течении Куэтта как ниже, так и выше атмосферного. Датчики термоанемометра с нитью 5–8 микрон могли вводиться в поток и перемещаться поперёк канала в нескольких местах по его длине с помощью координатника, созданного на базе измерительного микрометра.

Были определены профили средних и пульсационных скоростей, [8–11]. Масло-сажевая визуализация течения на стенке неподвижной полуцилиндрической поверхности подтвердила образование вихрей Тейлора-Гёртлера.

Критерием, определяющим образование этих вихрей является число Тейлора: $Ta = Re(\delta/R)^{0.5}$.

Формирование вихрей Тейлора-Гёртлера начинается при числах Тейлора около 20, а их разрушение и переход к турбулентному течению в канале происходит в районе чисел Тейлора равных 100.

Помимо изучения характеристик течения, такая конструкция стенда позволила провести серии тарировок датчиков термоанемометра в среде воздуха и гелия при больших числах Кнудсена, определённых по диаметру нити датчика.

Однако возникает вопрос: насколько течения в кольцевом и исследуемом полукольцевом каналах аналогичны при одинаковых геометрических размерах канала. Аргументом в пользу подобия этих течений может служить тот факт, что и в кольцевом, и в полукольцевом каналах течение определяется только вязкостью рабочего газа и центробежными силами, одинаковыми при равенстве скоростей вращения цилиндра. Благодаря успокоительной камере отсутствует перепад давления между входом в полукольцевой канал и выходом из него. Влияние вязкого слоя, образующегося на вращающемся цилиндре в успокоительной камере, ограничивается входным участком канала. Впрочем, в случае моделирования плоского течения Куэтта также имеется вязкий слой на движущейся противоположной стенке, но обычно не возникает вопрос о влиянии этого слоя на поток в канале и отклонения от линейного профиля скорости при ламинарном режиме течения.

Прямое сравнение течений Куэтта в кольцевом и полукольцевом каналах по характеристикам потока (профилям скорости и пульсаций скорости) невозможно по указанным выше причинам. Подтверждением аналогии этих течений могло бы служить математическое моделирование обоих течений. Аналогия была бы подтверждена в случае взаимного соответствия таких расчётов и совпадения с измерениями в экспериментах для полукольцевого течения.

Работа выполнена при поддержке грантом РФФИ-МНТ_a N.21-58-52013.

Литература

1. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. М.: Наука, 1974.
2. Aydin F.M., Leutheusser H.J. Plane-Couette flow between smooth and rough walls. *Experiments in Fluids*. 1991. No. 11. P. 302–312.
3. Tillmark N., Alfredson P.H. Experiments on transition in plane Couette flow. *J. Fluid Mech.* 1992. Vol. 235. P. 89–102.
4. Bottin S., Dauchot O., Daviaud F., Maneville P. Experimental evidence of streamwise vortices as finite amplitude solutions in transitional plane Couette flow // *Physics of Fluids*. 1998. Vol. 10. P. 2597–2607.
5. Coles, D. Transition in circular Couette flow // *J. Fluid Mech.* 1965. Vol. 21. P. 385–425.
6. Andereck, C.D., Liu, S.S., Swinney, H.L. Flow regimes in a circular Couette system with independently rotating cylinders // *J. Fluid Mech.* 1986. Vol. 164. P. 155–183.
7. Dou, H.S., Khoo, B.C., and Yeo, K.S. Instability of Taylor-Couette Flow between Concentric Rotating Cylinders // *Inter. J. of Thermal Science*. 2008. Vol. 47, No. 11. P. 1422–1435.
8. Lebiga V.A., Zinoviev V.N., Pak A.Yu., Zharov I.R. The circular gap Couette flow modelling. *Siberian Journal of Physics*, Vol. 11, No. 4, 2016, pp. 52–60.
9. Lebiga V.A., Pak A.Yu., Zinoviev V.N., Mironov D.S. Simulation of properties of flat and ring Couette flow in semicircular channel. XIX International Conference on the Methods of Aerophysical Research (ICMAR 2018) (Novosibirsk, Russia, 13–19 Aug., 2018): AIP Conference Proceedings. Vol.2027, No.1. S.I., 2018. -030145(5) p. DOI: 10.1063/1.5065239.
10. Жаров И.Р., Зиновьев В.Н., Лебига В.А., Пак А.Ю. Установка для моделирования течения типа Куэтта и способ тарировки датчика термоанемометра в установке для моделирования течения Куэтта. Патент на изобретение РФ N. 2657513. М., 2018. С. 11. – Бюллетень «Изобретения. Полезные модели», N. 17.
11. Зиновьев В.Н., Лебига В.А., Пак А.Ю., Миронов Д.С. Течение Куэтта в полукольцевом канале. Вычислительный эксперимент в аэроакустике и аэродинамике: VIII Всероссийская конференция. (Геленджик, 20–25 сент. 2021 г.) 2021. – С. 2–23–15–00–2.