

Здесь Q — объемная скорость течения, S — поперечное сечение кюветки, $2h$ — ее ширина.

Из определенной таким путем величины U_0 была рассчитана скорость течения в разных точках. При этом было получено хорошее совпадение экспериментальных данных с рассчитанными по формуле (1): величина константы в знаменателе этой формулы, найденная из опыта, равнялась 0.75 ± 0.02 как при $\alpha = 0.05$, так и при $\alpha = 0.2$. Формула же (2) оказалась в заметном расхождении с опытом.

Авторы благодарят И. Б. Стечкину за совместное обсуждение результатов.

Физико-химический ин-т им. Л. Я. Карпова

Поступила 13 IV 1966

ЛИТЕРАТУРА

1. Kuwabara S. The forces experienced by randomly distributed parallel circular cylinders or spheres in a viscous flow at small Reynolds number. J. Phys. Soc. Japan, 1959, vol. 14, No 4.
2. Nappel J. Viscous flow relative to arrays of cylinders. Amer. Instit. Chem. Engng. J. 1959, vol. 15, No 2.

ОБ УСТОЙЧИВОСТИ ДВИЖЕНИЯ ЖИДКОСТИ МЕЖДУ ДВУМЯ ВРАЩАЮЩИМИСЯ СФЕРИЧЕСКИМИ ПОВЕРХНОСТЯМИ

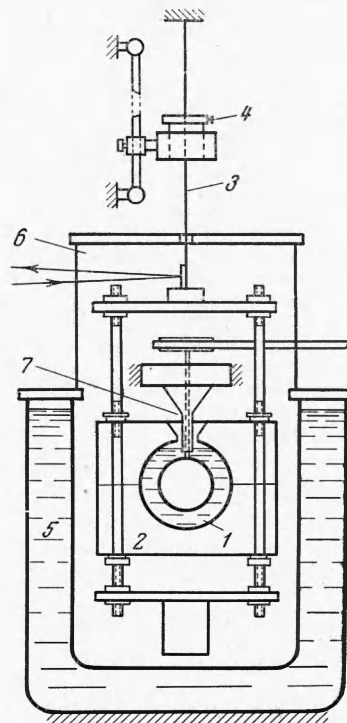
М. П. Сорokin, Г. Н. Хлебутин, Г. Ф. Шайдулов

(Пермь)

В 1961 году Ю. К. Братухиным [1] было найдено, что движение жидкости между концентрическими сферами, возникающее в результате вращения внутренней сферы при неподвижной внешней, становится неустойчивым для отношения радиусов сфер $r_2/r_1 = 2$ при числе Рейнольдса около 100 ($R = r_1^2 \omega / \nu$, где ω — угловая скорость вращения сферы, ν — кинематическая вязкость жидкости). Решение искалось по степеням числа Рейнольдса. Поскольку применимость такого метода при $R \sim 100$ не очевидна, для проверки теории был поставлен эксперимент.

1. Схема экспериментальной установки представлена на фиг. 1. Жидкость заполняет пространство 1 между стальным никелированным шаром $r_1 = 0.945$ см, приводимым в равномерное вращение от реверсивного синхронного мотора через специально сконструированный бесступенчатый редуктор, и стенками сферической полости $r_2 = 1.604$ см, выточенной в разъемном кубике 2 из органического стекла. Последний свободно подвешен на стальной нити 3 диаметром 0.02 см и длиной 2.11 м, верхний конец которой с помощью микрометрических винтов можно при юстировке установки поворачивать вокруг вертикальной оси и измеримым образом перемещать по вертикали и в горизонтальной плоскости. Центровка сфер контролировалась с точностью до 10^{-3} см через прозрачные стенки кубика катетометром. Длину рабочего участка нити подвеса можно, не нарушая центровки, изменять при помощи зажима 4, фиксируемого в парафиновой ванне. Вращающий момент вычислялся по углу закручивания нити, измеряемому методом зеркального отсчета. Колебания подвесной системы гасились масляным демпфером. Снизу система окружена водяной рубашкой 5, температура которой поддерживалась струйным термостатом, а сверху — прозрачным чехлом 6 из оргстекла. Для гидродинамического экранирования оси внутренней сферы последняя пропущена через неподвижную тонкостенную трубку 7. Вблизи нее внутри полости крепился горячий спай термопары, контролирующей температуру исследуемой жидкости, а также медицинские иглы, через которые в жидкость с целью визуализации движения вводились растворы красок.

Опыты проводились с дистиллированной водой и водными растворами технически чистого (динамитного) глицерина. Плотность растворов определялась гидростатиче-

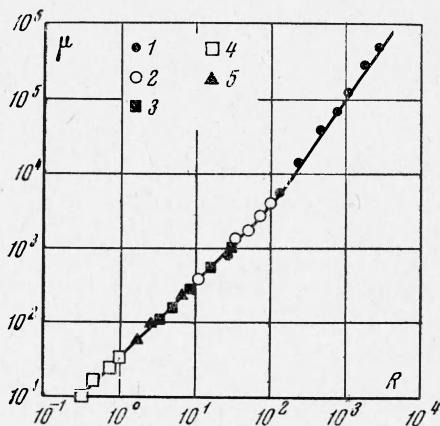


Фиг. 1

ским взвешиванием, вязкость — методами Стокса и Оствальда. При измерениях вводились обычные поправки, исследуемые растворы тщательно термостатировались.

2. Наблюдения показали, что движение жидкости при всех обследованных числах Рейнольдса не отличается качественно от найденного Братухиным во втором приближении [1]. На круговое горизонтальное движение накладывается значительно менее интенсивное движение в меридиональной плоскости: у внутренней сферы жидкость течет от полюсов к экватору, а у наружной — растекается от экватора к полюсам. С увеличением ω скорости обоих движений растут. При больших ω подкрашенная жидкость обволакивает тонким слоем поверхность сфер, отслаиваясь от них только по вертикальной оси и в плоскости экватора, что позволяет предположить образование пограничного слоя.

На фиг. 2 в логарифмическом масштабе представлены результаты измерений вращающего момента M , действующего со стороны жидкости на внешнюю сферу. По оси абсцисс отложены числа Рейнольдса в интервале от 0.7 до 2800, по оси ординат — безразмерный вращательный момент



Фиг. 2

$$\mu = \frac{IM}{\rho r_1 v^2}$$

Точки соответствуют растворам глицерина в дистиллированной воде: 1—0%, 2—45%, 3—65%, 4—80%, 5—85%; теоретические кривые построены: для $R < 80$ — по формуле (2.1), для $R > 100$ — по результатам работы [3].

Представленные на графике экспериментальные точки отобраны методом случайной выборки [2] при помощи таблиц случайных чисел из результатов 250 измерений. При $R < 80$ экспериментальные точки лежат на теоретической кривой

$$\mu = \frac{8\pi r_2^3}{r_2^3 - r_1^3} R \quad (2.1)$$

полученной для малых чисел Рейнольдса (например [3]). При $R > 100$

$$\mu = 3.35 R^{1/2} \quad (2.2)$$

Выражения типа (2.2) получаются в приближениях пограничного слоя для тормозящего момента вращающихся в жидкости осесимметричных тел [4] и характерны для пограничного слоя. Численный коэффициент зависит от формы тела и объема жидкости. Для шара, вращающегося в безграничной среде, значения численного коэффициента по результатам теоретических работ [5-7] равны 2.74, 3.04 и 2.56 соответственно, что, как и следовало ожидать, несколько меньше найденного нами значения.

В ходе экспериментов не обнаружено явлений, указывающих на нарушение устойчивости движения жидкости. В том интервале чисел Рейнольдса, где ожидалось нарушение устойчивости [1], происходит плавный бескризисный переход от закономерностей, типичных для медленных движений, к закономерностям пограничного слоя.

В заключение заметим, что полученные в работе результаты могут представить интерес для вискозиметрии.

Поступила 6 VIII 1965

ЛИТЕРАТУРА

1. Б р а т у х и н Ю. К. К оценке критического числа Рейнольдса для течения жидкости между двумя вращающимися сферическими поверхностями. ПММ, 1961, т. 25, вып. 5.
2. Р о м а н о в с к и й В. И. Применение математической статистики в опытном деле. Гостехиздат, 1947.
3. К о ч и н Н. Е., К и б е л ь И. А., Р о з е Н. В. Теоретическая гидромеханика, ч. 2. Физматгиз, 1963.
4. Д о р ф м а н Л. А. Гидродинамическое сопротивление и теплоотдача вращающихся тел. Физматгиз, 1960.
5. Г е р ш у н и Г. З., Ж у х о в и ц к и й Е. М. Вращение шара в вязкой проводящей жидкости в магнитном поле при больших числах Рейнольдса. Ж. техн. физ., 1964, т. 34, № 2.
6. Н о w a r t h L. Note on the Boundary Layer on a Rotating Sphere. Philos. Mag. 1954, vol. 42, No 334.
7. N i g a m S. D. Note on the Boundary Layer on a Rotating Sphere. Z. angew. Math. und Phys., 1954, v. 5.