



Движение легкого сферического тела и жидкости во вращающейся полости

Звягинцева Е.А., Кудымова Е.М., Романец В.Я., Козлов В.Г.

Пермский государственный гуманитарно-педагогический университет, Пермь

Введение

Движение жидкости во вращательной системе является интересным явлением в природе, которое широко используется в науке и технике. Движением жидкости во вращающемся цилиндре, а особенно движением твердого сферического тела, всплывающего в этой жидкости, занимался Тейлор [1]. В своем исследовании ученый показал, что движение жидкости в быстро вращающейся полости является двумерным. Течения, возбуждаемые движущимся во вращающейся жидкости твердым сферическим телом, позднее получили название столбиков Тейлора–Праудмена.

В работах [2, 3] при экспериментальном изучении и теоретическом описании движения твердого сферического тела во вращающейся жидкости показано, что сферическое тело, движущееся вдоль оси вращающегося цилиндра, толкает перед собой (тянет за собой) столбики Тейлора–Праудмена. За пределами этих столбиков в пределе высоких скоростей вращения жидкость совершает твердо-

тельное вращение вместе с полостью. При этом жидкость обтекает тело только в тонком вязком слое (слое Экмана), который формируется вблизи поверхности тела. Все это приводит к генерации вихревого движения в самих столбиках Тейлора–Праудмена, отстающего — перед телом и опережающего — позади тела.

Ранее данная задача изучалась преимущественно теоретически, поэтому целью данного исследования является экспериментальное изучение движения свободного тела в полости конечной длины в области высоких безразмерных частот вращения полости [4].

Экспериментальная установка и методика проведения

Экспериментальная установка состоит из цилиндрической кюветы, в которой находится легкое сферическое тело. Диаметр кюветы составляет 5.3 см, а длина — 22.5 см. В качестве легкого сферического тела используется резиновый шарик диаметром 2.40 см и плотностью $\rho_S = 0.90 \text{ г/см}^3$. В качестве рабочей жидкости используются водные растворы глицерина, вязкость которых варьируется в интервале $\nu = 1–100 \text{ сСт}$.

Скорость вращения кюветы изменяется в диапазоне 0–20 об/с, при помощи шагового двигателя. Положение кюветы (горизонтальное, под углом к

© Институт механики им. Р.Р. Мавлютова УФИЦ РАН

© Институт проблем механики им А.Ю. Ишлинского РАН

© Звягинцева Екатерина Александровна,

zvyagintsevkata@gmail.com

© Кудымова Екатерина Михайловна, kudymovakat@gmail.com

© Романец Влада Ярославовна, v.romanetz2000@gmail.com

© Козлов Виктор Геннадьевич, kozlov@pspu.ru

горизонту или вертикальное) может изменяться в процессе эксперимента.

Для изучения скорости движения тела и его вращения относительно полости в процессе всплытия во вращающейся вертикальной полости применялась скоростная видеосъемка тела камерой, расположенной с боковой стороны. Изучение полей скорости в полости выполнялось методом PIV (Particle Image Velocimetry) в различных по высоте поперечных сечениях, а также в вертикальном осевом сечении.

Результаты

Эксперименты показывают, что независимо от вязкости жидкости скорость подъема тела понижается при повышении скорости вращения кюветы. В то же время при заданной скорости вращения с повышением вязкости жидкости скорость движения сферического тела повышается, т.е. в вязкой жидкости тело всплывает быстрее.

Наблюдения показывают, что в ходе перемещения вдоль оси кюветы тело совершает дифференциальное вращение относительно полости. Вблизи нижнего торца кюветы тело вращается быстрее, т.е. движется с опережением. В средней по длине части полости дифференциальное вращение отсутству-

ет: тело вращается в лабораторной системе отсчета со скоростью, равной скорости вращения кюветы. В верхней части тело совершает отстающее вращение. При этом скорость осевого движения тела v_b остается практически постоянной и слабо зависит от положения тела относительно дна полости: лишь вблизи торцов полости скорость продольного движения незначительно понижается.

Для характеристики движения легкого сферического тела использовались безразмерная скорость всплытия $V = v_b \cdot \nu / (gd^2 (1 - \rho))$, где ρ — относительная плотность тела и безразмерная скорость вращения $\omega \equiv \Omega_{rot} d^2 / \nu$, где Ω_{rot} — угловая скорость вращения полости.

В ходе эксперимента было выяснено, что во вращающейся полости формируются осесимметричные столбики Тейлора–Праудмена, которые расположены вдоль оси вращения. Азимутальная скорость движения жидкости внутри столбиков отличается от скорости вращения за его пределами (Рис. 1). Диаметр столбиков согласуются с диаметром всплывающего тела.

Результаты экспериментов показывают, что нижний и верхний столбики Тейлора–Праудмена практически одинаковы, основное отличие заключается в том, что направления дифференциального вращения столбиков отличаются.

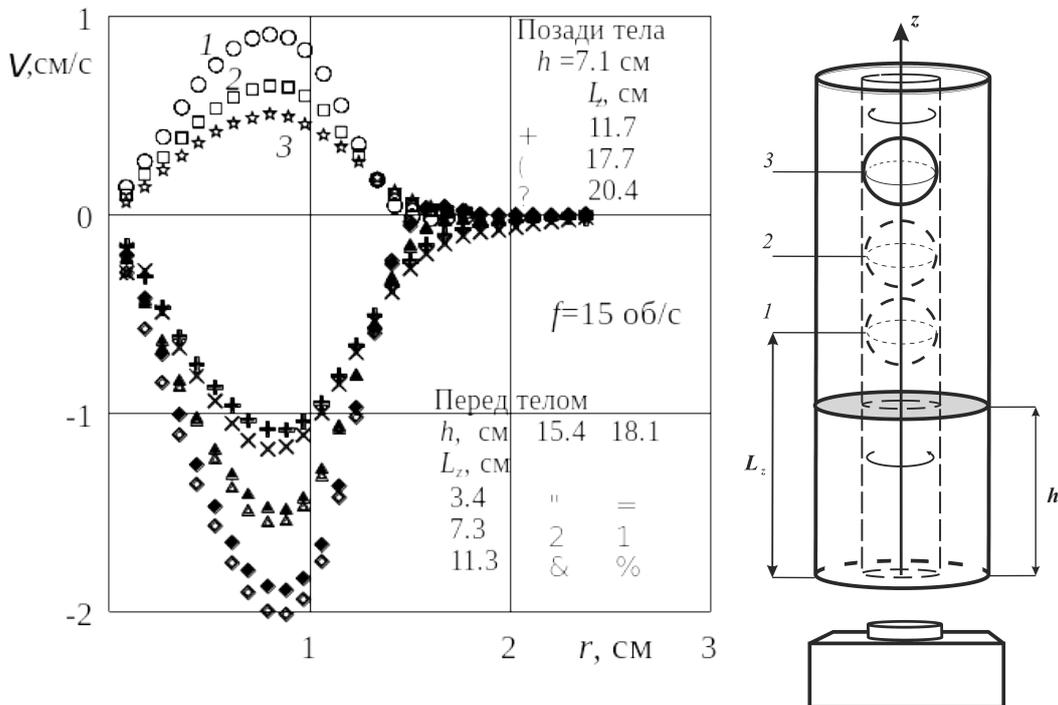


Рис. 1. Азимутальная (тангенциальная) скорость дифференциального движения жидкости в зависимости от расстояния до оси вращения в разных сечениях полости при различном положении тела в полости. Схема измерения поля скорости позади движущегося тела

Выводы

Было проведено экспериментальное исследование движения легкого сферического тела, всплывающего вдоль оси вращающегося вертикального цилиндра, и движения жидкости, возбуждаемого этим телом. Эксперименты проводились в диапазоне высоких частот вращения полости. В процессе исследования использовались высокоскоростная видеосъемка и PIV-метод.

Во вращающейся полости всплывающее тело генерирует дифференциальное движение жидкости в виде столбиков Тейлора–Праудмена, диаметр которого соответствует диаметру тела. В верхнем столбике жидкость имеет отстающий характер движения, а в нижнем — опережающий. За пределами столбиков дифференциальное вращение практически отсутствует. Также было обнаружено, что интенсивность отстающего азимутального движения в верхнем столбике увеличивается по мере подъема тела, в то время как интенсивность опережающего вращения в нижнем столбике уменьшает-

ся. Свободное тело одновременно с движением вдоль оси совершает дифференциальное вращение: в нижней части полости оно опережающее, в то время как в верхней части — отстающее.

Кроме этого, в некоторых экспериментах за пределами столбиков Тейлора–Праудмена были обнаружены структуры в виде валов. В зависимости от скорости вращения полости интенсивность этих валов изменялась. С увеличением частоты вращения количество валов возрастает.

Список литературы

- [1] *Taylor G.I.* Motion of Solids in Fluids when the Flow is not Irrotational // Proc. of the Royal Society of London 1916, A92, 408–424.
- [2] *Moore D.W., Saffman P.G.* The rise of a body through a rotating fluid in a container of finite length // J. Fluid Mech. 1968, 31, 635–642.
- [3] *Maxworthy T.* The observed motion of a sphere through a short, rotating cylinder of fluid // J. Fluid Mech. 1968, 31, 643–655.
- [4] *Kozlov V., Zvyagintseva E., Kudymova E., Romanetz V.* Motion of a light free sphere and liquid in a rotating vertical cylinder of finite length // Fluids 2023, 8, 49.