

Тема: «Численное моделирование обтекания цилиндра с поверхностью разной степени гидрофобности»

Состав коллектива:

к.ф.-м.н., н.с. ИТ СО РАН, Гаврилов А.А.,

к.ф.-м.н., н.с. ИТ СО РАН, Сентябов А.В.

Работа выполнялась при поддержке гранта Правительства Российской Федерации для государственной поддержки научных исследований, проводимых под руководством ведущих ученых в российских образовательных организациях высшего образования, научных учреждениях, подведомственных Министерству образования и науки РФ, и государственных научных центрах Российской Федерации (от 03 декабря 2019 г. № 075-15-2019-1888, ведущий ученый – Маркидес Кростос).

#### Аннотация

В работе выполнено численное моделирование обтекания круглого цилиндра при различных числах Рейнольдса при граничных условиях прилипания и проскальзывания на поверхности цилиндра. В качестве методических расчетов было проведено сравнение с результатами многочисленных экспериментальных и численных исследований при докритических и критических числах Рейнольдса с использованием расчетных сеток различной детализации. Для расчета турбулентности использовался метод моделирования крупных вихрей (LES). Исследовалось влияние условий проскальзывания на характер обтекания тела и действующие на него силы. Было установлено, что с ростом длины проскальзывания существенно снижается сопротивление цилиндра и пульсации подъемной силы.

#### Научное содержание работы

Цилиндр в поперечном потоке жидкости является простейшей задачей по изучению нестационарного обтекания плохообтекаемых тел. Помимо большого сопротивления, на такое тело действует значительная нестационарная подъемная сила. Отсутствие геометрически фиксированной точки отрыва приводит к большому разнообразию режимов обтекания, характеризующимися различными средними силами и уровнем нестационарности в зависимости от характера развития пограничного слоя на цилиндре.

Интерес к изучению течения вокруг плохообтекаемых тел возник давно. Большие обзоры обтекания цилиндра можно найти в обзорах [Williamson, 1996] и ранее [Berger and Wille, 1972]. Выделяют несколько режимов нестационарного течения: периодический двумерный срыв вихрей ( $Re = 40 - 150$ ), переход к турбулентности ( $Re = 150 - 300$ ), трехмерный нестационарный ( $Re = 300 - 1000$ ), докритический ( $Re = 10^3 - 2 \cdot 10^5$ ), критический ( $Re \approx 2 - 3,5 \cdot 10^5$ ), и сверхкритический ( $Re > 3,5 \cdot 10^5$ ). Одним из интересных способов управления обтеканием тела является изменение свойств его поверхности, в частности, её смачиваемости. С помощью микротекстурирования можно приблизиться к двум крайним состояниям поверхности – полному смачиванию (гидрофильная поверхность) или водоотталкиванию (супергидрофобная поверхность). Последнее состояние достигается при смачивании шероховатых гидрофобных поверхностей. Во впадинах таких поверхностях могут удерживаться пузырьки воздуха и жидкость контактирует лишь с малой частью поверхности твердого тела, что позволяет добиться значительного увеличения краевого угла смачивания. Такое состояние называется состоянием Касси-Бакстера [Cassie and Baxter, 1945]. Ряд исследований показал, что свойства супергидрофобных поверхностей позволяют существенно снизить гидродинамическое сопротивление как при внешнем, так и при внутреннем обтекании тел.

В то же время, в настоящее время нет работ, исследующих влияние свойств проскальзывания на поверхности на обтекание тел вблизи кризиса сопротивления.

Для моделирования турбулентных течений в рамках подхода моделирования крупных вихрей использовалась динамическая модель LES. В качестве URANS модели турбулентности использовалась модель  $k-\omega$  SST Ментера. Используемый численный алгоритм базируется на методе конечного объема для неструктурированной сетки. Для построения разностного аналога дифференциального уравнения второго порядка в методе конечного объема используются сеточные распределения искомого поля и его градиента. Связь между полями скорости и давления, обеспечивающая выполнение уравнения неразрывности, реализуется при помощи SIMPLEC процедуры на совмещенных сетках. Построение сетки велось по блочно-структурированному принципу и по принципу окто-дерева.

Для проведения методических расчетов были рассмотрены различные числа Рейнольдса, соответствующие различным режимам турбулентного обтекания. Для моделирования этого режима течения  $Re = 3900$  использовалась расчетная сетки блочно-структурированного типа, со следующими характеристиками: 289 ячейки по окружности цилиндра со сгущением в области следа, 100 ячеек по образующей цилиндра, которая содержала 4,2 млн. ячеек. Сетка, используемая для URANS, имела 5 ячеек вдоль образующей цилиндра и содержала 190 тыс. контрольных объемов. На поверхности цилиндра безразмерное расстояние до первого пристеночного узла составляло  $y_+ < 1,3$ . Шаг по времени составлял 0,001 с или  $0.01 \cdot D/U$ , что соответствует критерию Куранта  $C_{CFL} < 0,8$  во всей области. Течение в данном режиме характеризуется отрывом в районе экватора (Ошибка! Источник ссылки не найден.1) и формированием в зоне рециркуляции множества разномасштабных вихревых структур (Рисунок2). Интегральные результаты (коэффициент сопротивления и частота схода вихрей), полученные методом LES, близки к данным других авторов (Таблица 1).

Таблица 1. Результаты расчетов,  $Re = 3900$

	$C_D$	St
LES	1,024	0,214
URANS	1,26	0,208
URANS [4]	1,13	0,209
LES [4]	1,005	0,218
DNS [5]	1,015	0,215
эксперимент [6]	1,03	0,209

При моделировании течения в критической области (число Рейнольдса  $Re = 2,8 \cdot 10^5$ ) было проведено сравнение с данными измерений скорости в ближнем следе и с известными интегральными данными. Расчетная сетка для LES составляла около 11 млн. ячеек, расчеты показали хорошее согласие с экспериментальными данными. Как можно видеть, полученные результаты близки к данным моделируемого эксперимента по параметрам зоны рециркуляции и многочисленным данным измерений сил, действующих при турбулентном обтекании цилиндра. Расчетный коэффициент сопротивления находится в диапазоне 0,67 – 0,8, а пульсации коэффициента подъемной – в диапазоне от 0,3 до 0,2. Максимум энергии турбулентных пульсаций в следе за цилиндром приходится на безразмерную частоту пульсаций  $St \approx 0.20$ , что совпадает с экспериментальными данными.

Для этого режима было исследовано влияние граничных условий проскальзывания, моделирующих свойства супергидрофобных поверхностей на обтекание цилиндра. Как показали расчеты, с ростом длины проскальзывания коэффициент сопротивления и пульсации подъемной силы уменьшаются, причем снижение происходит за счет уменьшения составляющей, обусловленной давлением, а не трением. Как показывают

расчеты, условия проскальзывания на поверхности цилиндра приводят к затягиванию отрыва потока от цилиндра (Рисунок 3).

Таблица 2. Результаты расчетов

расчетная сетка, тыс. ячеек	$C_D$	$L_v/D$	$\Delta C_L$
1715	0.79	0.41	0.31
11467	0.77	0.42	0.26
23660	0,67	0,45	0,20
эксперимент		0,45	

Таблица 3. Результаты расчетов в зависимости от длины проскальзывания

$b$ , мкм	$C_D$			$\Delta C_L$
	давление	трение	сумма	
0	0.765	0.004	0.77	0.26
75	0.406	0.004	0.41	0.053
150	0.157	0.003	0.16	0.063

#### Литература:

1. Williamson C. H. K., Vortex dynamics in the cylinder wake. *Annu. Rev. Fluid. Mech.* 1996, 28:477-539.
2. Berger E, Wille R. 1972. Periodic flow phenomena. *Annu. Rev. Fluid Mech.* 4:313
3. A.B.D. Cassie and S. Baxter. Large contact angles of plant and animal surfaces. *Nature*, 1945, 155(3923), p. 21–22.
4. Palkin E, Mullyadzhanov R, Hadziabdic M, Hanjalic K. Scrutinizing URANS in shedding flows: the case of cylinder in cross-flow in the subcritical regime. *Flow, Turb. Combustion*, 2016, 97:1017–1046. DOI 10.1007/s10494-016-9772-z
5. Lehmkuhl, O., Rodr'iguez, I., Borrell, R., Oliva, A.: Low-frequency unsteadiness in the vortex formation region of a circular cylinder. *Phys. Fluids*, 25:085,109 (2013)
6. Norberg, 'Effects of Reynolds number and low-intensity free stream turbulence on the flow around a circular cylinder', Publ. No. 87 /2, Department of Applied Thermoscience and Fluid Mech., Chalmers University of Technology, Gothenburg, Sweden, 1987.

Расчеты турбулентного течения вихререзрешающими методами в программном комплексе SigmaFlow, разрабатываемом Институтом теплофизики СО РАН, проводились в параллельном режиме на кластере НГУ с использованием 48 ядер.

#### Публикации:

1. Sentyabov A., Gavrilov A. and Dekterev A. Numerical study of the flow around a circular cylinder with the slip length boundary effect at a critical Reynolds number. *Journal of Physics: Conference Series*, 2119 (2021) 012002. doi:10.1088/1742-6596/2119/1/012002

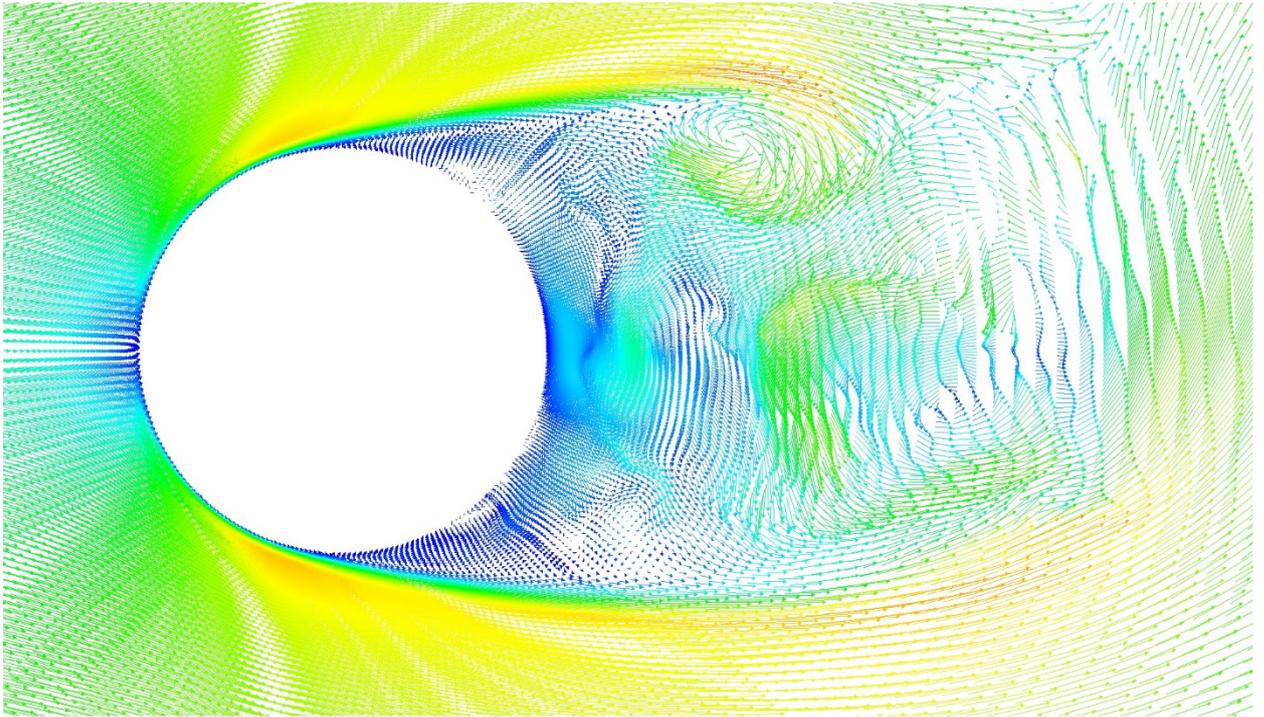


Рисунок 1. Мгновенное поле скорости в центральной плоскости,  $Re = 3900$ , LES

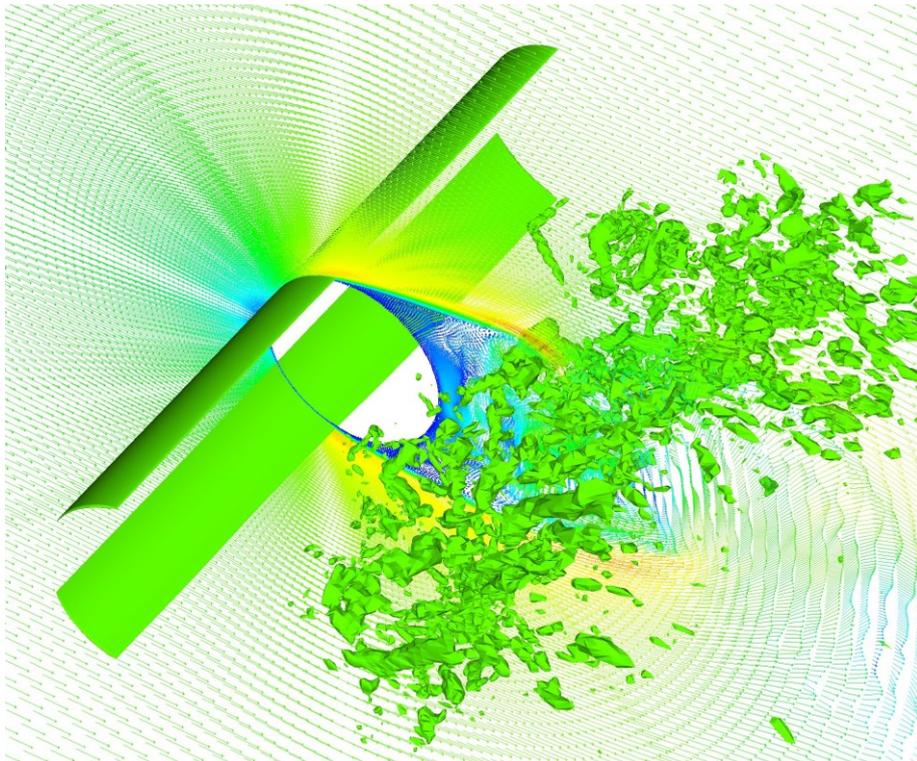


Рисунок 2. Изоповерхность критерия  $\lambda-2$

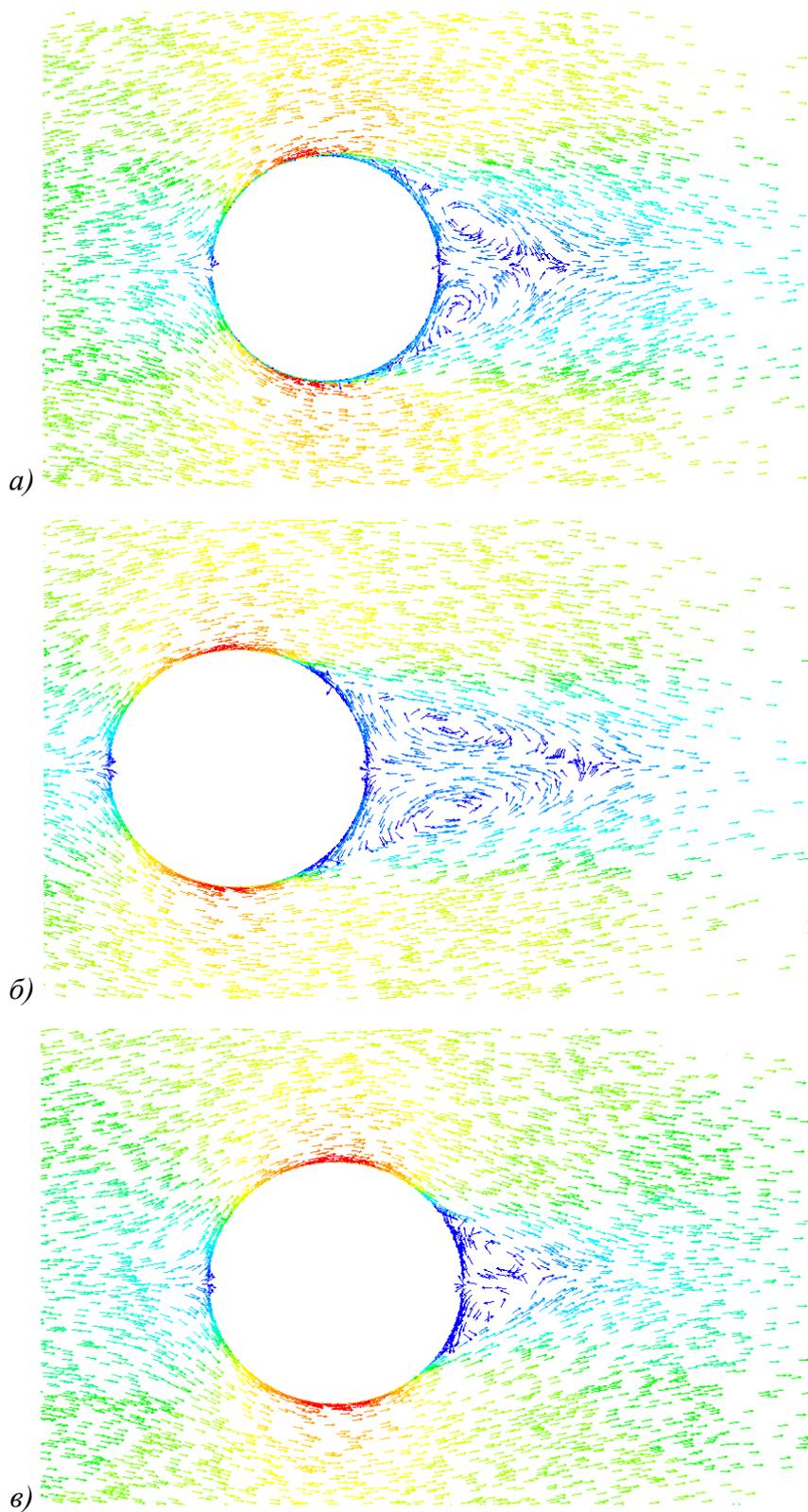


Рисунок 3. Средний вектор  $V_x$  скорости в следе за цилиндром в зависимости от длины проскальзывания: а) без проскальзывания, б)  $b = 0.075$  мм, в)  $b = 0,15$  мм