

УДК 532.542.4+532.574.7+532.582.31

## ОБТЕКАНИЕ ЦИЛИНДРА В НАЧАЛЕ КРИТИЧЕСКОЙ ОБЛАСТИ

К. Г. Добросельский

Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН, 630090 Новосибирск, Россия  
Новосибирский национальный исследовательский государственный университет,  
630090 Новосибирск, Россия  
E-mail: dobroselsky@mail.ru

Приведены результаты экспериментов, в которых круглый цилиндр, расположенный на одинаковом расстоянии от стенок прямоугольного канала, обтекался в поперечном направлении турбулентным потоком. С помощью PIV-метода получены данные о полях осредненной скорости вблизи цилиндра и по этим полям исследован ближний след за цилиндром, проведено сравнение кинематических характеристик для бескавитационного и кавитационного режимов обтекания. По векторным полям осредненной скорости определены углы отрыва пограничного слоя от поверхности цилиндра в рассмотренных режимах обтекания. Вычислены коэффициенты гидравлического сопротивления цилиндра для различных режимов обтекания. Показано, что при наличии кавитации вихревая зона за цилиндром и сопротивление увеличиваются. Также показано, что отрыв вихрей от цилиндра может происходить нерегулярным образом, несмотря на то что большую часть времени отрыв происходит квазипериодически.

**Ключевые слова:** гидродинамический стенд, цилиндр, PIV-метод, кавитация, пограничный слой, коэффициент сопротивления.

DOI: 10.15372/PMTF20160212

**Введение.** Цилиндр, обтекаемый в поперечном направлении, является классическим элементом теплообменных, энергетических и теплотехнических устройств. Теплоотдача цилиндра зависит от режима его обтекания. Несмотря на большое количество работ (см., например, [1–4]), влияние шероховатости, смачиваемости поверхности цилиндра на обтекание, сопротивление, отрыв вихрей, уровень шума исследованы недостаточно.

В последнее время в механике жидкости интенсивно исследуется возможность управления обтеканием тел с плавающей точкой отрыва пограничного слоя. Обтекание плохо обтекаемых тел, например цилиндра, можно изменить, применяя пассивные или активные методы управления [5, 6]. В первом случае с помощью генераторов турбулентности энергии, необходимая для преобразования режима течения в пограничном слое, направляется из свободного потока. Некоторые пассивные методы управления (изменение шероховатости, турбулентности внешнего потока) стали классическими и широко применяются в различных энергетических установках. Среди последних достижений в этой области следует отметить методы пассивного управления, основанные на создании на поверхности тел организованной системы вихревых структур и позволяющие с наименьшими энергетическими затратами существенно интенсифицировать конвективный теплообмен [5–7].

---

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 14-19-01685 для Института теплофизики СО РАН).

© Добросельский К. Г., 2016

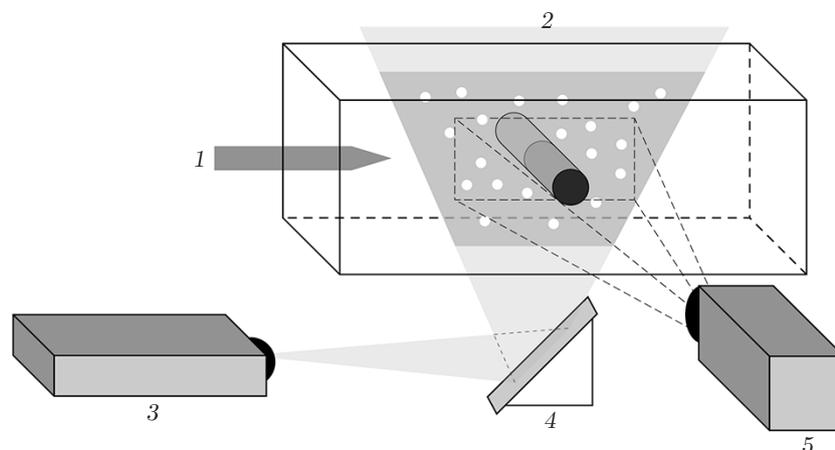


Рис. 1. Схема эксперимента:

1 — поток, 2 — рабочий участок, 3 — лазер, 4 — зеркало, 5 — камера;  
белые точки — трассеры

В настоящей работе экспериментально исследуется обтекание цилиндра турбулентным потоком воды. Показаны некоторые различия и особенности обтекания при бескавитационном и кавитационном режимах. Особое внимание уделено исследованию кавитационного режима обтекания, представляющего научный и практический интерес, обусловленный развитием альтернативной энергетики (основанной на использовании вихревых кавитационных теплогенераторов) и малой гидроэнергетики (основанной, в частности, на явлении отрыва вихрей от поверхности цилиндра).

**Методика эксперимента.** Экспериментальные исследования проводились в гидродинамической трубе замкнутого типа [8] Новосибирского национального исследовательского государственного университета (рис. 1). Перпендикулярно боковым стенкам прямоугольного канала с поперечным сечением размером  $0,08 \times 0,15$  м (ширина  $\times$  высота) располагался круглый стальной цилиндр диаметром  $d = 0,026$  м. Стенки рабочего участка были снабжены смотровыми окнами для проведения оптических измерений. Цилиндр обтекался потоком воды с постоянным объемным расходом. По отношению расхода к площади поперечного сечения рабочего участка определялась среднерасходная скорость  $u$  набегающего потока. Расход измерялся с помощью ультразвукового расходомера УРЖ2КМ с относительной погрешностью не более 2 %. Измерение температуры и давления в рабочей части стенда, перед цилиндром и за ним осуществлялось двумя датчиками, температуры и давления соответственно, с погрешностью не более 0,5 %.

Для измерений полей скорости использовалась созданная в Институте теплофизики СО РАН система PIV ПОЛИС, состоящая из программируемого синхронизирующего процессора; ПЗС-камеры ( $2048 \times 2048$  пикселей, 8 бит), оснащенной объективом SIGMA 50mm 1:2.8 DG MACRO; двойного твердотельного импульсного лазера Nd:YAG (длина волны излучения 532 нм, максимальная энергия импульса 30 мДж, длительность импульса 10 нс) с фокусирующей и цилиндрической линзами для создания лазерного ножа; зеркала, позволяющего вырезать определенный участок исследуемой области в рабочем участке. Лазерный нож заводится снизу.

Импульсный лазер создает тонкий световой нож и освещает микрочастицы — трассеры, взвешенные в исследуемом потоке. Положения частиц в моменты двух последовательных вспышек лазера фиксируются на двух кадрах цифровой камеры. Скоростное поле в потоке определяется путем расчета перемещения, которое совершают частицы за пери-

од времени между вспышками лазера. Управление экспериментом и обработка данных осуществлялись с использованием программного обеспечения ActualFlow [9], предназначенного для автоматизации процесса проведения эксперимента, обработки и визуализации данных.

Рабочей жидкостью служила водопроводная фильтрованная вода. Объемная доля воздуха в воде составляла приблизительно 0,01 (аналогичные значения использовались в работах [10, 11]) и не менялась во всей серии экспериментов. В работе [12] массовая доля воздуха в воде равна порядка  $15 \cdot 10^{-6}$  при атмосферном давлении. Во всех экспериментах использовались полиамидные трассеры со средним размером 50 мкм и концентрацией  $c \approx 13 \cdot 10^{-6}$ .

С использованием PIV-метода в продольной плоскости симметрии канала перед началом экспериментов с цилиндром были вычислены осредненные значения продольной  $v_x$  и поперечной  $v_y$  компонент скорости и их пульсационные значения. Осреднение проводилось по 1000 двойных изображений мгновенных полей скорости, полученных за период 12 мин. Обработка полученных с помощью PIV-метода данных проводилась по методике [13]. Форма полученного профиля скорости потока свидетельствует о наличии в нем ядра с постоянной скоростью  $v_{x\max} \approx 9,8$  м/с (в то время как среднерасходная скорость потока  $u = 8,8$  м/с) и степенью турбулентности  $Tu = \sqrt{(v_x - \langle v_x \rangle)^2} / v_{x\max} \approx 0,008$ . Соответственно число Рейнольдса принималось равным  $Re = 2,8 \cdot 10^5$  ( $Re = v_{x\max}d/\nu$ , где  $\nu$  — кинематическая вязкость воды).

Для получения полной картины течения вокруг цилиндра в верхней части рабочего участка под некоторым углом устанавливалось дополнительное зеркало.

**Результаты эксперимента.** На рис. 2 представлены поля осредненных скоростей  $v_x/u$  в бескавитационном и кавитационном режимах обтекания цилиндра в центральной части канала при среднерасходной скорости  $u = 8,8$  м/с, температуре воды  $t \approx 25$  °С и различном давлении  $p_\infty$  перед цилиндром. Осреднение проводилось по 2000 двойных изображений, полученных за период 25,5 мин. (Здесь  $x, y$  — отнесенные к диаметру  $d$  продольная и поперечная координаты соответственно.)

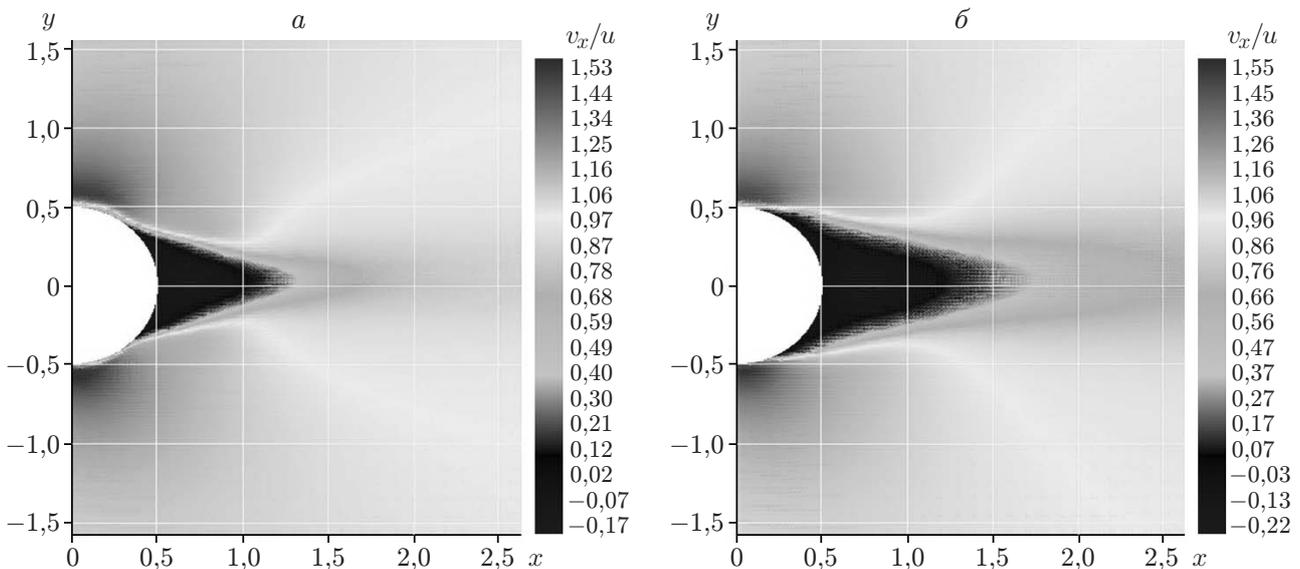


Рис. 2. Поля скорости  $v_x/u$  при  $u = 8,8$  м/с,  $t = 25$  °С:  
 а — бескавитационный режим ( $p_\infty \approx 161$  кПа), б — кавитационный режим ( $p_\infty \approx 112$  кПа)

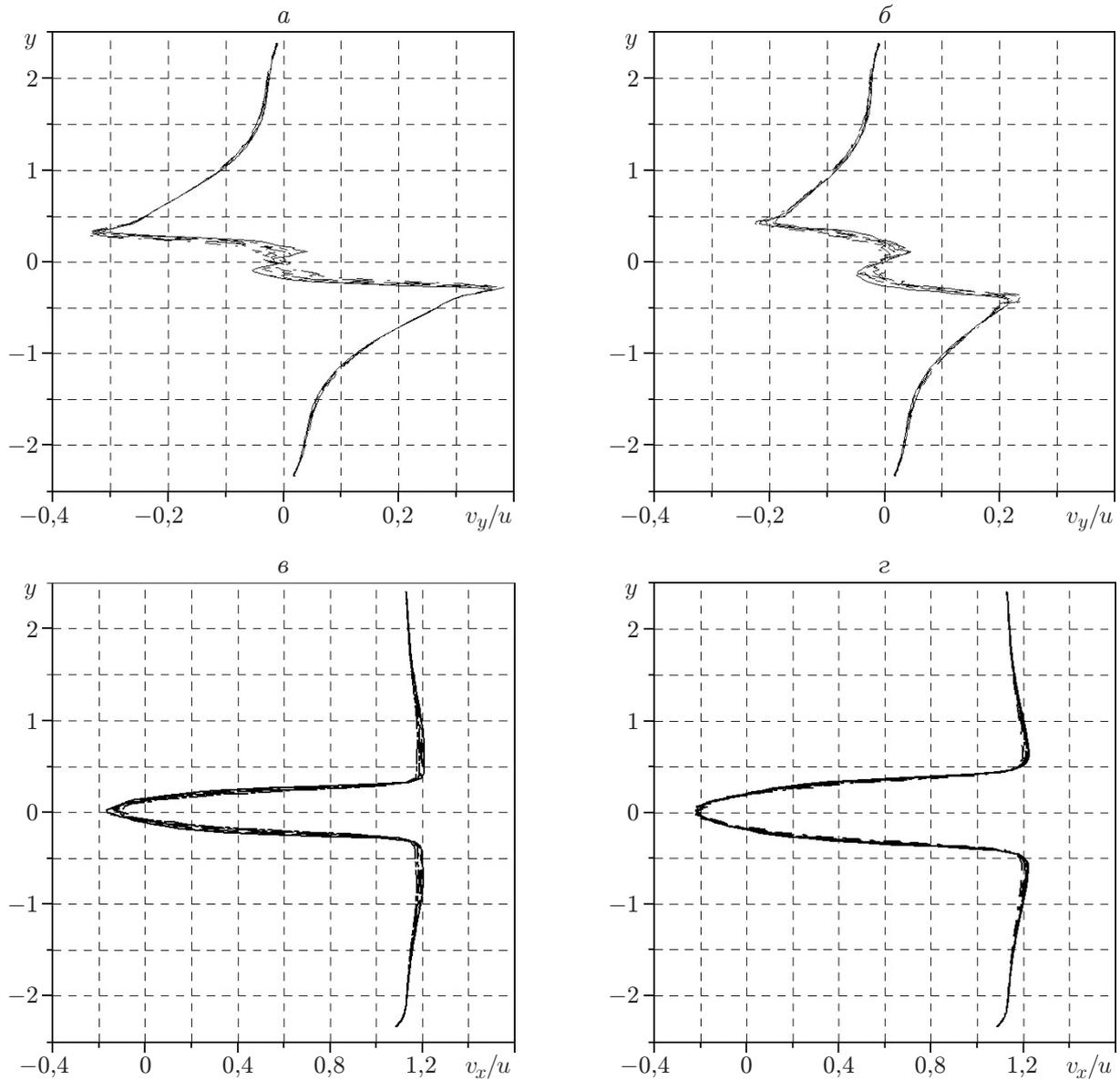


Рис. 3. Профили скоростей  $v_y/u$  (а, б) и  $v_x/u$  (в, г) при различных режимах обтекания:

а, в — бескавитационный режим; б, г — кавитационный режим

На рис. 3 представлены профили средних скоростей  $v_y/u$  и  $v_x/u$  в месте расположения центров вихрей за цилиндром для рассматриваемых режимов при  $x = 0,71 \div 0,82$  с шагом  $\Delta x \approx 0,02$ .

Из рис. 2, 3 следует, что в области за цилиндром образуется устойчивая турбулированная область, в которой квазипериодически формируются вихри, вращающиеся в противоположных направлениях: верхний — по часовой стрелке, нижний — против часовой стрелки. По вертикали вихри незначительно смещены относительно друг друга. По полям осредненных скоростей для  $v_x = 0$ ,  $v_y = 0$  были определены координаты центров вихрей с относительной погрешностью не более 1 %. Измерения показали, что при кавитационном режиме обтекания расстояние между центрами верхнего и нижнего вихрей приблизительно на 70 % больше, чем при бескавитационном режиме.

Жидкость между вихрями движется в направлении, противоположном направлению основного потока. Значение продольной составляющей скорости обратного потока в месте расположения вихрей составило порядка  $0,2u$ , длина области обратного течения —  $0,46d$  и  $0,65d$  для бескавитационного и кавитационного режимов соответственно. Значения скорости обратных течений  $(0,15 \div 0,25)u$ , длины области обратных токов  $0,5d \approx \text{const}$  при  $\text{Re} \geq 1,5 \approx 10^4$  приведены в работе [14].

По векторным полям осредненной скорости можно достаточно точно определить величину конечного угла отрыва  $\varphi$  (отсчитывается относительно точки торможения потока) пограничного слоя (по границе возвратного движения на поверхности цилиндра). В случае бескавитационного режима обтекания на верхней поверхности цилиндра угол отрыва  $\varphi_+ \approx 134^\circ$ , на нижней —  $\varphi_- \approx 141^\circ$ . При тех же условиях эксперимента в случае кавитационного режима обтекания соответствующие углы равны  $\varphi_+ \approx 129^\circ$ ,  $\varphi_- \approx 138^\circ$ . Различные углы отрыва (для воздуха) получены в работе [1], где приведены данные о нарушении периодичности вихреобразования для чисел Рейнольдса  $\text{Re} = (3 \div 5) \cdot 10^5$ , вследствие чего точки отрыва, расположенные на разных сторонах цилиндра, смещаются. Это приводит к скосу потока в следе, при котором указанный несимметричный режим обтекания является достаточно устойчивым при фиксированной скорости потока. Заметим, что в работе [15] точка отрыва турбулентного течения от кругового цилиндра соответствует значению  $\varphi \approx 110^\circ$ , в [16] полный отрыв турбулентного пограничного слоя происходит при  $\varphi \approx 140^\circ$ ,  $\text{Re} = (2 \div 4) \cdot 10^5$  (в этот интервал попадают и данные, полученные в настоящей работе).

Одной из основных характеристик любого гидравлического участка является коэффициент гидравлического сопротивления. Для исследуемого цилиндра коэффициент сопротивления определялся по формуле

$$\zeta_c = \zeta_t - \zeta_{ch},$$

где  $\zeta_t = \Delta p_t / (\rho u^2 / 2)$  — суммарный коэффициент сопротивления (с цилиндром);  $\zeta_{ch} = \Delta p_{ch} / (\rho u^2 / 2)$  — коэффициент сопротивления рабочего участка (без цилиндра);  $\Delta p_t$ ,  $\Delta p_{ch}$  — потеря давления на участке между датчиками давления с цилиндром и без цилиндра соответственно.

При загроможденности  $\eta = 0,17$  получены следующие результаты:  $\zeta_c = 0,083$  при бескавитационном режиме обтекания,  $\zeta_c = 0,094$  при кавитационном режиме (различие — 13 %). Очевидно, это различие обусловлено увеличением вихревой зоны за цилиндром и степени турбулентности.

При понижении давления в канале возникает развитая кавитация с вихревыми кавернами. На рис. 4 приведены картины обтекания цилиндра в некоторый момент времени при различной интенсивности кавитации ( $\sigma = 2(p_\infty - p_s) / (\rho v_{x \max}^2)$  — число кавитации;  $p_s$  — давление насыщенного водяного пара;  $\rho$  — плотность воды). Поток воды с температурой  $t \approx 27,7^\circ\text{C}$  движется слева направо со среднерасходной скоростью  $u = 8,8$  м/с.

На рис. 4 видно, что периоды попеременного срыва верхнего и нижнего вихрей (см. рис. 4,а) чередуются с периодами формирования двух вихрей с одной из сторон цилиндра (см. рис. 4,б) либо одновременного симметричного формирования пары вихрей с противоположных сторон цилиндра (см. рис. 4,в). Подобная картина отрыва вихрей наблюдается и при других режимах течения, в том числе при бескавитационном режиме. Аналогичные виды отрывных течений за цилиндром изучены в работе [2] для случая пульсирующих потоков в воздухе. Однако в случае осредненного течения в ближнем следе за цилиндром имеем два практически симметричных вихря.

**Заключение.** С использованием PIV-метода проведены экспериментальные исследования структуры течения вблизи цилиндра, обтекаемого в поперечном направлении. В ре-

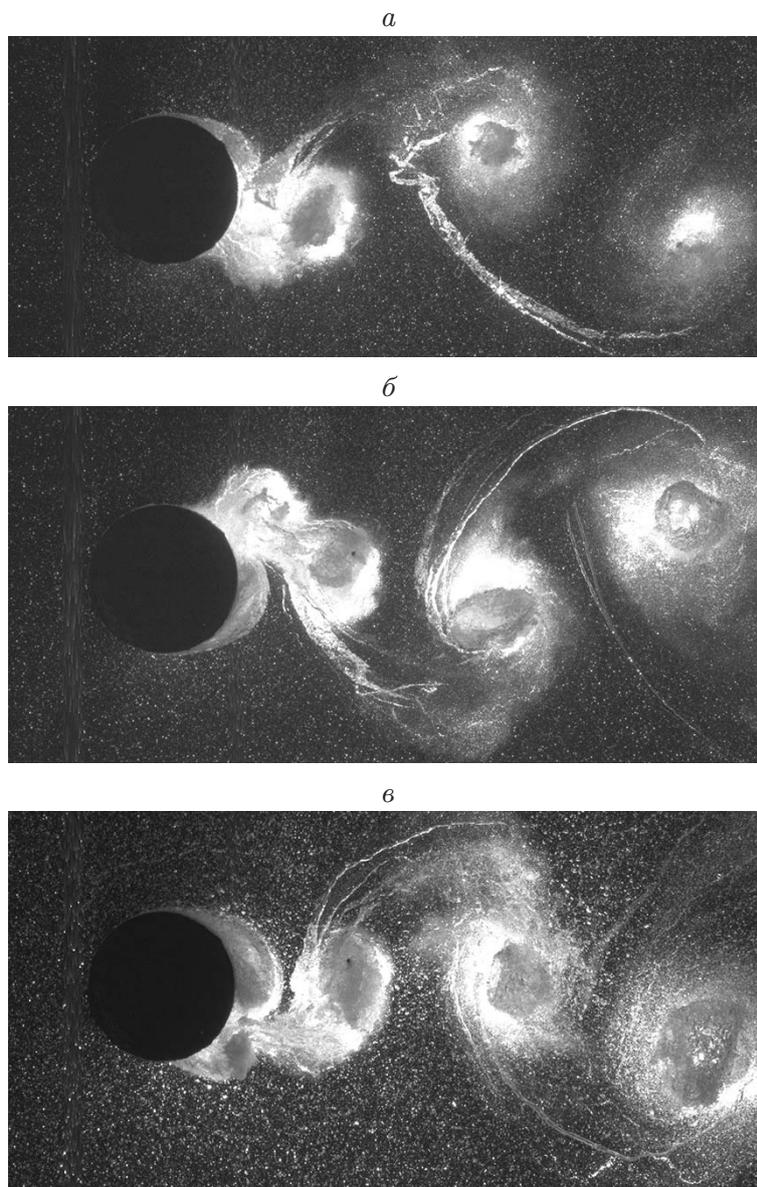


Рис. 4. Картины обтекания цилиндра при  $u = 8,8$  м/с,  $t = 27,7$  °С и различной интенсивности кавитации:

$a - \sigma = 2,02$ ,  $б - \sigma = 2,00$ ,  $в - \sigma = 1,61$

зультате анализа полей осредненных скоростей обнаружено существование вихревой зоны с двумя противоположно вращающимися относительно горизонтальной плоскости симметрии вихрями и обратного течения в ближнем следе цилиндра. Показано, что кинематические характеристики следа за цилиндром различаются в случаях бескавитационного и кавитационного режимов. Установлено, что при кавитационном режиме обтекания вихревая зона за цилиндром увеличивается как в поперечном, так и в продольном направлении. Расстояние между центрами вихрей увеличивается на 70 %, а длина области обратного течения — на 41 %. Очевидно, это и приводит к росту гидравлического сопротивления цилиндра на 13 %.

По векторным полям осредненной скорости были определены углы отрыва пограничного слоя. В случае бескавитационного режима обтекания точки отрыва на верхней и ниж-

ней поверхностях цилиндра соответствуют углам  $\varphi \approx 134, 141^\circ$ ; в случае кавитационного режима точки отрыва смещаются вверх по потоку на  $5^\circ$  и  $3^\circ$  соответственно.

Исследование картин обтекания цилиндра при развитой кавитации, полученных способом скоростной видеосъемки, показало существование нескольких видов отрывных течений за цилиндром в ближнем следе, в том числе одновременного схода пары вихрей, хотя в среднем в течение длительного периода времени отрыв вихрей происходит квазипериодически. Аналогичная картина наблюдалась и при других режимах течения.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Божков В. М., Васильев Л. Е., Жигулев С. В. Особенности поперечного обтекания кругового цилиндра // Изв. АН СССР. Механика жидкости и газа. 1980. № 2. С. 154–157.
2. Михеев А. Н., Михеев Н. И., Молочников В. М. Интенсификация теплоотдачи поперечно обтекаемого цилиндра в пульсирующем потоке // Современная наука: Сб. науч. ст. 2012. № 2. С. 214–219.
3. Головкин В. А., Калявкин В. М., Колков В. Г. Оптическая визуализация обтекания кругового цилиндра на режимах разгона и торможения потока // Изв. АН СССР. Механика жидкости и газа. 1981. № 2. С. 136–142.
4. Unal U. O., Atlar M. An experimental investigation into the effect of vortex generators on the near-wake flow of a circular cylinder // Exp. Fluids. 2010. V. 48, N 6. P. 1059–1079.
5. Gad-el-Hak M. Flow control // Appl. Mech. Rev. 1989. V. 42. P. 261–293.
6. Кучук Т. В. Поперечное обтекание цилиндра при периодическом возмущении пограничного слоя электролизными пузырьками // Электрон. обработка материалов. 2007. № 2. С. 31–38.
7. Березентьев М. Ю., Гувернюк С. В., Зубин М. А. и др. Визуализация дозвукового обтекания цилиндрических тел с вихревыми ячейками // Аэромеханика и газовая динамика. 2001. № 1. С. 11–18.
8. Добросельский К. Г. Методика исследования поперечного обтекания цилиндра в гидродинамической трубе // Вестн. Новосиб. гос. ун-та. Сер. Физика. 2013. Т. 8, вып. 4. С. 110–117.
9. Ахметбеков Е. К., Бильский А. В., Ложкин Ю. А. и др. Система управления экспериментом и обработки данных, полученных методами цифровой трассерной визуализации (ActualFlow) // Вычисл. методы и программирование. 2006. Т. 7. С. 79–85.
10. Арзуманов Э. С. Кавитация в местных гидравлических сопротивлениях. М.: Энергия, 1978.
11. Борц Б. В., Казаринов Ю. Г., Скоромная С. Ф., Ткаченко В. И. Экспериментальное исследование динамики пузырьков воздуха в воде при быстрой декомпрессии // Вестн. Харьков. нац. ун-та. Сер. Физика. 2012. № 991. С. 95–101.
12. Brennen Christopher E. Cavitation and bubble dynamics. Oxford: Oxford Univ. Press, 1995.
13. Токарев М. П., Маркович Д. М., Бильский А. В. Адаптивные алгоритмы обработки изображений частиц для расчета мгновенных полей скорости // Вычисл. технологии. 2007. Т. 12, № 3. С. 109–131.
14. Дыбан Е. П., Эпик Э. Я. Тепломассообмен и гидродинамика турбулизованных потоков / Е. П. Дыбан, Э. Я. Эпик. Киев: Наук. думка, 1985.
15. Чжен П. Отрывные течения. М.: Мир, 1972. Т. 1.
16. Марр Ю. Н., Швежда С. А. Особенности движения жидкости вблизи поверхности поперечно обтекаемого цилиндра // Изв. АН СССР. Механика жидкости и газа. 1989. № 4. С. 65–71.