

К. Г. Добросельский

Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН
пр. Акад. Лаврентьева, 1, Новосибирск, 630090, Россия

Новосибирский государственный университет
ул. Пирогова, 2, Новосибирск, 630090, Россия

E-mail: dobroselsky@mail.ru

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ ПОПЕРЕЧНОГО ОБТЕКАНИЯ ЦИЛИНДРА В ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЙ ТРУБЕ *

Модернизирована экспериментальная установка (гидродинамическая труба) для исследования турбулентных течений. Проведены тестовые эксперименты с поперечным обтеканием цилиндра. С использованием метода трассерной визуализации PIV (Particle Image Velocimetry) получены поля скоростей около цилиндра для докавитационного и кавитационного режимов ($Re = 2,8 \cdot 10^5$).

Ключевые слова: гидродинамический стенд, турбулентное течение, цилиндр, кавитация.

Введение

Турбулентное течение жидкости является наиболее распространенным видом движения и его исследование имеет большое прикладное значение. До сих пор проблема турбулентности все еще далека от полного разрешения, поэтому наиболее эффективными являются методы исследования, основанные на обобщении экспериментальных материалов [1,2]. Гидродинамические стенды (трубы) являются важнейшим инструментом для исследования течений возле профилей (моделей), которые используются в различных технических гидравлических устройствах и механизмах [3].

В качестве профиля для тестовых измерений полей скорости был выбран круглый цилиндр. Поперечно обтекаемый цилиндр является классическим элементом теплообменных, энергетических и теплотехнических устройств. Процесс теплоотдачи цилиндра напрямую связан с режимом его обтекания. Несмотря на достаточно большое количество работ [4 – 7], вопросы, свя-

занные с влиянием шероховатости, смачивания поверхности цилиндра на обтекание, сопротивление, отрыв вихрей, уровень шума, до сих пор остаются открытыми.

Понижение давления, а также увеличение скорости или повышение температуры потока жидкости выше некоторого предела вызывают в местных сопротивлениях гидравлических систем явление кавитации [8-11]. Под кавитацией понимают появление в жидкости областей, заполненных парами или газами, выделившимися из жидкости. В данной работе явление кавитации тоже будет затронуто.

Экспериментальная установка

Эксперименты проводились на гидродинамическом стенде Новосибирского национального исследовательского государственного университета (НГУ).

Установка представляет собой замкнутый гидродинамический контур. Габаритные размеры стенда (трубы): длина – 6290 мм; высота – 1770 мм; ширина – 700 мм.

* Автор благодарит В. В. Каляду за помощь в автоматизации гидродинамического стенда.

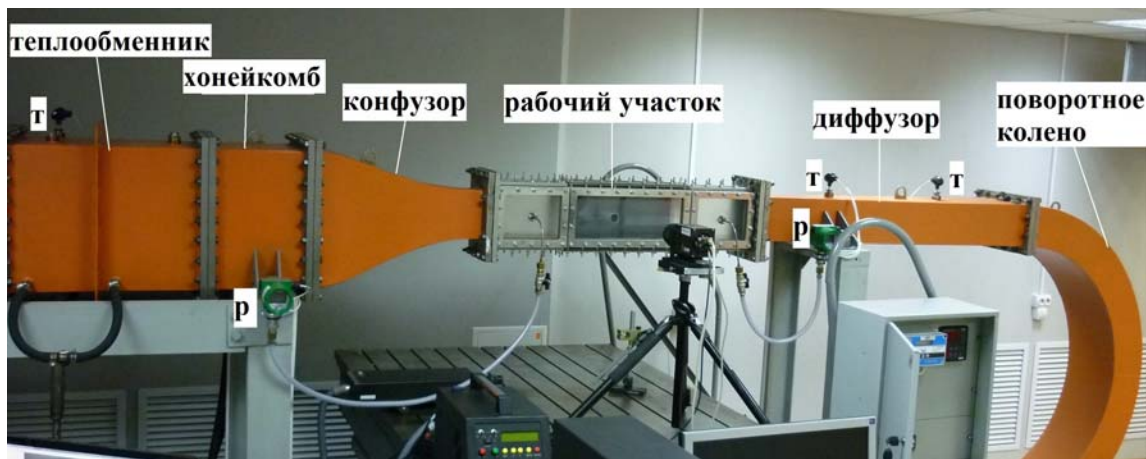


Рис. 1. Рабочая часть гидродинамической трубы

Рабочая часть экспериментальной установки (рис. 1) состоит: из теплообменника длиной 550 мм, поперечным сечением $400 \times 400 \text{ мм}^2$ с двумя змеевиками (трубки диаметром 20 мм и развернутой длиной 5370 мм); хонейкомба длиной 300 мм, поперечным размером $400 \times 400 \text{ мм}^2$, количеством ячеек 18×18 с размером $20 \times 20 \text{ мм}^2$; конфузора длиной 600 мм с поперечными размерами $400 \times 400 \text{ мм}^2$ на входе и $150 \times 80 \text{ мм}^2$ на выходе; рабочего участка длиной 1000 мм с поперечным сечением $150 \times 80 \text{ мм}^2$ с плоскими параллельными боковыми стенками, в который устанавливается исследуемый профиль. Рабочий участок состоит из трех секций: левой и правой, куда подводятся датчики давления и центральной, где устанавливается исследуемый профиль. Стенки рабочего участка снабжены смотровыми окнами для проведения оптических измерений.

За рабочим участком расположен диффузор длиной 1200 мм с поперечными размерами $150 \times 80 \text{ мм}^2$ на входе и $250 \times 150 \text{ мм}^2$ на выходе (рис. 1). Обратный канал выполнен: из поворотного колена на 180° радиусом 625 мм сечением $250 \times 150 \text{ мм}^2$ (рис. 1); прямого трубопровода длиной 2500 мм, диаметром 200 мм; измерителя расхода длиной 600 мм; трубопровода, обеспечивающего подвод воды к насосу. Масса трубы в рабочем состоянии – 1770 кг. Объем воды в стенде примерно 740 л.

Для измерения расхода воды в контуре использовался ультразвуковой расходомер жидкости УРЖ2КМ, позволяющий измерять расходы от 20 до $380 \text{ м}^3/\text{ч}$.

Для измерения и контроля температуры в стенде установлены 3 датчика температуры (сопротивления) ТСМ.50М с измеряемым диапазоном температур $-50 \dots +150 \text{ }^\circ\text{C}$ (на рис. 1 обозначены Т).

Контроль и измерение давления осуществляют 3 датчика давления – разрежения: два датчика 415-ДИВ (модель 5353) в рабочем участке (на рис. 1 обозначены р) и один на выходном от насоса патрубке 415-ДИВ (модель 8353). Пределы измерения датчиков: $-100 \dots 300 \text{ кПа}$.

Температура рабочей жидкости (воды) в контуре установки поддерживается постоянной и контролируется с помощью системы терморегулирования, состоящей из датчиков температуры и холодильной установки ВТХО – 24 – С – ПМ: давление жидкости (воды) на выходе – 3 бар; производительность насоса – $5,5 \text{ м}^3/\text{ч}$; температура окружающей среды $+5 \dots +32(^\circ\text{C})$; холодопроизводительность при температуре вода / воздух / $+15 / +30^\circ\text{C}$ – $30,5 \text{ кВт}$.

Установка позволяет проводить исследования по обтеканию различных моделей как в докавитационном, так и в кавитационном режимах.

Эксперимент

Схема оптических измерений

Для измерений использовалась созданная в институте теплофизики СО РАН система РИВ ПОЛИС, которая состоит: из программируемого синхронизирующего процессора; ПЗС – камеры ($2024 \times 2024 \text{ пикс}^2$, 8-10 бит),

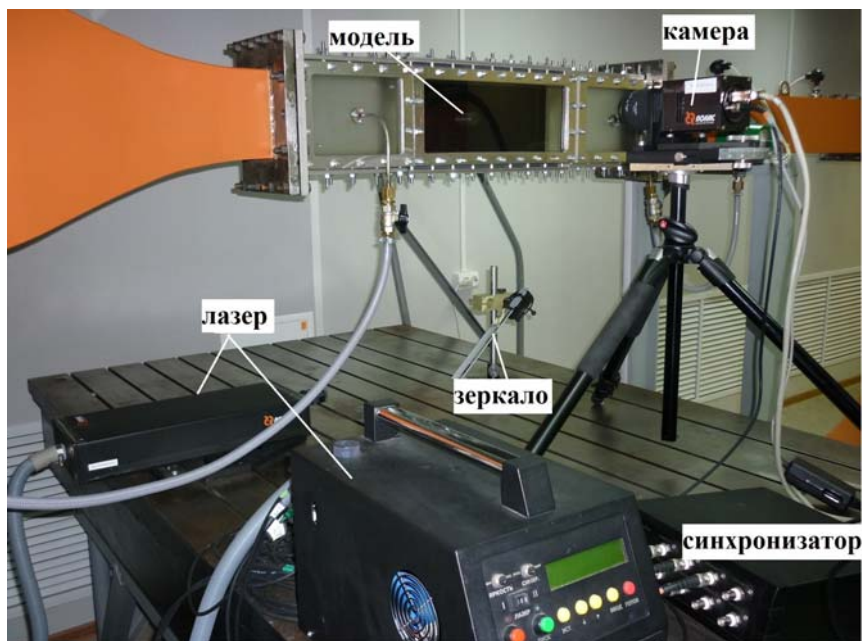


Рис. 2. Схема измерений PIV

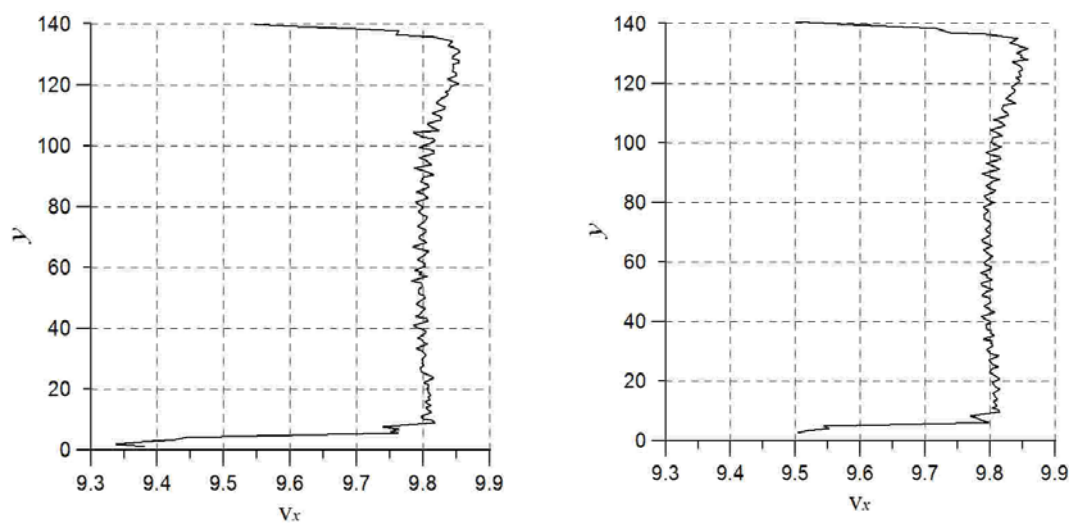


Рис. 3. Профили продольной скорости

оснащенной объективом SIGMA 50mm 1:2.8 DG MACRO; двойного твердотельного импульсного Nd:YAG лазера с длиной волны лазерного излучения 532 нм (максимальная энергия излучения в импульсе 50 мДж, длительность импульса 5 нс) с фокусирующей и цилиндрической линзами для создания лазерного ножа; зеркала, позволяющего вырезать определенный участок исследуемой области в рабочем участке. На рис. 2 показаны основные элементы ПОЛИСа и место установки модели в рабочем участке. Лазерный нож заводится снизу.

В воду засыпаются светоотражающие полиамидные частицы (трассеры), по изображениям которых и определяется поле скоростей вокруг исследуемой модели.

Газосодержание

Рабочей жидкостью служила водопроводная фильтрованная вода. Дегазация воды с целью уменьшения концентрации растворенного в воде воздуха не проводилась. Воздух из воды «выгонялся» методом дополнительного избыточного давления и от-

стоя. Относительное содержание воздуха в воде составляло примерно $0,01 \text{ м}^3/\text{м}^3$. Такие же примерно величины приводятся в работах [11, 12]. В работе [10] приводится концентрация воздуха в воде порядка 15 мг/кг при атмосферном давлении. Но надо иметь в виду, что большое количество растворенного воздуха при атмосферном давлении и выше никак не проявляет себя. Поэтому, возможно, растворенного воздуха значительно больше.

Начальный уровень турбулентности потока

Во всех экспериментах (здесь и ниже) использовались полиамидные трассеры средним размером 50 мкм и концентрацией $c \approx 13 \text{ мг/кг}$.

Перед началом экспериментов с профилем в пустом рабочем участке было промерено поле скоростей методом PIV в вертикальном центральном сечении (1000 двойных изображений за 12 мин.). Обработка полученных данных PIV проводилась по методике [13]. По усредненному полю скоростей для различных расходов воды в канале были получены значения составляющих скорости, пульсационные скорости и т.д., которые представляются в виде таблицы Excel. На рис. 3 показаны профили про-

дольной скорости в вертикальном сечении, проведенном через центр канала вдоль потока в центральной секции рабочего участка канала ($v = 8,8 \text{ м/с}$). Слева представлен профиль скорости набегающего потока при координате $x = 132 \text{ мм}$, справа – при $x = 16,5 \text{ мм}$ от центра устанавливаемого профиля вверх по потоку.

Немонотонность графиков связана с масштабом скорости и дискретностью значений y (через $0,5 - 0,6 \text{ мм}$).

Средний уровень турбулентности составил

$$tu = \frac{\sqrt{\langle (v_x - \langle v_x \rangle)^2 \rangle}}{\langle v_x \rangle} \approx 0,017.$$

Методика проведения экспериментов с цилиндром

Для тестовых измерений полей скорости был выбран круглый стальной цилиндр диаметром $d = 26 \text{ мм}$.

Для получения полной картины течения вокруг цилиндра в оптическую схему эксперимента было добавлено дополнительное зеркало, которое устанавливалось сверху рабочего участка под некоторым углом. Обработка полученных данных PIV проводилась по методике [13].

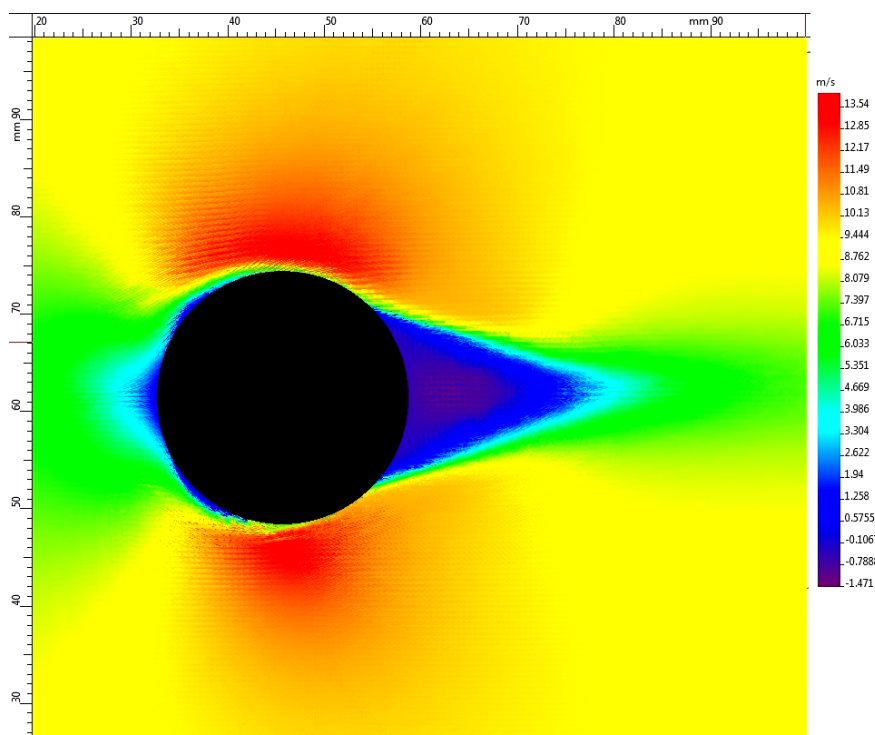


Рис. 4. Поле скоростей v_x вокруг цилиндра

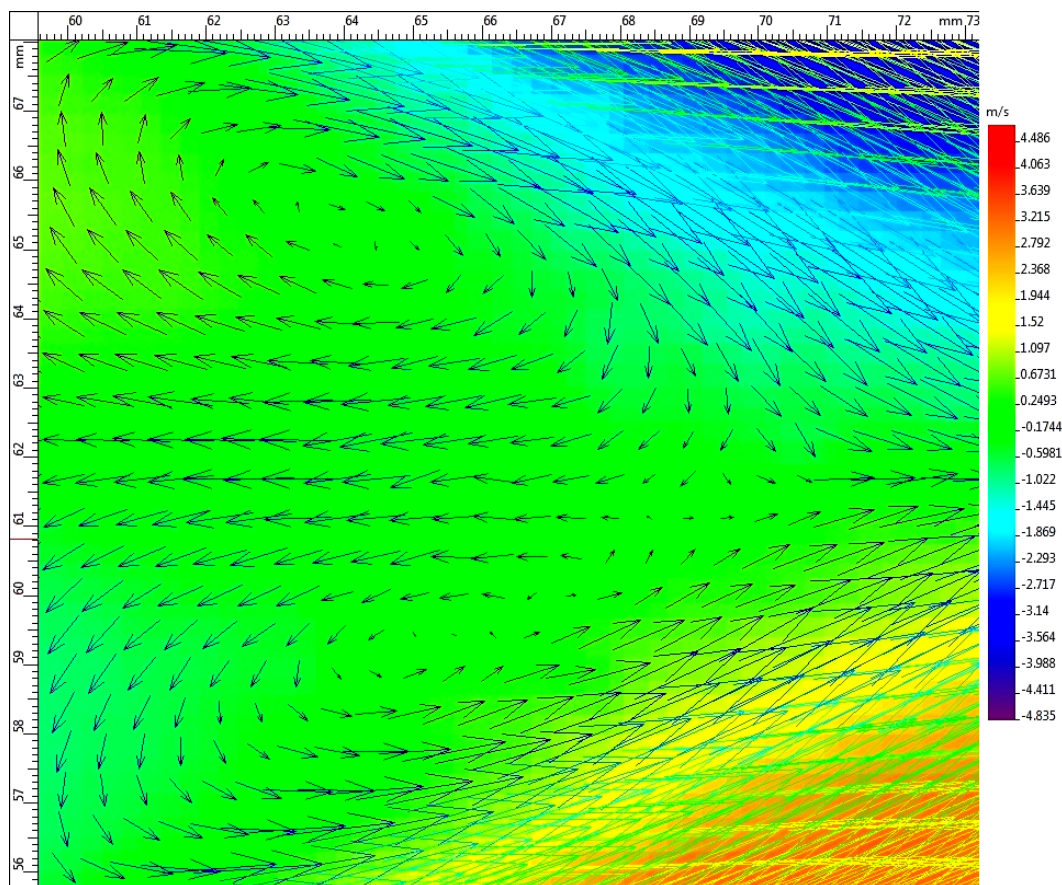


Рис. 5. Векторное поле скоростей за цилиндром

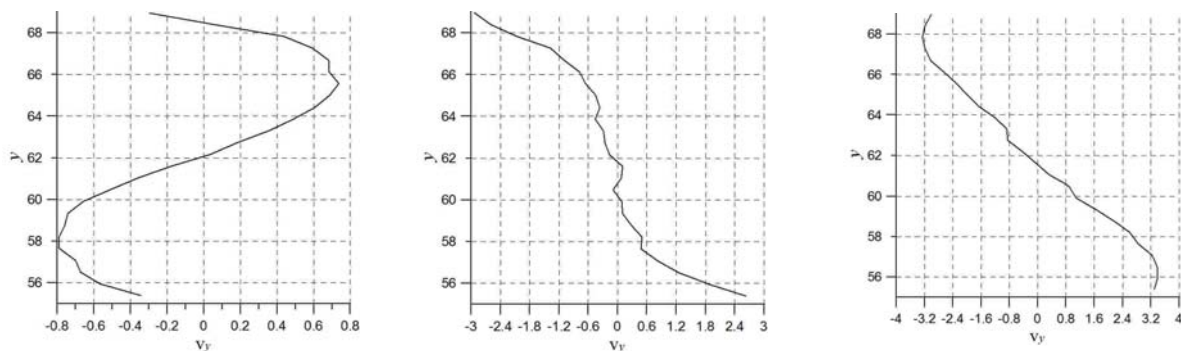


Рис. 6. Профили скорости $v_y(y)$ при фиксированном значении x

На рис. 4,5 представлены усредненные (2000 двойных изображений за 25,5 мин.) поля скоростей докавитационного обтекания цилиндра в центральной части канала при $v = 8,8$ м/с. Цветом указаны величины скоростей v_x (рис. 4) и v_y (рис. 5). Параметры воды: $p_\infty = 161,4$ кПа, $t = 25,3$ °С. Поток

слева направо. Центру цилиндра соответствуют координаты $x_0 \approx 45$ мм, $y_0 \approx 61,5$ мм.

Ниже, на рис. 6, представлены графики поля скоростей v_y за цилиндром (к рис. 5) для нескольких значений x (слева направо $x = 59,9$ мм, $x = 66,1$ мм, $x = 72,9$ мм). На рис. 7 представлена фотография обтекания

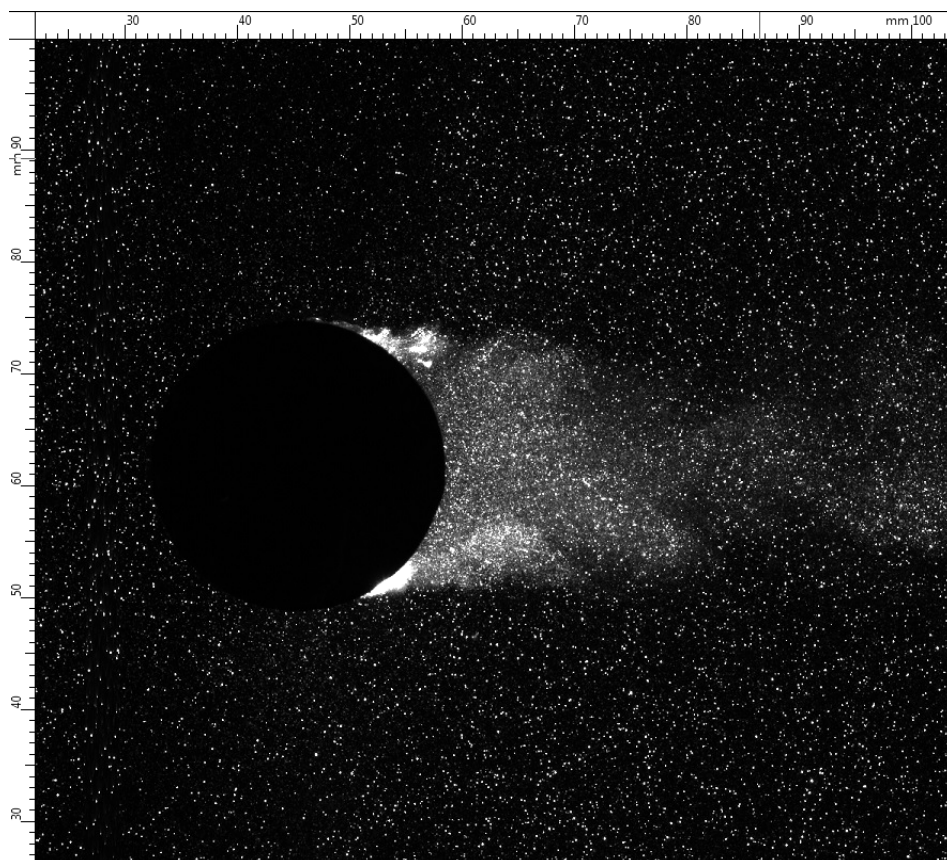


Рис. 7. Мгновенная картина кавитационного обтекания цилиндра

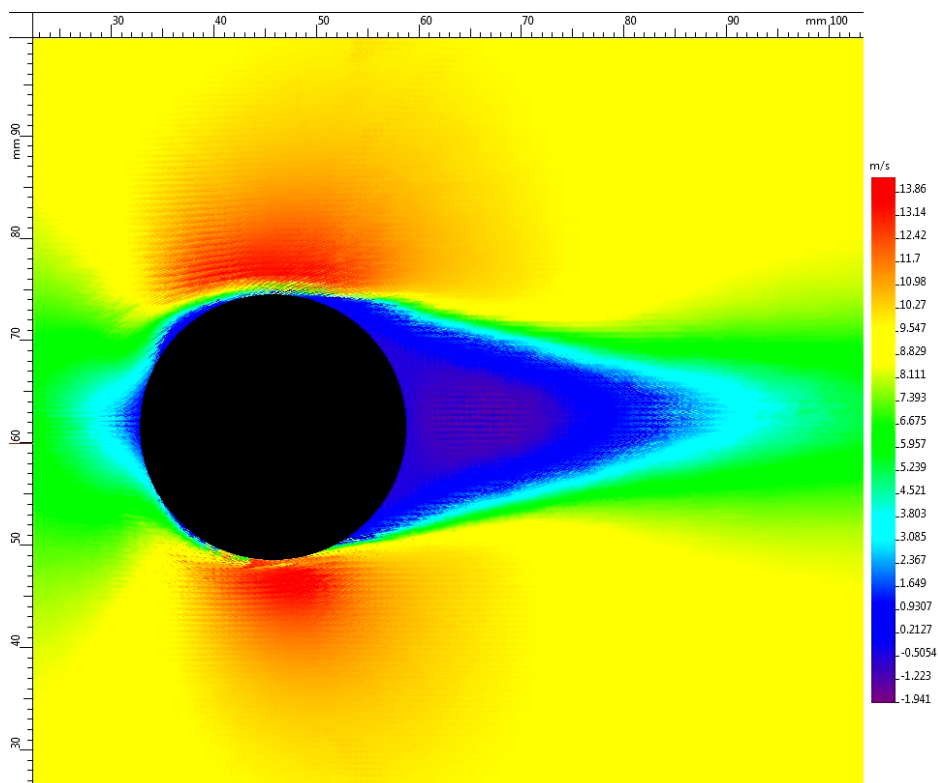


Рис.8. Усредненная картина кавитационного обтекания цилиндра

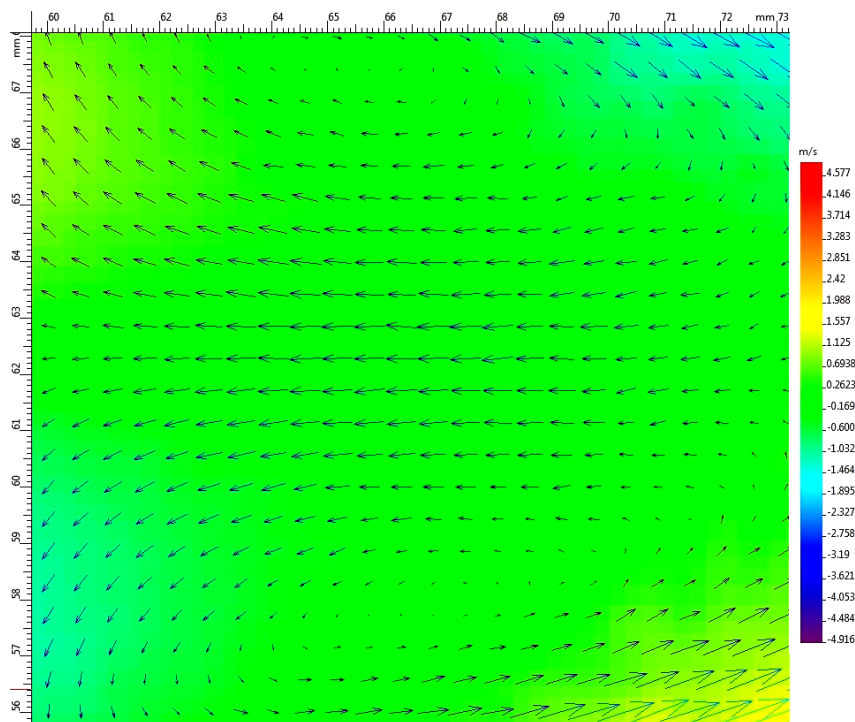
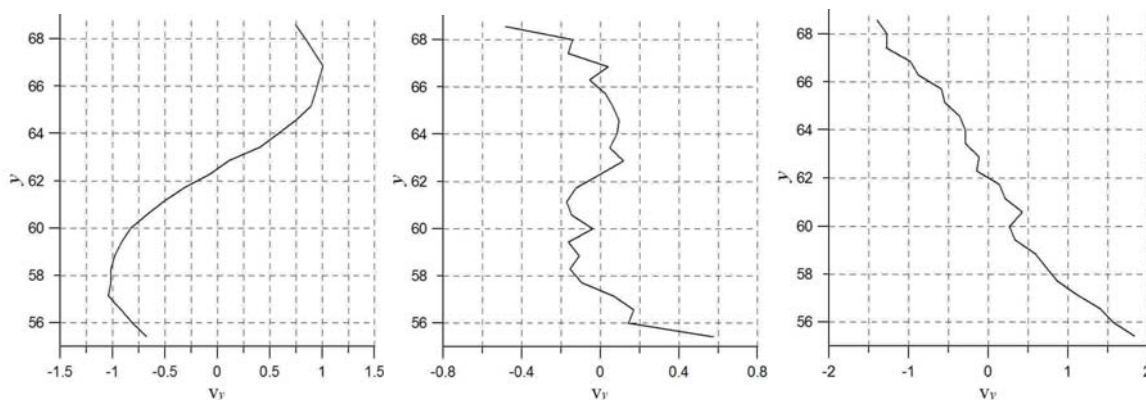


Рис. 9. Поле скоростей за цилиндром

Рис. 10. Профили скорости $v_y(y)$ при фиксированном значении x

цилиндра при облачной кавитации. На рис. 8, 9 представлены усредненные (2000 двойных изображений за 25,5 мин.) поля скоростей кавитационного обтекания цилиндра в центральной части канала при $v = 8,8$ м/с. Цветом указаны величины скоростей v_x (рис. 8) и v_y (рис. 9). Параметры потока: $p_\infty = 112,1$ кПа, $t = 25,3$ °С. Видно, что, картины полей скорости (см. рис. 5 и 9) достаточно сильно отличаются, нарушается симметрия расположения вихрей за цилиндром. Ниже (рис. 9) представлено поле скоростей v_y за цилиндром. На рис. 10, представлены графики поля скоростей v_y за цилиндром (к рис. 9) для нескольких значений x (слева

направо $x = 60$ мм, $x = 66,3$ мм, $x = 73,1$ мм). Значения x выбраны примерно теми же, как к рис. 6. Некоторая немонотонность графиков связана с дискретностью координаты y (через 0,5 – 0,6 мм) и масштабом скорости.

Тестовые эксперименты с цилиндром показали большие возможности использования метода PIV для качественных и количественных измерений турбулентных потоков.

Заключение

Модернизированный гидродинамический стенд позволяет исследовать большое количество гидродинамических задач со скоро-

стями, набегающего на исследуемый профиль, потока до 10 м/с, а оптическая измерительная система ПОЛИС с программным обеспечением Actual Flow дает возможность рассчитать поля скоростей, их статистические и дифференциальные характеристики.

Использование дополнительных методов исследования, в частности скоростной видеосъемки, позволит детализировать и расширить области наблюдения взаимодействующих потока и препятствия, в частности режимы переходной и развитой кавитации.

Возможности исследования на рассмотренной гидродинамической трубе позволяют использовать ее как для дипломных работ студентами, так и для серьезной научной и инженерной работы в области гидродинамики, энергетики и т.д.

Список литературы

1. Турбулентность. Принципы и применения / Под ред. У. Фроста, Т. Моулдена. М.: Мир, 1980. 536 с.

2. Рейнольдс А. Дж. Турбулентные течения в инженерных приложениях: Пер. с англ. М.: Энергия, 1979. 408 с.

3. Витер В. К., Кулагин В. А. Крупномасштабные гравитационные гидродинамические трубы. Красноярск, 2006. 243 с.

4. 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.

5. Вальес Н. Г. Расчет срывного обтекания цилиндра при автоколебаниях в потоке идеальной жидкости // Изв. АН СССР. Механика жидкости и газа. 1980. № 3. С. 173–178.

6. 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.

7. Unal U. O., Atlar M. An Experimental Investigation into the Effect of Vortex Genera-

tors on the Near-Wake Flow of a Circular Cylinder // Exp. Fluids. 2010. № 48. P. 1059–1079.

8. Пирсол И. Кавитация / Пер. с англ. Ю. Ф. Журавлева; ред., предисл. и дополн. Л. А. Эпштейна. М.: Мир, 1975. 95 с.

9. Рождественский В. В. Кавитация. Л.: Судостроение, 1977. 247 с.

10. Brennen Ch. E. Cavitation and Bubble Dynamics. Oxford Univ. Press, 1995. 282 p.

11. Арзуманов Э. С. Кавитация в местных гидравлических сопротивлениях. М.: Энергия, 1978. 305 с.

12. Борц Б. В., Казаринов Ю. Г., Скоромная С. Ф., Ткаченко В. И. Экспериментальное исследование динамики пузырьков воздуха в воде при быстрой декомпрессии // Journal of Kharkiv University. 2012. № 991. С. 95–101.

13. Токарев М. П., Маркович Д. М., Бильский А. В. Адаптивные алгоритмы обработки изображений частиц для расчета мгновенных полей скорости // Вычисл. технологии. 2007. Т. 2. С. 1–23.

Список принятых обозначений

p_{∞} – статическое давление перед цилиндром (по центру рабочего участка); t – температура воды; v – среднерасходная скорость набегающего потока в рабочем участке; v_x – продольная составляющая скорости (по оси X), м/с; v_y – поперечная составляющая скорости (по оси Y), м/с; $\langle v_x \rangle$ – среднее значение составляющей скорости по оси X в поперечном сечении канала, м/с; x, y – координаты, горизонтальная и вертикальная соответственно, мм; $Re = \frac{v_{\infty} \cdot d}{\nu}$ –

число Рейнольдса; v_{∞} – средняя скорость набегающего потока в средней части канала, м/с; ν – кинематическая вязкость воды, м²/с.

Материал поступил в редколлегию 10.09.2013

K. G. Dobroselskiy

RESEARCH METHODOLOGY OF CROSS-FLOW CYLINDER PIPE HYDRODYNAMICAL

Experimental setup (hydrodynamic pipe) for the study of turbulent flows has been upgraded. Test experiments with a cross-flow around a cylinder have been carried out. Using the method of flow visualization PIV (Particle Image Velocimetry) the velocity fields around the cylinder for precavitational and cavitation regimes ($Re = 2,8 \cdot 10^5$) have been obtained.

Keywords: hydrodynamic stand, turbulent flow, cylinder, cavitation.