

С. Г. Скрипкин, М. А. Цой, С. И. Шторк

*Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН
ул. Кутателадзе, 2, Новосибирск, 630090, Россия*

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

Skryp91@mail.ru, miketsoy@gmail.com, shtork@itp.nsc.ru

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ ДВОЙНОГО ПРЕЦЕССИРУЮЩЕГО ВИХРЕВОГО ЖГУТА В МОДЕЛЬНЫХ ОТСАСЫВАЮЩИХ ТРУБАХ *

Работа посвящена экспериментальному исследованию структуры течения в модельных отсасывающих трубах гидротурбин. С помощью стационарных завихрителей в потоке формировалось прецессирующее вихревое ядро, подобное наблюдаемому в натуральных гидротурбинах в режимах с форсированной или частичной нагрузкой. В лабораторных условиях удалось выявить эффект перехода между одно- и двуспиральными вихревыми жгутами. Были измерены их частотные характеристики в диапазоне чисел Рейнольдса $5 \cdot 10^4$ – $5 \cdot 10^5$. На основе анализа данных высокоскоростной съемки детально исследован сценарий полного перехода между режимами с одинарным и двойным вихрями. Изучение данного явления представляет особый интерес для проектирования и эксплуатации гидротурбинного оборудования, ввиду того что в потоке возникают нерасчетные пульсации давления с внезапными изменениями частоты и амплитуды.

Ключевые слова: прецессирующее вихревое ядро, отсасывающая труба, закрученный поток, пульсации давления.

Введение

При работе гидротурбин в неоптимальных режимах поток на входе в отсасывающую трубу имеет высокую остаточную закрутку, в результате чего происходит распад вихря с генерацией прецессирующего вихревого ядра (ПВЯ). Вихревой жгут, взаимодействуя с проточным трактом, вызывает пульсации крутящего момента рабочего колеса до 20 % от номинального и напрямую влияет на эффективность работы гидрогенератора. Также совпадение частоты прецессии с собственными частотами проточного тракта приводит к негативным последстви-

ям, вплоть до выхода оборудования из строя. Таким образом, одной из главных целей изучения данного явления является точный расчет частотных и амплитудных характеристик ПВЯ в различных режимах работы гидроагрегата, что необходимо для повышения безопасности и эффективности работы гидростанции.

На сегодняшний день имеется большое количество работ, содержащих как экспериментальные, так и численные методы исследования ПВЯ [1–4]. В основном эти работы посвящены режиму с односпиральным вихревым жгутом. Кроме этого в литературе встречаются единичные работы, посвящен-

* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 14-29-00203).

ные наблюдению двуспирального вихревого жгута. Одно из первых исследований двойного вихревого жгута в отсасывающих трубах представлено в работе [5], в которой использовалась модель в масштабе 1 : 40,33 гидротурбины мощностью 700 МВт. Пульсации давления в отсасывающей трубе регистрировались двумя пьезоэлектрическими датчиками, расположенными диаметрально противоположно. Имеющееся на тот момент оборудование не позволило исследователям детально изучить структуру вихревого жгута, поэтому эксперименты ограничивались измерениями частоты прецессии. В частности, была зарегистрирована частота 0,29 Гц для одиночного жгута и 0,78 Гц для двойного.

Skotak et al. в работе [6] исследовали на крупномасштабной модели гидротурбины различные режимы по расходу, углу наклона направляющих лопаток и нагрузке. Авторами был получен режим с двойной спиралью вблизи оптимальной нагрузки, т. е. при относительно слабой закрутке потока, а также при частичной нагрузке, характеризующейся высоким параметром закрутки потока. В первом случае прецессия была противоположно направлена относительно вращения рабочего колеса, а во втором сонаправлена. Подобные эффекты получали Nishi & Liu, которые изучали различные режимы работы гидротурбин [7]. В более поздних работах [6–8], исследователи отмечают феномен двойного жгута, но ссылаются при этом на ранее полученные экспериментальные результаты, опубликованные в 1994 г. (см. [5]). К настоящему времени прогресс в развитии измерительных технологий позволяет дополнить имеющуюся экспериментальную информацию о данном явлении, используя современные методы диагностики закрученных потоков.

В настоящей работе были экспериментально воспроизведены условия с сильной остаточной закруткой потока в модельных отсасывающих трубах. Нестационарные режимы течения с генерацией ПВЯ были исследованы с помощью системы скоростной визуализации, гидроакустических и оптических датчиков. Особое внимание уделено эффекту перехода между одинарным и двойным прецессирующими вихревыми жгутами. Данная неустойчивость представляет особый интерес для изучения, ввиду того что практически мгновенно изменяются харак-

теристики вихревого жгута: поле завихренности, период и частота прецессии. Подобное поведение ПВЯ в отсасывающих трубах является плохо прогнозируемым и может вызывать дополнительные нерасчетные вибрации гидрооборудования.

Экспериментальный стенд и оборудование

Экспериментальное исследование проводилось на двух замкнутых гидродинамических контурах, содержащих рабочие участки различной конструкции (рис. 1, 2). В первом экспериментальном стенде (см. рис. 1, красным отмечены области оптических измерений) в качестве рабочего участка используется прозрачная модель отсасывающей трубы Turbine-99 [9], которая включает основные элементы натуральных отсасывающих труб: конус, поворотное колено и диффузор.

В модели Turbine-99 вместо гидротурбинного агрегата, включающего направляющий аппарат и рабочее колесо, используется стационарный лопаточный завихритель с фиксированным параметром закрутки потока $S = 0,65$, который определялся исходя из геометрии завихрителя:

$$S = \frac{2}{3} \left(\frac{1 - (d_1/d_2)^3}{1 - (d_1/d_2)^2} \right) \tan(\varphi),$$

где d_1 и d_2 – внешний и внутренний диаметры, φ – угол наклона лопаток. Такая конструкция позволяет с использованием сменных завихрителей моделировать различные режимы работы гидротурбины, включая нерасчетные режимы с высокой остаточной закруткой потока. Стенд оснащен ультразвуковым расходомером, что в комбинации с частотным преобразователем, управляющим работой насоса, позволяет задавать расход до 100 м³/ч с погрешностью менее 1%. Для регистрации пульсаций давления на стенке конуса отсасывающей трубы был установлен гидрофон, сигнал с которого оцифровывался с помощью аналого-цифрового преобразователя (рис. 3). Длительность измерения для каждого значения расхода составляла 60 с при частоте дискретизации 1 кГц. Для вычисления спектра сигнала использовался алгоритм быстрого Фурье-преобразования. На основе анализа спектра определялся пик, соответствующий частоте прецессии жгута. В случае двухжгутовой

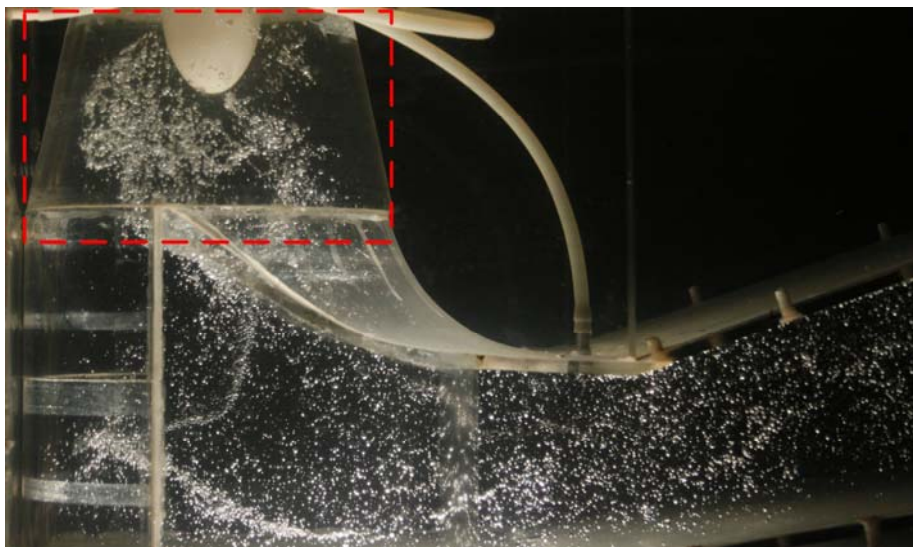


Рис. 1. Модель отсасывающей трубы Turbine-99



Рис. 2. Коническая модель отсасывающей трубы

конфигурации для определения частоты прецессии найденную частоту необходимо разделить на два.

На второй экспериментальный стенд установлен канал с симметричной геометрией, которая моделирует только конус отсасывающей трубы (см. рис. 2). Рабочий участок

состоит из закручивающего устройства и прозрачного конического канала. Основной задачей закручивающего устройства является воспроизведение условий для формирования распределения скоростей в модели, подобного полю течения за рабочим колесом реальной гидротурбины [10]. Закру-

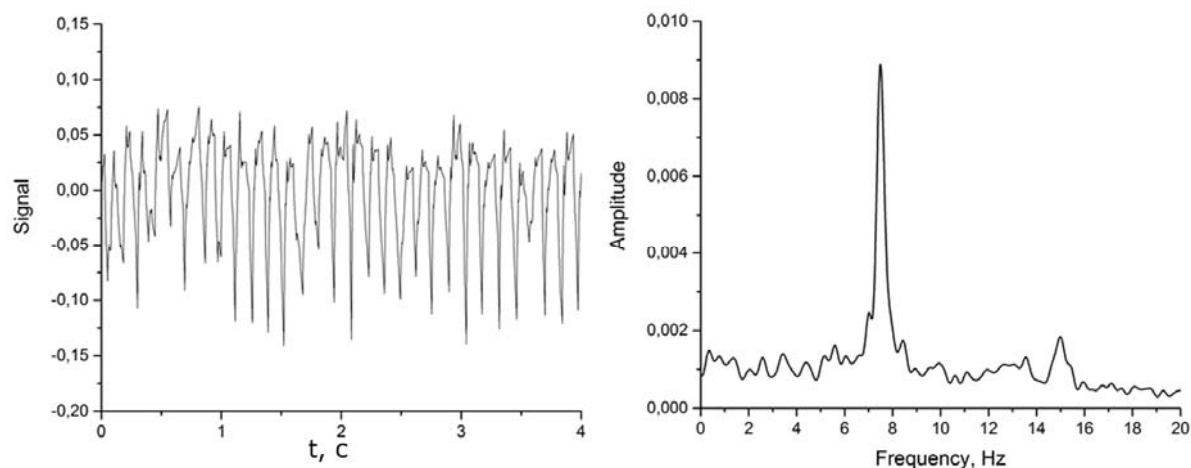


Рис. 3. Пульсации давления, регистрируемые гидрофоном (слева), Фурье-спектр сигнала справа $Q \sim 50 \text{ м}^3/\text{ч}$

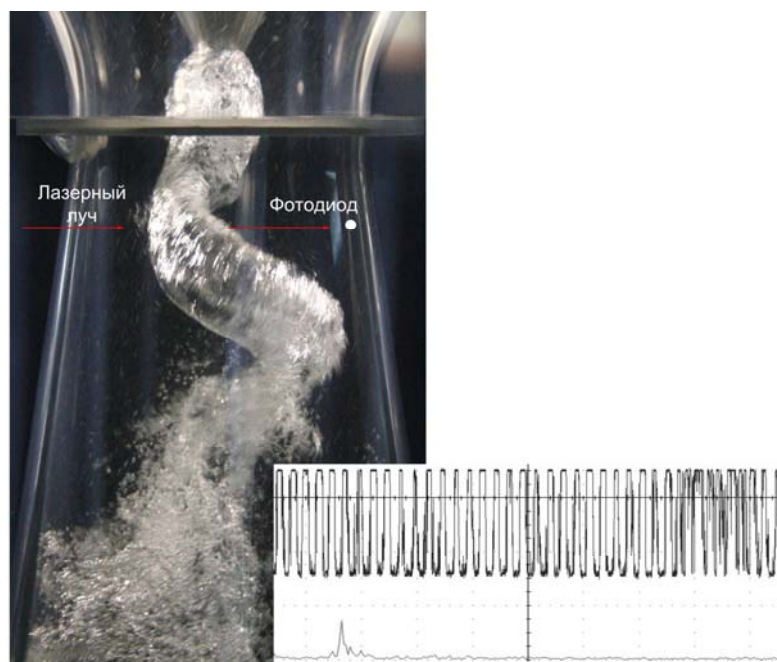


Рис. 4. Оптическая схема измерения частоты прецессии

чивающее устройство состоит из пары завихрителей – неподвижного направляющего аппарата с конструктивным параметром крутки $S = 1,1$ и свободно вращающегося рабочего колеса. Такая комбинация завихрителей обеспечивает распределение осевой и тангенциальной компонент скорости в модели, достаточно близкое к распределению потока под рабочими колесами натурных гидротурбин. Для моделирования кавитации в рабочем участке, гидродинамический контур оснащен вакуумным насосом, соз-

дающим дополнительное разрежение до 96 кПа.

Прецессия вихревого жгута анализировалась с помощью оптической системы, механизм работы которой основан на регистрации фотоприемником лазерного луча, прерываемого жгутом один раз за каждый период прецессии (рис. 4). Таким образом, момент пересечения луча лазера вихрем соответствует нижнему уровню сигнала с фотоприемника. Полученный сигнал также был обработан посредством быстрого Фу-

рье-преобразования, что позволило определить частоту прецессии вихря.

Высокоскоростная визуализация

Сложность быстропротекающего процесса и высокий уровень турбулентности затрудняют непосредственный визуальный анализ протекающих процессов. Для детального изучения структуры нестационарного закрученного потока использовалась высокоскоростная камера pco.1200 hs, позволяющая регистрировать изображения с частотой до 600 кадров в секунду.

В модели Turbine-99 визуализация потока осуществлялась с помощью мощного источника света, который преломлялся на гра-

нице пузырьков воздуха, засасываемых в поток естественным образом и концентрирующихся в области пониженного давления. В конической модели вихревой жгут визуализировался кавитационной каверной. Ниже приведен ряд изображений, полученный при разбиении видеофрагмента высокоскоростной съёмки.

На серии кадров представлено несколько оборотов вихря в различных фазах, за которые происходит переход конфигурации вихря от одно- к двуспиральной моде и обратно (рис. 5). Подобная эволюция была зафиксирована в обоих рабочих участках.

Структура вихревого жгута крайне неустойчива, она периодически меняется между одним или двумя переплетенными винто-

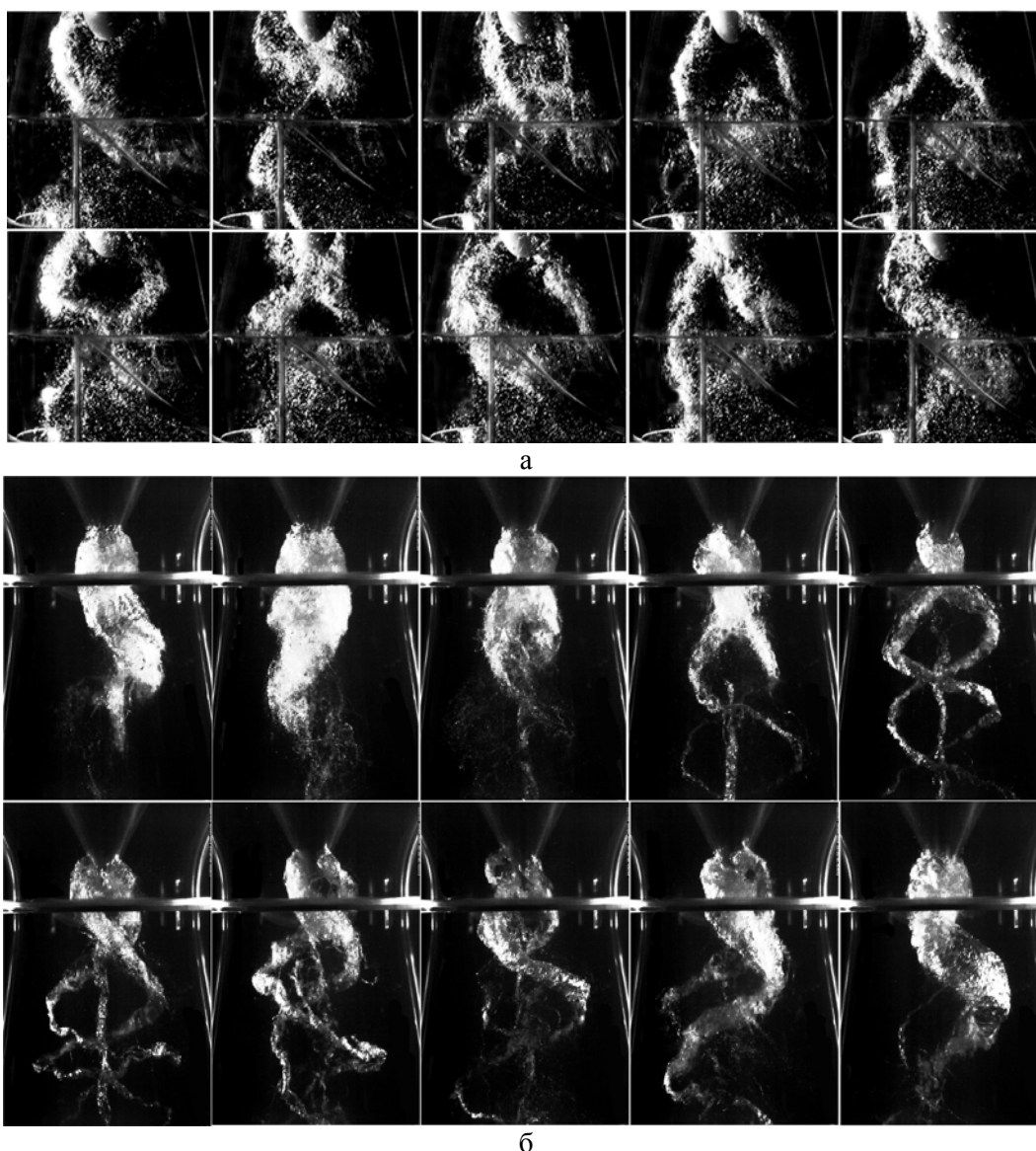


Рис. 5. Визуализация перехода между одинарным и двойным вихревыми кавитационными жгутами: а – в модели Turbine-99; б – в конической модели отсасывающей трубы

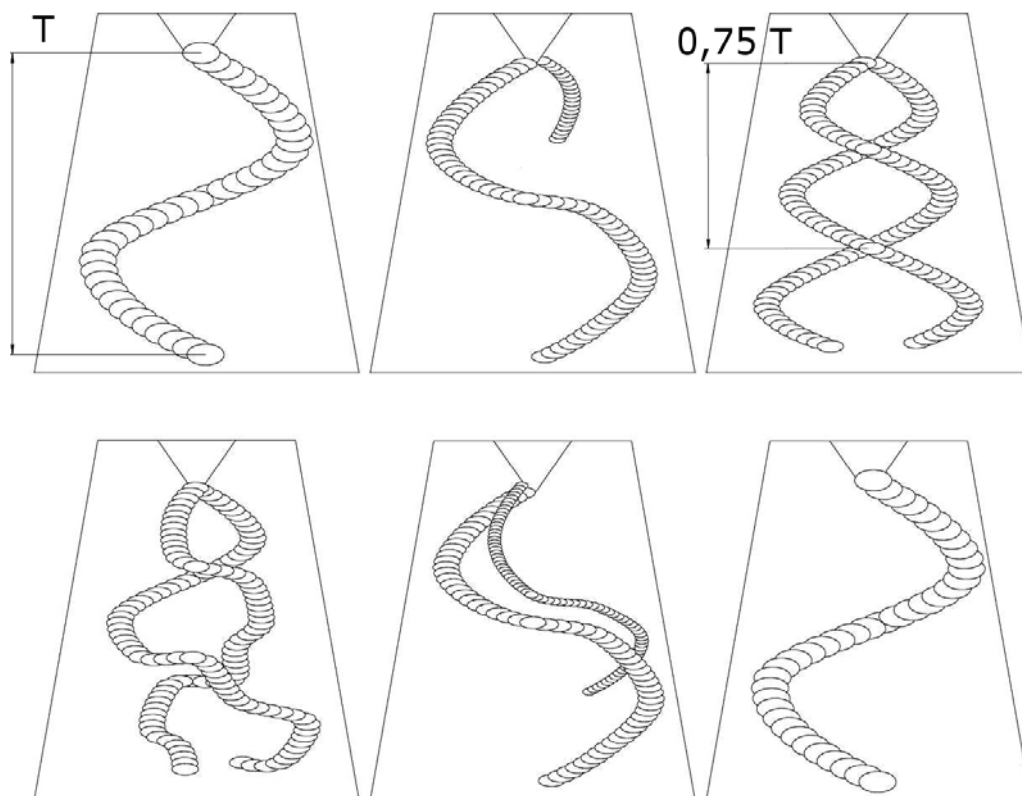


Рис. 6. Схема перехода «односпиральный – двойной – односпиральный вихрь»

выми вихрями. Направление прецессии как одиночного, так и двойного вихря совпадает с направлением закрутки потока, причем обе конфигурации вихрей являются левовинтовыми (ход винта противоположен закрутке потока, [11]). Практически во всем диапазоне расходов, где удалось зафиксировать переход одинарного вихря в двойной, преобладает режим одиночного жгута, в то время как режим двойного жгута оказался менее стабильным. Подобное изменение конфигурации – периодическая смена одной и двухжгутовых мод – было получено в работе [12] при численном моделировании закрученного потока с использованием RSM-модели.

Схема, представленная на рис. 6, наглядно демонстрирует полный переход от односпиральной моды к двуспиральной и обратно. Данная схема построена из покадрового анализа высокоскоростной визуализации на двух рабочих участках. В некоторый момент времени одинарный вихревой жгут начинает немного утончаться, а в противоположном азимутальном положении формируется

второй вихрь. Второй вихрь на начальной стадии имеет слабовыраженную ось, что позволяет отличать его от первого вихря. После нескольких периодов вращения второй жгут приобретает четкую спиралевидную форму, идентичную геометрии первого вихря, что делает невозможным отличить один вихрь от другого. Оба жгута вращаются с одинаковой угловой скоростью. Из анализа кадров видно, что период у двух сформировавшихся жгутов уменьшается примерно в 1,35 раза по сравнению с периодом прецессии одинарного вихря. Затем вследствие неустойчивости спиралевидная форма вихрей искажается, симметрия структуры нарушается. В результате этого один из вихревых жгутов становится более мощным, а другой утончается и смещается вверх по обтекателю выше первого жгута.

Угловые скорости обоих вихрей начинают изменяться, противоположное азимутальное положение вихрей при этом нарушается, вихри сближаются и объединяются в один вихревой жгут, который прецессирует далее с исходным периодом.

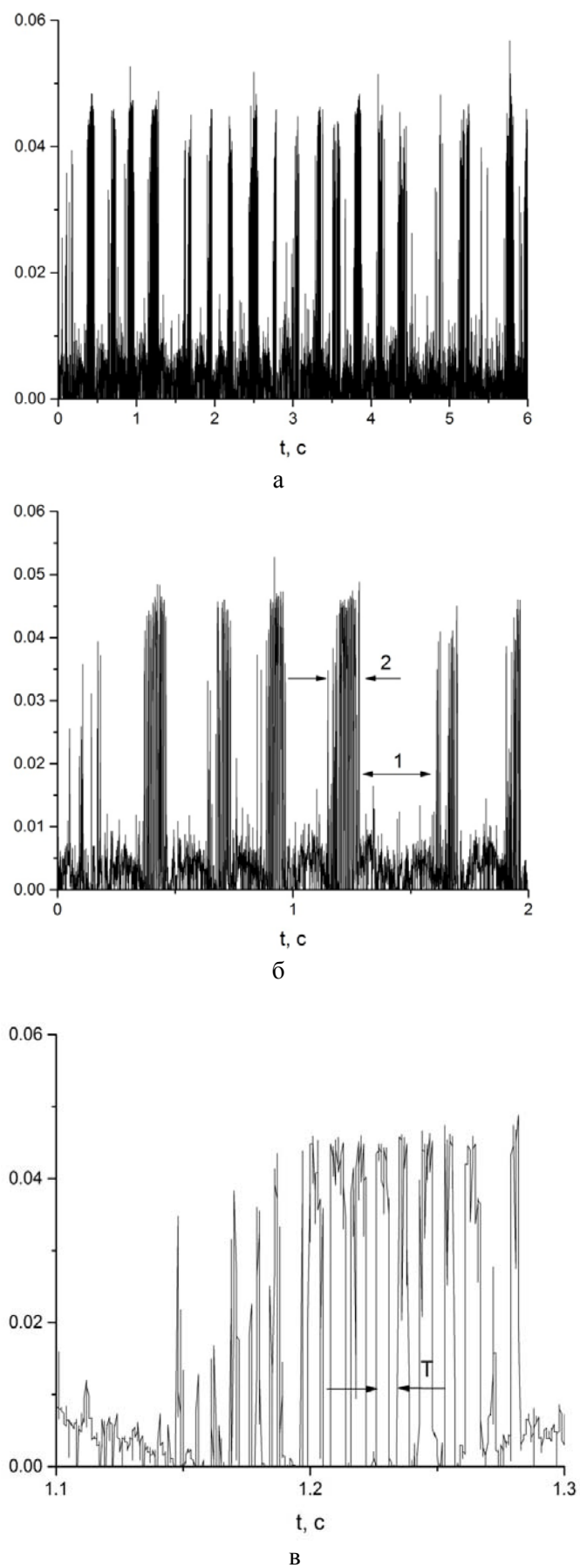


Рис. 7. Сигнал, регистрируемый фотодиодом

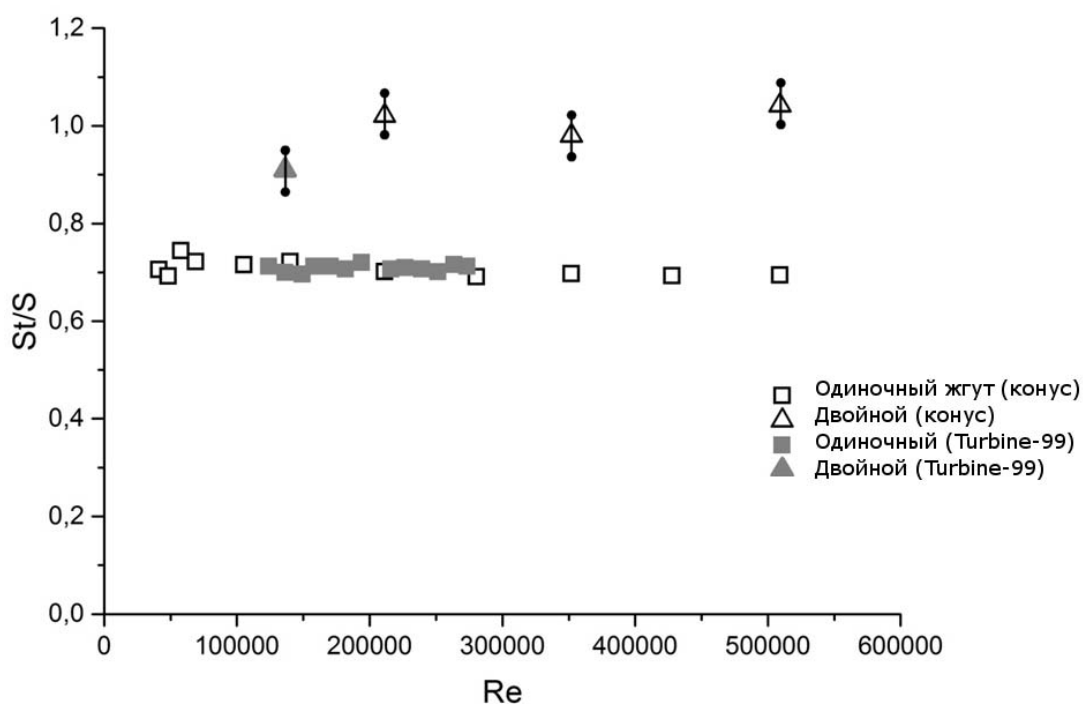


Рис. 8. Зависимость числа Струхала от числа Рейнольдса

Пример теоретического описания взаимодействия пары вихрей имеется в монографии [11]. В данной работе описываются результаты расчетов поведения вихревых жгутов с одинаковыми циркуляциями при разном начальном расположении относительно друг друга. Было обнаружено, что при некотором критическом расстоянии между ними вихри начинают «зацепляться» друг за друга, после чего объединяются. Можно предположить, что аналогичный эффект ответственен за переход от режима с прецессирующей парой вихрей к режиму с одинарным ПВЯ.

Периодичность перехода конфигурации от односпиральной моды к двуспиральной была исследована на конической модели с использованием оптической системы, состоящей из лазерного источника и фотодиода (см. рис. 4). Лазерный луч был направлен через ось диффузора так, что в двуспиральном режиме оба жгута одновременно пересекали траекторию луча дважды за один период прецессии, а в односпиральном жгут всегда пересекал траекторию луча, и фотодиод регистрировал только уровень внешнего освещения. Данные измерений представлены в трех временных масштабах (рис. 7).

На рис. 7, а приведен сигнал с фотодиода, зарегистрированный в течение 6 с при расходе $120 \text{ м}^3/\text{ч}$ и дополнительном разрежении в контуре 60 кПа. Высокий уровень сигнала (0,05) соответствует двуспиральной моде, а низкий уровень ($\sim 0,015$) – односпиральной. Частота смены конфигурации между одно- и двуспиральными модами составила $\sim 3,5$ Гц.

На рис. 7, б часть сигнала приведена в увеличенном масштабе. Длительность двуспиральной моды составляет $\sim 25\%$ периода перехода конфигурации, односпиральной $\sim 75\%$, а их соотношение $T_2/T_1 = 0,35$. Таким образом, преобладает односпиральный режим, а двуспиральный является менее устойчивым.

При дальнейшем увеличении масштаба сигнала (рис. 7, в), можно видеть, что луч лазера при двуспиральном режиме периодически прерывается скрещенными жгутами. Частота этих прерываний соответствует двойной частоте прецессии. Для верификации примененного оптического метода были проведены тестовые измерения пульсаций давления в потоке с использованием пьезоэлектрического датчика (гидрофона). Разница в измерениях частоты прецессии опти-

ческим и гидроакустическим датчиками не превышала 5 %.

На рис. 8 данные по частоте прецессии представлены с использованием безразмерных параметров – числа Струхалия, St , и числа Рейнольдса, Re . Число St является одним из основополагающих критериев подобия в нестационарных (колебательных) процессах в жидкостях и газах. St и Re вычисляются с использованием гидравлического диаметра D_r на входе в коническую часть моделей:

$$St = \frac{f \cdot D_r \cdot \Sigma}{Q},$$

$$Re = \frac{Q \cdot D_r}{\nu \cdot \Sigma},$$

где f – регистрируемая частота пульсаций; Σ – площадь сечения на входе в коническую часть моделей; Q – объёмный расход; ν – кинематическая вязкость среды.

Известно, что число Струхалия линейно зависит от параметра крутки потока [11], поэтому в качестве определяющего параметра использовалось отношение St/S , позволяющее обобщить результаты, полученные на разных гидравлических моделях.

Из рис. 8 следует автомодельность числа Струхалия в исследуемом диапазоне чисел Рейнольдса. Можно также видеть, что данные для разных установок достаточно хорошо обобщаются в координатах Re – St/S . Отношение значений St для двойного и одинарного вихревых жгутов примерно равно 1,2 в случае модели Turbine-99 и 1,35 в случае конической модели отсасывающей трубы.

Выводы

В данной работе представлены результаты экспериментального моделирования ПВЯ на двух лабораторных установках с рабочими участками разной геометрии. Использование техники высокоскоростной съёмки позволило детально проследить переход односпирального вихревого жгута к двуспиральному на двух различных установках. В случае конической отсасывающей трубы период двуспирального вихря в 0,75 раза меньше периода односпирального вихря, а частота его прецессии в 1,35 раза больше. В случае модели Turbine-99 частота прецессии двойного вихря в 1,15 раз больше одинарного вихря. На основе покадрового анализа скоростной визуализации была вы-

явлена последовательность циклического перехода между модами. Обнаружен режим периодической смены мод с частотой порядка 3,5 Гц с длительностью существования двойной моды 0,35 относительно одинарной. Из зависимостей числа St от Re следует автомодельность St как для одинарного, так и для двойного вихря.

Список литературы

1. *Fu-jun Wang, Xiao-qin Li, Jia-mei Ma, Min Yang, Yu-liang Zhu.* Experimental Investigation of Characteristic Frequency in Unsteady Hydraulic Behaviour of a Large Hydraulic Turbine // *Journal of Hydrodynamics*. Ser. B. 2009. Vol. 21. Iss. 1. P. 12–19.
2. *Jonsson P. P., Mulu B. G., Cervantes M. J.* Experimental investigation of a Kaplan draft tube. Part II: Off-design conditions // *Applied Energy*. 2012. Vol. 94. P. 71–83.
3. *Susan-Resiga R. F., Muntean S., Avellan F., Anton I.* Mathematical modeling of swirling flow in hydraulic turbines for the full operating range // *Applied Mathematical Modeling*. 2011. Vol. 35. Iss. 10. P. 4759–4773.
4. *Yulin Wu, Shuhong Liu, Hua-Shu Dou.* Numerical prediction and similarity study of pressure fluctuation in a prototype Kaplan turbine and the model turbine // *Computers & Fluids*. 2012. Vol. 56. P. 128–142.
5. *Tony L. Wahl* Draft Tube Surging Times Two: The Twin Vortex Phenomenon // *Hydro Review*. 1994. February. P. 60–69.
6. *Skotak A., Mikulasek J., Troubil P.* Unsteady flow in the draft tube with elbow // 10th International Meeting of the Work Group on The Behaviour of Hydraulic Machinery under Steady Oscillatory Conditions. Trondheim, Norway, 2001.
7. *Michihiro Nishi, Shuhong Liu.* An Outlook on the Draft-Tube-Surge Study // *International Journal of Fluid Machinery and Systems*. 2013. Vol. 6. No. 1.
8. *Dörfler P., Sick M., Coutu A.* Flow-Induced Pulsation and Vibration in Hydroelectric Machinery. London, England: Springer Ltd, 2014.
9. *Engström T. F., Gustavsson L. H., Karlsson R. I.* Turbine-99 // Workshop 2 on draft tube flow Proc. of the XXI IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems. Lausanne, Switzerland, 2001.
10. *Susan-Resiga R. F., Muntean S., Tanasa C., Bosioc A.* Hydrodynamic Design

and Analysis of a Swirling Flow Generator // Proceedings of the 4th German – Romanian Workshop on Turbomachinery Hydrodynamics (GRoWTH). Stuttgart, Germany, 2008,

11. Алексеев С. В., Куйбин П. А., Окулов В. Л. Введение в теорию концентрированных вихрей: Монография. Новосибирск, 2003. С. 420–424.

12. Stefan D., Rudolf P., Muntean S., Susan-Resiga R. F. Structure of flow fields downstream of two different swirl generators // Engineering Mechanics. 2013. Vol. 20. No. 5. P. 339–353.

Материал поступил в редколлегию 11.03.2015

S. G. Skripkin, M. A. Tsoy, S. I. Shtork

*Institute of Thermophysics SB RAS
2 Kutateladze Str., Novosibirsk, 630090, Russian Federation*

*Novosibirsk State University
2 Pirogov Str., Novosibirsk, 630090, Russian Federation*

Skryp91@mail.ru, miketsoy@gmail.com, shtork@itp.nsc.ru

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF DOUBLE PRECESSING VORTEX ROPE FORMING IN DRAFT TUBE MODELS

This work is devoted to the experimental research of the flow structure in draft tube models of hydro turbines. Precessing vortex core was formed using fixed swirler in a flow such as observed in natural hydro turbines under off-design conditions. In laboratory conditions it has been able to find the effect of the transition between single- and double- vortex rope. Their frequency characteristics have been measured in the range of Reynolds numbers $5 \cdot 10^4$ – $5 \cdot 10^5$. Based on the analysis of data high-speed shooting the mechanism of complete transition between single and double vortex modes was investigated in detail. The investigation of this phenomenon is of particular interest for the design and operation of hydraulic turbine equipment due to off-design pressure pulsations with sudden changes in frequency and amplitude in a flow occurring.

Keywords: precessing vortex core, draft tube, swirling flow, pressure pulsations.