

**ФОРМИРОВАНИЕ РЕЖИМОВ С ПОВЫШЕННЫМ УРОВНЕМ ПУЛЬСАЦИЙ В МОДЕЛИ ОТСАСЫВАЮЩЕЙ ТРУБЫ FRANCIS-99****И.В. ЛИТВИНОВ\*\*\*, А.С.МИТРЯКОВ\*\*\*, С.И.ШТОРК\*\*\*****\* Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск****\*\*Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, г. Новосибирск**

*Работа посвящена изучению формирования режимов с повышенным уровнем пульсаций в воздушной модели отсасывающей трубы геометрии Francis-99. Вариация распределений скорости на входе в модель охватывала 866 режимов по изменению условий загрузки гидротурбины. В том числе режимы с максимальными когерентными пульсациями давления на стенках модели. В работе использованы контактный и бесконтактный методы: измерения пульсаций давления на стенках модели с помощью акустических датчиков, а также измерения осредненных распределений скорости с помощью лазерно-доплеровского анемометра «ЛАД-Оби». Анализ результатов показал, что в конусе модели возникают режимы с формированием прецессирующего вихревого жгута, сопровождающиеся резким увеличением амплитуды когерентных пульсаций давления на стенке и перестроением поля скорости. Показано, что формирование жгута возникает при увеличении интегрального параметра крутки до  $S > 0,5$ .*

**Ключевые слова:** *отсасывающая труба, Francis-99, лазерно-доплеровский анемометр (ЛДА), вихревой жгут, ПВЯ.*

**Введение**

В условиях растущего энергопотребления современного человека к гидроэлектростанциям предъявляются повышенные требования. Это связано с тем, что выработку электроэнергии необходимо регулировать, учитывая возрастание и убывание уровня нагрузки электросети. В результате варьирования нагрузки генератора рабочее колесо гидротурбины испытывает кратковременные изменения частоты вращения, вследствие чего поток за ним становится закрученным. Это приводит к формированию нестационарных режимов течения, при которых формируется вихревая неустойчивость закрученного потока за рабочим колесом, известная как прецессирующий вихревой «жгут» или прецессирующее вихревое ядро (ПВЯ) [1–3]. Этот эффект вызывает мощные периодические пульсации давления, распространяющиеся по всему столбу воды из-за присутствия поворотного колена в водоотводящем тракте ГЭС (отсасывающей трубе) [4]. Частота вращения вихря является достаточно низкой и лежит в одном диапазоне с собственными частотами конструкции гидроагрегата, что может привести к резонансу и неконтролируемым вибрациям [5]. Помимо угрозы повреждения оборудования и снижения эксплуатационных характеристик, этот эффект может приводить к снижению КПД гидротурбины [6]. Подобные обстоятельства выделяют эффект ПВЯ как важную и актуальную проблему гидроэнергетики и гидродинамики.

На сегодняшний день компьютерное моделирование является основным инструментом для моделирования сложного трехмерного нестационарного течения в проточной части гидротурбины [7,8]. Однако численные методы нуждаются в верификации экспериментальными данными. Поскольку проведение экспериментов на натуральных установках затруднено или невозможно, то для целей верификации

численных методов, как правило, используются уменьшенные лабораторные модели проточной части гидротурбины. Для упрощения проектирования модели в качестве рабочей среды вместо воды может использоваться воздух [9,10]. Необязательно также повторять весь гидравлический тракт гидротурбины, чтобы задать распределение скорости, реализующееся за реальной гидротурбиной. Можно использовать комбинацию двух завихрителей со специальным профилем лопаток. Например, в работе [11] представлен метод, позволяющий с помощью комбинации неподвижного и вращающегося лопаточных завихрителей воспроизводить распределения скорости на входе в модель отсасывающей трубы, весьма близкие к распределениям скорости за натурной радиально-осевой турбиной Френсиса.

На сегодняшний день причины формирования ПВЯ до конца не изучены. Также не выявлена однозначная связь между распределениями скорости за рабочим колесом и уровнем пульсаций давления, вызванных ПВЯ. В этом контексте, в настоящей работе исследованы режимы течения с сильными пульсациями давления в модели отсасывающей трубы гидротурбины, показана вихревая природа этих пульсаций и связь с эффектом ПВЯ. Анализ скоростных распределений позволил выявить индикаторы формирования ПВЯ при варьировании входных параметров экспериментального стенда.

#### **Экспериментальный стенд**

Как уже упоминалось, с помощью комбинации двух лопаточных завихрителей можно сформировать распределение скорости близкое к тому, которое реализуется за реальным рабочим колесом, избегая при этом необходимости воспроизведения всего тракта гидротурбины. Данный подход не только существенно упрощает и удешевляет создание экспериментального стенда, но и дает дополнительные возможности для расширения диапазона изменения входных условий в отсасывающую трубу. В том числе могут быть получены и исследованы режимы, которые невозможно пока реализовать на существующих конструкциях гидротурбин, но они являются перспективными в плане снижения уровня пульсаций и повышения энергетической эффективности.

В данных исследованиях использовалась пара завихрителей, геометрия которых представлена в работе [12]. Лопатки были спроектированы для оптимального режима работы гидротурбины Френсиса и рассчитаны на объемный расход  $Q_c = 48,5$  л/с и частоту вращения завихрителя  $n_c = 40,5$  Гц. Набор завихрителей был изготовлен методом быстрого прототипирования с использованием 3D-принтера *CubeXDuo*. В качестве конструкции отсасывающей трубы (ОТ) для турбины Френсиса была выбрана модельная геометрия «Francis-99», которая широко используется для проверки численных расчетов [13].

Эксперименты проводились на аэродинамическом стенде с рабочим участком, также изготовленном методом быстрого прототипирования (рис. 1).

Воздушный поток генерировался при помощи воздуходувки с номинальным расходом и напором  $Q_{max} = 550$  м<sup>3</sup>/ч,  $P = 0,4$  атм. соответственно. Расход воздуха в аэродинамическом контуре регулировался с помощью частотного преобразователя и измерялся ультразвуковым расходомером. Воздушный поток подавался в проточную часть рабочего участка по шести осесимметричным патрубкам и проходил пару выравнивающих решёток, затем поток дополнительно выравнивался с помощью профилированного сопла. Первоначальная крутка сообщалась потоку на стационарном завихрителе (направляющий аппарат), далее вращающийся завихритель (рабочее колесо) перераспределял крутку, тем самым моделируя нужное распределение скорости на входе в отсасывающую трубу. Сервопривод приводил во вращение рабочее колесо с частотой в пределах от 0 до 50 Гц.

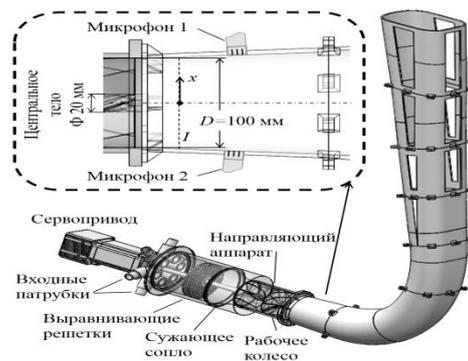


Рис. 1. Схема экспериментальной установки (во вкладке показано расположение измерительных микрофонов и измерительного сечения  $I$ , отстоящего от задней кромки центрального тела на 4 мм;  $D$  – входной диаметр конической части отсасывающей трубы)

Режимные параметры, расход  $Q$  и частота вращения  $n$  задавались с точностью 1,5 и 0,5% с помощью оригинального программного обеспечения, осуществлявшего управление с обратной связью.

Для регистрации пульсаций давления использовались акустические датчики на основе микрофонов *Behringer ECM 8000*, сигналы от которых оцифровывались с помощью АЦП *L-CardE-440*. Для измерения профилей осреднённой и среднеквадратичных пульсаций скорости потока использовалась система лазерного доплеровского анемометра «ЛАД-06и». В качестве трассеров использовались частицы аэрозоля парафинового масла, производимого с помощью атомайзера Ласкина, который позволяет получать капли с характерным размером 1–3 мкм [14].

### Результаты

Начальным этапом работы было определение режимов с максимальными пульсациями давления, которые появляются в конусе ОТ при отклонении от расчетного режима ( $Q_c$  и  $n_c$ ) за счет генерации прецессирующего вихревого жгута. Расчетные параметры, соответствующие оптимальному режиму работы гидротурбины, взяты из работы [12]. В процессе экспериментов два акустических датчика размещались на середине конуса с противоположных сторон заподлицо со стенками конуса (рис. 1). Режимные параметры стенда изменялись в пределах по расходу от 0,39 до  $1,23Q_c$  и по частоте вращения рабочего колеса от 0,2 до  $1,23n_c$ . Сигнал с датчиков записывался в течение 10 секунд с частотой дискретизации 2 кГц.

На рис. 2 показана диаграмма, построенная на основе результатов измерений для 866 режимов работы установки, соответствующих неоптимальным условиям. На диаграмме показаны уровни максимальной амплитуды в спектрах разностного сигнала двух датчиков в зависимости от расхода и частоты вращения рабочего колеса. Разностный сигнал использовался чтобы усилить вклад от прецессирующего вихря и подавить синфазную составляющую пульсаций, источником которой являются посторонние шумы аэродинамического контура. Можно видеть, что в верхней левой части диаграммы имеется область, соответствующая высоким уровням пульсаций давления.

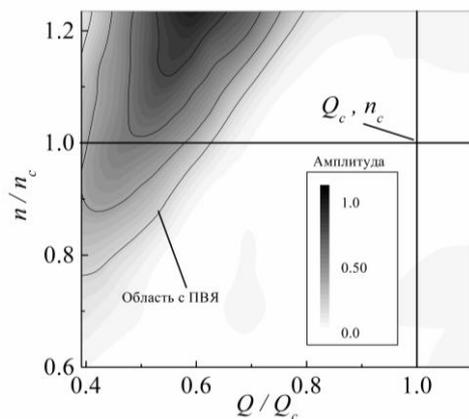


Рис. 2. Зависимость уровня пульсаций от режимных параметров  $Q$  и  $n$ . Шкала приведена в относительных единицах

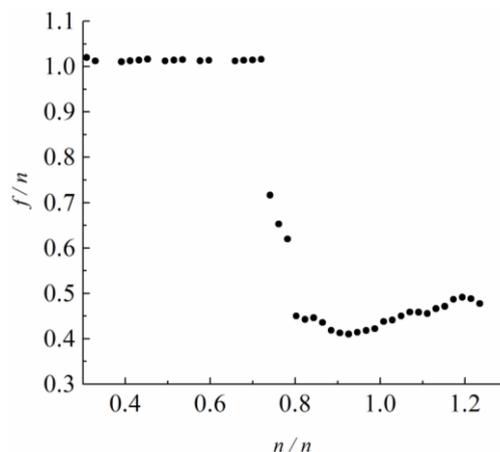


Рис. 3. Зависимость частоты максимальной амплитуды в спектре разностного сигнала двух датчиков от частоты вращения завихрителя

Эти пульсации вероятнее всего вызваны прецессирующим вихревым ядром, которое образуется в конусе отсасывающей трубы при неоптимальных режимах. На рис. 3 показана зависимость частоты максимальной амплитуды в спектре разностного сигнала микрофонов от частоты рабочего колеса при фиксированном расходе  $0,59Q_c$ . Как видно из этого рисунка, до частоты  $0,75n_c$  в спектрах доминирует пик, соответствующий частоте вращения завихрителя  $n$ . Затем, начиная с частоты вращения  $0,8n_c$ , в спектре начинает доминировать частота порядка  $0,42n$ , связанная с развитием вихревой неустойчивости в виде ПВЯ. При дальнейшем увеличении частоты вращения доминирующая частота медленно растет.

На рис. 4 изображена эволюция спектров разностного сигнала для различных расходов при фиксированной частоте вращения  $n_c$ . Видно, что доминирующий в спектрах пик, который ассоциируется с частотой вращения прецессирующего вихря, сначала увеличивается по уровню начиная с расхода  $0,39Q_c$ , достигает максимума при расходе  $0,49Q_c$ , а затем при расходе  $0,79Q_c$  полностью исчезает из спектра.

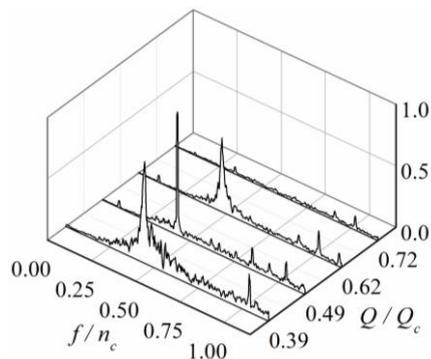


Рис. 4. Каскадная диаграмма спектров разностного сигнала двух акустических датчиков. Вертикальная ось дана в относительных единицах

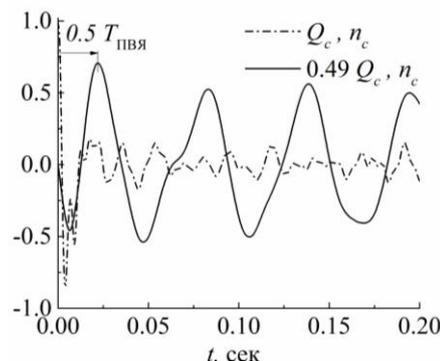


Рис. 5. Кросскорреляционные функции для различных режимов  $Q$  (по оси ординат отложены относительные единицы)

Для подтверждения, что именно прецессирующее движение вихря дает наибольший вклад в пульсации давления в случае неоптимальных режимов, на рис. 5 представлены кросскорреляционные функции, построенные для двух режимов (оптимальный и неоптимальный, с максимальными пульсациями) с расходами  $Q_c$  и  $0,49Q_c$ , соответственно, при постоянной частоте вращения завихрителя, равной  $n_c$ . Видно, что для оптимального режима максимум кросскорреляционной функции, вызванный шумами, присутствует только в нуле, а периодичности кросскорреляционной функции не наблюдается. Для сигнала, соответствующего неоптимальному режиму, максимум функции приходится на  $\frac{1}{2}$  периода ПВЯ. Это связано с тем, что датчики регистрируют возмущения давления в противофазе, т.е. после регистрации одним датчиком импульса давления, вызванного прохождением вихря, через половину периода прецессии ПВЯ происходит регистрация импульса вторым датчиком. Таким образом, в конусе вихрь теряет осевое положение и совершает прецессионное движение, приближаясь попеременно то к одному, то к другому датчику.

Для анализа профилей скорости из всего набора исследованных режимных условий были выбраны расходы, соответствующие 0,41; 0,49; 0,61; 0,72; 0,82; 0,92; 1,03; 1,13 и 1,23  $Q_c$ , при фиксированной частоте вращения завихрителя, равной  $n_c$ . Измерения осреднённых распределений аксиальной и тангенциальной компонент скорости были проведены в контрольном сечении, расположенном на расстоянии 4 мм за телом обтекания. На рис. 6, а показаны профили осредненной аксиальной скорости. Для профилей, соответствующих 0,41 и 0,49  $Q_c$ , видна широкая область возвратного течения и параболическая форма профиля. Это служит хорошим индикатором формирования ПВЯ [15]. При дальнейшем увеличении расхода область возвратного течения сужается до размеров тела обтекания –  $0,2D$  ( $D$  – диаметр входного отверстия конуса ОТ). Распределения тангенциальной скорости характеризуются уменьшением уровня максимальной скорости (рис.6, б). Для режимов 1,13 и 1,23  $Q_c$  наблюдаются области с обратным знаком закрутки.

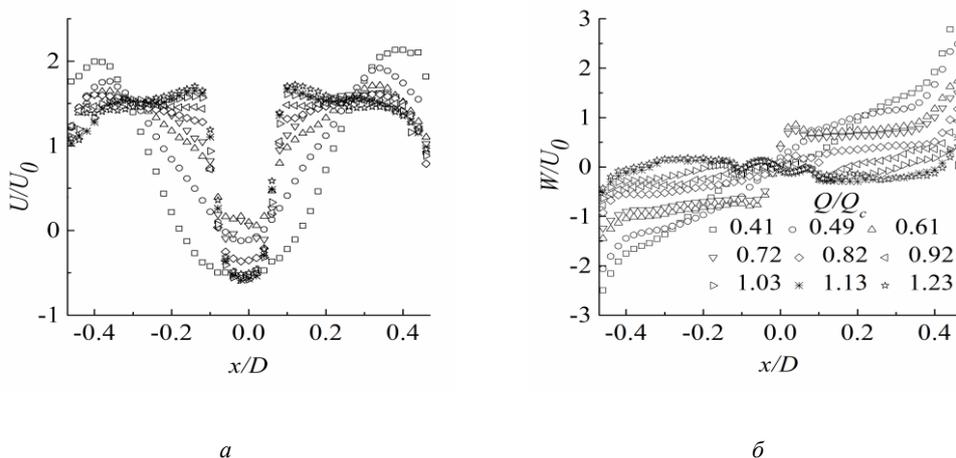


Рис. 6. Профили осреднённой скорости: а – аксиальной, б – тангенциальной компонент

Характерные профили среднеквадратичных отклонений (СКО) аксиальной и тангенциальной компонент скорости показаны на рис.7 для расхода  $0,82Q_c$  и частоты

вращения  $n = n_c$ . По распределениям пульсаций аксиальной скорости видно, что при низких расходах уровень пульсаций достигает  $0,5U_0$ , а при расходе больше  $0,61Q_c$  падает до уровня  $0,2U_0$ . Причем положения максимумов СКО аксиальной скорости изменяются от  $0,2D$  до  $0,1D$ , что связано с перестроением потока и подавлением эффекта ПВЯ за счет сокращения радиуса прецессии вихря. По СКО тангенциальной скорости также видно, что уровень пульсаций изменяется от  $0,63$  до  $0,25 U_0$  при увеличении расхода, а положение максимума тангенциальной скорости смещается к оси вращения потока.

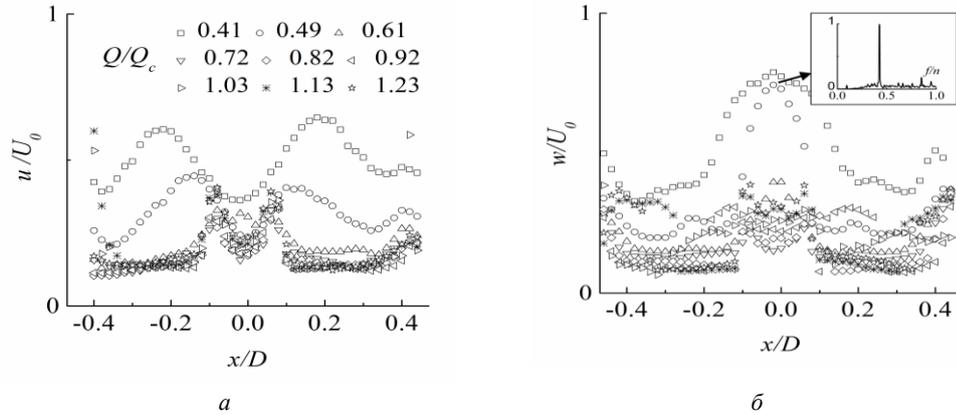


Рис. 7. Профили СКО осреднённой скорости: *a* – аксиальной, *б* – тангенциальной

компонент (во вкладке спектр Ломба для режима  $0,49 Q_c, n_c$ )

Для подтверждения вихревой природы пульсаций приведём спектр пульсаций тангенциальной компоненты скорости вблизи центра конуса. Для построения спектра неэквидистантного сигнала скорости будем использовать алгоритм Ломба [16]. Вкладка рис. 7, *б* показывает относительную амплитуду  $LS$  – спектра Ломба пульсаций тангенциальной компоненты скорости для расхода  $0,49 Q_c$  и частоты вращения  $n_c$ . Наличие узкого пика на частоте ПВЯ коррелирует с соответствующим спектром разностного сигнала, что демонстрирует вихревую природу пульсаций.

Неоптимальные режимы течения за гидротурбиной, отличающиеся сильной остаточной закруткой, можно характеризовать параметром крутки:

$$S = \frac{\int_{\Sigma} W U r d\Sigma}{(D/2) \int_{\Sigma} U^2 d\Sigma},$$

где  $U$  – аксиальная компонента скорости;  $W$  – тангенциальная компонента скорости;  $d\Sigma$  – элемент площади;  $D$  – входной диаметр конуса отсасывающей трубы.

На рис.8 показана зависимость интегрального параметра крутки, рассчитанного по осредненным профилям скорости (рис. 6).

Зависимость с хорошей точностью представляет собой линейную функцию  $S=1,29Q/Q_c+1,35$ . Она обращается в ноль при расходе  $1,04 Q_c$ , который весьма близок к оптимальным условиям, а максимальное значение  $S=0,83$  получено для  $Q=0,41 Q_c$ . Формирование вихревого жгута наблюдалось для  $S>0,5$ , что соответствует известному

из литературы критическому значению, после которого начинается распад вихря, формирование зоны возвратного течения и генерация ПВЯ [1, 17].

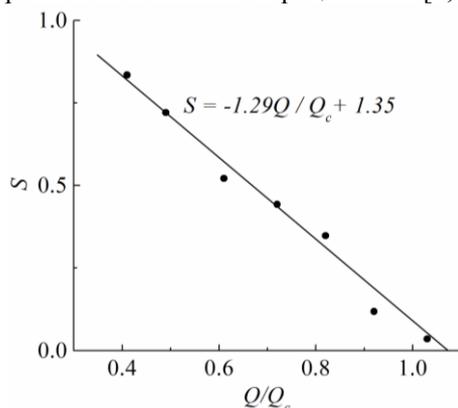


Рис. 8. Зависимость интегрального параметра крутки от расхода для режимов 0,41; 0,49; 0,61; 0,72; 0,82; 0,92; 1,03  $Q_c$  при фиксированной частоте вращения  $n_c$ .

### Заключение

В работе выявлено, что при отклонении от оптимального расчетного режима в область, соответствующую режимам недогрузки реальной гидротурбины, возникает вихревая неустойчивость в виде ПВЯ. Наличие прецессионного движения вихря и его связь с режимом максимальных пульсаций давления в конусе отсасывающей трубы были продемонстрированы с помощью эволюции спектров и анализа кросскорреляционных функций пульсаций давления.

Анализ измеренных профилей осредненной аксиальной компоненты скорости выявил для режимов с формированием ПВЯ наличие обширной области возвратного течения параболической формы. При приближении к оптимальному режиму (увеличении расхода) центральный провал на профилях аксиальной скорости сужается до поперечного размера обтекателя. Тангенциальная компонента скорости вблизи оптимального режима стремится к нулевому значению. Спектры пульсаций тангенциальной скорости подтверждают формирование ПВЯ с частотой прецессии 0,4–0,42  $n_c$  для низких расходов 0,41 и 0,49  $Q_c$ , соответствующих неоптимальным режимам. Рассчитанный по профилям скорости параметр крутки для различных расходов представляет собой линейную зависимость от расхода. При этом повышенный уровень пульсаций, вызванных ПВЯ, и центральная область возвратного течения появляются при  $S > 0,5$ , что соответствует известному из литературы критическому значению, при превышении которого в закрученном потоке происходит распад вихря и генерация ПВЯ.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 14-29-00203).*

### Список обозначений:

- ОТ—отсасывающая труба;
- $D$  – входной диаметр конуса ОТ, 100 мм;
- $f$ – частота в спектре, Гц;
- $f_{ПВЯ}$ – частота в спектре, Гц;
- $n_c$ – расчётная частота вращения, Гц;
- $n$  – частота вращения рабочего колеса, Гц;

$Q$  – расход, л/с;  
 $Q_c$  – расчётный расход, л/с;  
 $S$  – параметр крутки;  
 $U_0$  – средняя расходная скорость, м/с;  
 $U$  – аксиальная компонента средней скорости, м/с;  
 $W$  – тангенциальная компонента средней скорости, м/с.  
 $U$  – среднеквадратичное отклонение аксиальной компоненты скорости, м/с;  
 $w$  – среднеквадратичное отклонение тангенциальной компоненты скорости, м/с.

### Литература

1. Гупта А., Лили Д., Сайред Н. Закрученные потоки. М.: Мир, 1987. 590 с.
2. Cassidy, J. J.U. S. Denver, Colo. U.S. Dept. of the Interior, Bureau of Reclamation, Office of Chief Engineer. 1969. P. 591.
3. Литвинов И.В., Шараборин Д.К., Шторк С.И.// Теплофизика и аэромеханика. 2015. Т. 22. Вып. 5. С. 673 – 676.
4. Deriaz, P. // IAHR Section Hydraulic Machinery, Equipment, and Cavitation, 1<sup>st</sup> Symposium. 1960. P. B-1.
5. Garcia, F.C., & Viveros, C. a M.// Revista Facultad De Ingenieria Universidad De Antioquia. 2010. № 55. P. 90–98.
6. Mulu, B. G., Jonsson, P. P., & Cervantes, M. J.// Applied Energy. 2012. Vol. 93. P. 695–706.
7. Arpe, J., & Avellan, F. // Proceedings of the XX<sup>ist</sup> IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems. 2012. P. 1–10.
8. Marjavaara, B. D.// CFD Driven Optimization of Hydraulic Turbine Draft Tubes using Surrogate Models. Luleå University of Technology. 2002. P. 202.
9. Nishi, M., Yoshida, K., Yano, M., Okamoru, M., Miyagawa, K., Liu, S.// 2nd IAHR International Meeting of the Workgroup on Cavitation and Dynamic Problems in Hydraulic Machinery and Systems. 2007. P. 52-66.
10. Повх Н.Л. Аэродинамический эксперимент в машиностроении. Л.: Машиностроение, 1974. С. 480.
11. Susan-Resiga, R., Muntean, S., & Bosioc, A.// The 4th International Symposium on Fluid Machinery and Fluid Engineering November 24-27, 2008, Beijing, China. 2008. P. 8.
12. Куйбин П.А., Литвинов И.В., Сонин В.И., Устименко А.С., Шторк С.И.// Вестн. Новосиб. гос. ун-та. Серия: Физика. 2016. Т. 11, № 1. С. 56–65.
13. Cervantes M., Trivedi C., H., Dahlhaug O.-G., Nielsen T. Francis-99 Workshop 1: steady operation of Francis turbines. Journal of physics. 2015. P. 579.
14. Tropea, C., Yarin A. L., Foss J.F. Springer Handbook of Experimental Fluid Mechanics. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 2007. P. 1557.
15. Yazbadabi P. A., Griffiths A. J., Syred N.// Exp. In Fluids . 1994. Vol. 17. P. 96 – 106.
16. Витязев, В.В. Анализ неравномерных временных рядов. СПб.: Изд-во С. Петерб. ун-та, 2001. 68 с.
17. Fernandes E.C., Heitor M.V., Shtork S.I.// Exp. Fluids. 2006. Vol. 40, No. 2. Pp. 177-187.

### Summary

*The paper reports on the regimes of flow with high level of pressure pulsations in a laboratory air model of the Francis-99 hydro turbine draft tube. Variation of velocity distributions at the model inlet represented 866 regimes under different conditions of turbine load, including regimes with maximal coherent pulsations of pressure on the model walls. We used contact and contactless methods: acoustic sensors to measure pressure pulsations on the model walls and the laser-Doppler anemometer "LAD-06i" to measure averaged velocity distributions. Analysis of the results showed that in the draft tube cone the precessing vortex core (PVC) is formed. PVC is accompanied by a high increase in the amplitude of the*

*coherent pressure pulsations on the walls and the transformation of the averaged velocity field. It is shown that PVC appears when the integral swirl parameters becomes larger than 0,5.*

*Keywords: draft tube, Francis-99, LDA, vortex rope, PVC.*

*Поступила в редакцию*

*24 октября 2016 г.*

*Литвинов Иван Викторович* – аспирант Новосибирского государственного университета, м.н.с. Института теплофизики им. С.С. Кутателадзе. Тел.: 8(843)330-66-65, 8(952)926-21-28. E-mail: [litvinov@itp.nsc.ru](mailto:litvinov@itp.nsc.ru).

*Митряков Андрей Сергеевич* – магистрант Новосибирского государственного университета, лаборант Института теплофизики им. С.С. Кутателадзе. Тел.: 8(843)330-66-65. E-mail: [andrej.mitryakov@yandex.ru](mailto:andrej.mitryakov@yandex.ru).

*Шторк Сергей Иванович* – д-р физ.-мат. наук, Новосибирского государственного университета, заведующий лабораторией Института теплофизики им. С.С. Кутателадзе. Тел.: 8(843)333-10-94. E-mail: [shtork@itp.nsc.ru](mailto:shtork@itp.nsc.ru).