

УДК 532.5

Численное моделирование режимов закрученного течения в модели гидравлической турбины и отсасывающей трубы*

А.В. Минаков^{1,2}, Д.В. Платонов^{1,2}, А.В. Сентябов^{1,2}

¹Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск

²Сибирский федеральный университет, Красноярск

E-mail: platonov-08@yandex.ru

Выполнено исследование влияния несимметричных граничных условий на режимы течения в модельной гидротурбине. Показано, что изогнутая отсасывающая труба практически не влияет на вихревую структуру, сохраняя такое явление, как перезамыкание вихревого жгута. Также остаются неизменными профили осевой и тангенциальной скоростей. Наблюдается изменение пульсаций давления, несмотря на сходство средних величин и нестационарной вихревой картины течения. В случае несимметричной модели пульсации давления выше, чем для симметричной модели. Это может свидетельствовать о суперпозиции пульсаций, вызванных вращением прецессирующего вихревого ядра с генерируемыми им же продольными (синхронными) колебаниями давления.

Ключевые слова: пульсации давления, турбина Френсиса, перезамыкание, моделирование, ГЭС.

Введение

Вихревые течения, в которых проявляется множество интересных явлений, широко распространены в технических системах и в природе. В качестве наглядного примера можно привести течение за рабочим колесом гидротурбины. В режиме неполной загрузки в турбинах Френсиса и Каплана за рабочим колесом в отводящем диффузорном канале, называемом отсасывающей трубой, образуется сильнозакрученное течение. Неустойчивость закрученного течения в отсасывающей трубе приводит к формированию прецессирующего вихревого ядра (ПВЯ) [1]. Вращение вихревого жгута в отсасывающей трубе гидротурбины генерирует интенсивные низкочастотные пульсации по всему проточному тракту турбины. Вихревой жгут становится нестабильным и время от времени разрушается.

Ввиду высокой сложности течения в проточном тракте ГЭС для экспериментальных исследований зачастую применяются модельные стенды, частично повторяющие проточный тракт гидротурбины [2–5]. В работе [5] использовался стенд, который состоял из направляющего аппарата, вращающегося рабочего колеса и расположенного

* Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФ (код проекта 21-19-00769).

за ним конического диффузора, имитирующего начальный участок отсасывающей трубы. На этом стенде [5] в диапазоне параметра закрутки $S \approx 0 \div 1$ были получены различные режимы течения, включая прецессирующее вихревое ядро и двойной спиральный вихрь. В ходе экспериментов было также обнаружено явление перезамыкания прецессирующего вихревого ядра, происходящее в узком диапазоне чисел закрутки [6, 7].

Исследования течения за рабочим колесом гидротурбины [8, 9] показали влияние поворотного колена на пульсации давления в проточном тракте. В работе [10] было также рассмотрено поведение прецессирующего вихревого ядра в диффузоре и колене отсасывающей трубы: его периодическая перестройка и генерация соответствующих пульсаций давления. Однако вертикальный стенд, описанный в работе [5], не обладает поворотным коленом и является осесимметричным. В настоящей работе для проверки влияния условий на выходе из конического диффузора на закрученное течение в модели гидротурбины выполняется численное моделирование течения в проточном тракте модернизированного вертикального стенда [5]: к нему добавлена часть отсасывающей трубы с поворотным коленом. Сравнение результатов симметричной и несимметричной модели позволит лучше понять степень применимости экспериментальных и расчетных данных о закрученном течении, полученных для исходного стенда, к реальному закрученному течению в проточных трактах гидротурбин. Еще одной целью работы является проверка влияния выходных граничных условий как одного из возможных возмущающих факторов на явление перезамыкания вихревого ядра, которое возникает в узком диапазоне параметров течения ($S \approx 0,4 \div 0,5$) и, соответственно, может быть чувствительно к внешним условиям.

Модель

Исходная симметричная модель основывалась на конфигурации вертикального гидродинамического стенда ИТ СО РАН, в котором закрутка потока создается неподвижным и вращающимся завихрителями (рис. 1). Ротор, имеющий 10 лопастей, рас-

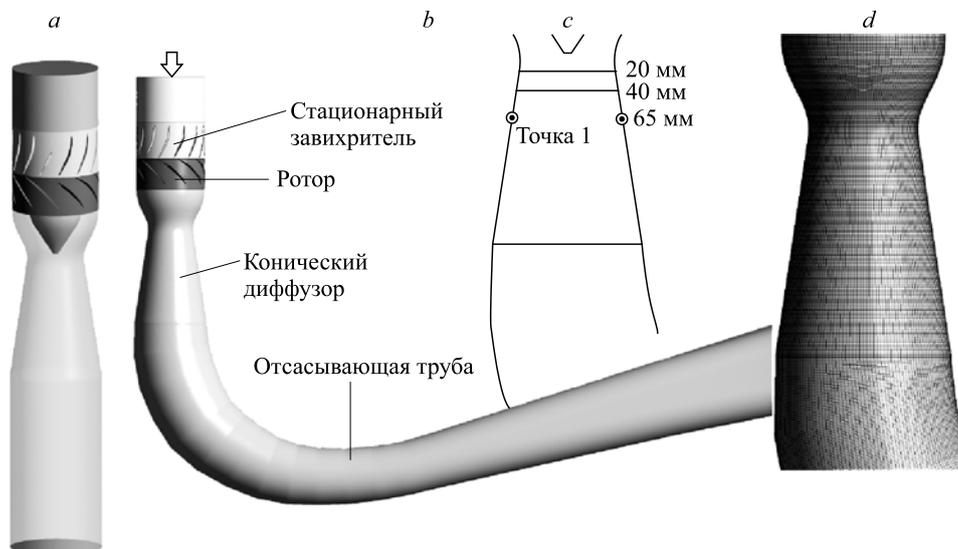


Рис. 1. Геометрия расчетной области.
Симметричная модель (а), несимметричная модель (b),
схема расположения сечений и точек мониторинга (с), расчетная сетка (d).

полагается за направляющим аппаратом, состоящим из 14 лопаток. В исходной (симметричной) версии модели за ротором размещается конический диффузор, а затем прямой цилиндрический канал. Для исследования влияния несимметричности выходных граничных условий на закрученное течение в коническом диффузоре прямой канал, расположенный за ним, был заменен соответствующей частью отсасывающей трубы гидротурбины проекта Francis-99 [11] (см. рис. 1*b*). В качестве граничных условий задавались фиксированный расход воды $Q = 80 \text{ м}^3/\text{ч}$ и частота вращения N . Частота вращения ротора составляла 420, 565 и 500 об/мин и задавала соответственно режим со слабой закруткой, режим с сильной закруткой, в котором реализуется устойчивый прецессирующий вихревой жгут, и режим, в котором реализуется перезамыкание вихревого ядра.

Для расчетов были построены неструктурированные сетки, содержащие 9,6 млн ячеек в случае симметричной модели и 7 млн ячеек для модели с отсасывающей трубой (рис. 1*d*). В обоих случаях сетка в стационарном и нестационарном завихрителях состояла из полиэдральных ячеек, а в коническом диффузоре — из гексаэдральных. Для моделирования турбулентности использовался метод моделирования крупных вихрей (LES, Large Eddy Simulation) с моделью подсеточной вязкости WALE (Wall-Adapting Local Eddy-Viscosity) [12]. Для моделирования вращения ротора применялся метод скользящих сеток, который заключается в поворачивании части расчетной области, включающей ротор, на каждом временном шаге. Такой подход показал хорошую точность для рассматриваемой задачи [13]. Шаг по времени составлял $7 \cdot 10^{-5} \text{ с}$, что соответствовало числу Куранта $C_{\text{CFL}} \leq 1$.

Расчеты проводились в программном комплексе Ansys Fluent. Решение уравнений движения основывалось на методе контрольного объема в рамках приближения несжимаемой жидкости. Для соединения полей скорости и давления использовался алгоритм SIMPLEC (полуявный метод согласованных уравнений, связанных с давлением).

Результаты

Результаты расчетов показывают большое сходство течений в симметричной и несимметричной моделях. В обоих случаях за ротором формируется закрученное течение с небольшой зоной рециркуляции на оси конуса диффузора, что хорошо видно на профилях компонент скорости (рис. 2). Профили как аксиальной, так и тангенциальной компонент скорости в коническом диффузоре для симметричной и несимметричной моделей близки между собой даже в самом конце конического диффузора (рис. 2). Вокруг зоны рециркуляции формируется прецессирующий вихревой жгут (рис. 3).

В работе [13] с помощью численного моделирования было показано появление неустойчивости ПВЯ в режиме $Q = 80 \text{ м}^3/\text{ч}$, $N = 500 \text{ об/мин}$, которая приводит к перезамыканию витков вихревого жгута с образованием вихревых колец. Аналогичное поведение наблюдается и для асимметричной модели с поворотным коленом на выходе из диффузора. Как можно видеть из рис. 3, витки ПВЯ начинают двигаться с разной скоростью, что приводит к их сближению и взаимодействию. Сблизившиеся участки вихревого ядра вытягиваются антипараллельно, смыкаются, и часть вихревого ядра отделяется в виде вихревого кольца.

Спектры пульсаций давления (рис. 4) в точке 1 на стенке конуса отсасывающей трубы (рис. 1*c*) показывают рост пульсаций с увеличением параметра закрутки (и, соответственно, частоты вращения ротора). Симметричная и несимметричная модели при этом

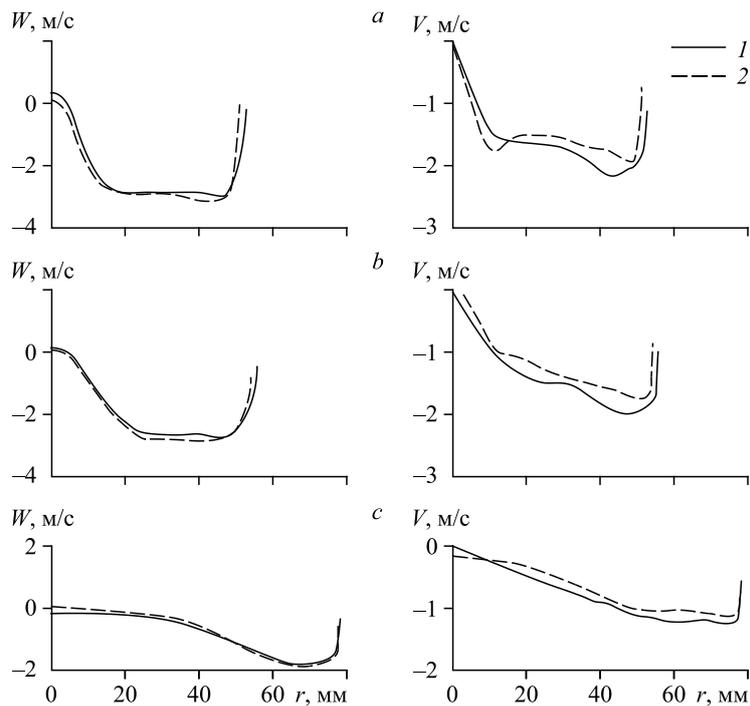
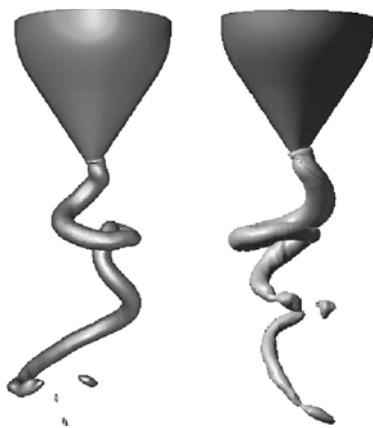


Рис. 2. Аксиальная (левая часть рисунка) и тангенциальная (правая часть рисунка) компоненты скорости в различных горизонтальных сечениях (в мм от горловины диффузора) при $Q = 80 \text{ м}^3/\text{ч}$, $N = 500 \text{ об/мин}$. Сечения: 20 (a), 40 (b), 200 (c) мм; 1 — симметричная модель, 2 — несимметричная модель.

не демонстрируют видимых отличий. В режиме $N = 565 \text{ об/мин}$ хорошо выражена доминантная частота $f \approx 10 \text{ Гц}$, соответствующая прецессии вихревого ядра. В режиме $N = 500 \text{ об/мин}$, соответствующем пере замыканию вихревого ядра, частота прецессии не выделяется так же четко, тем не менее хорошо видны пики пульсаций на частотах вблизи $f \approx 9 \text{ Гц}$. В режиме низкой закрутки $N = 420$, при котором вихревой жгут не формируется, пульсаций давления в диффузоре практически не наблюдается.

В работах [8, 10] было указано на появление продольных (синхронных) составляющих пульсаций давления, вызванных, вероятно, несимметрией проточного тракта, явля-



ющейся следствием наличия поворотного колена [10]. При этом образующиеся синхронные пульсации давления могут распространяться вдоль проточного тракта и складываться в существенные динамические нагрузки на конструктивные элементы ГЭС. В представленном исследовании синхронные пульсации рассчитывались как среднее из давлений на стенке в четырех точках горизонтального сечения

Рис. 3. Визуализация вихря с помощью изоповерхности давления при $Q = 80 \text{ м}^3/\text{ч}$, $N = 500 \text{ об/мин}$. Слева — симметричная модель, справа — несимметричная модель.

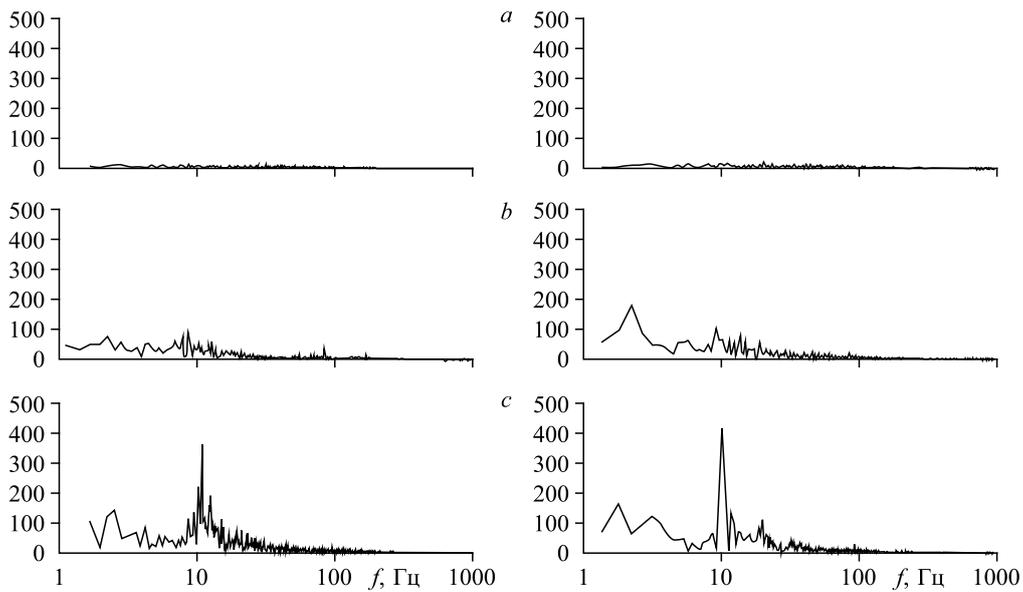


Рис. 4. Спектры пульсаций давления в точке № 1 в симметричной (левая часть рисунка) и несимметричной (правая часть рисунка) моделях для режимов $N = 420$ (a), 500 (b), 565 (c) об/мин.

конического диффузора на расстоянии 65 мм от самого узкого сечения стенда (рис. 1). Спектры синхронных пульсаций (рис. 5) не показывают выделенных частот ни для одного из режимов, при этом в спектре преобладают низкочастотные пульсации. Отсутствие в спектре синхронных пульсаций частоты прецессии свидетельствует о слабом взаимодействии прецессирующего вихревого жгута с коленом отсасывающей трубы. Тем не менее, интенсивность синхронных пульсаций в несимметричной модели в два

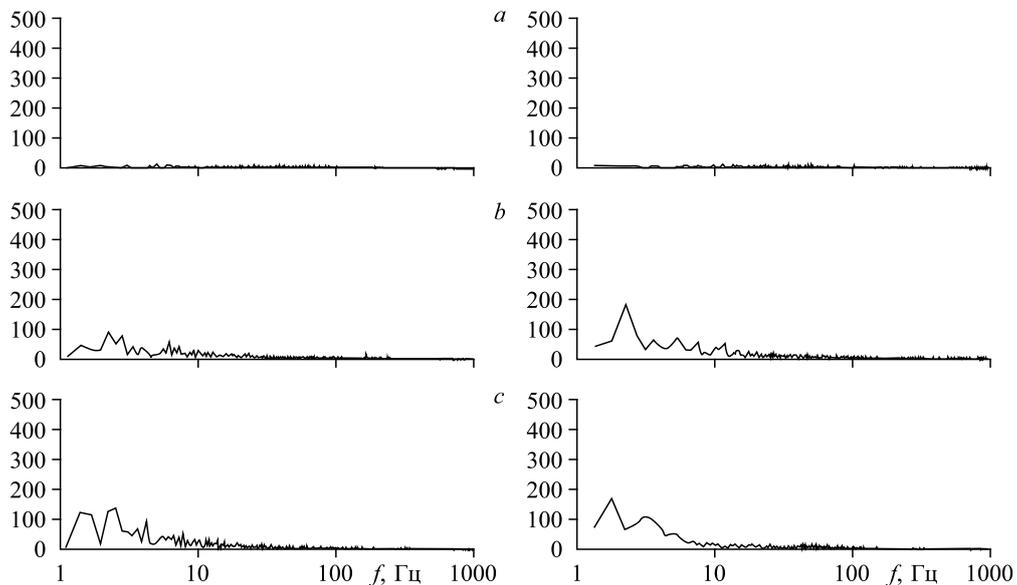


Рис. 5. Спектры синхронных пульсаций давления в точке № 1 в симметричной (левая часть рисунка) и несимметричной (правая часть рисунка) моделях для режимов $N = 420$ (a), 500 (b), 565 (c) об/мин.

Таблица
Среднеквадратичное отклонение синхронного давления (кПа)
в сечении $z = -65$ мм

<i>N</i> , об/мин	Симметричная модель	Несимметричная модель
420	0,3	0,6
500	0,3	0,8
565	0,5	1,1

раза выше, чем в симметричной (см. таблицу).

Заключение

Проведенные численные исследования показывают, что добавление асимметричного выходного канала не меняет режим вихревого течения, кроме того, поле скорости остается тем же самым. Несмотря на то, что режим течения с переключением прецессирующего вихревого ядра наблюдается в довольно узком диапазоне параметра закрутки, при добавлении поворотного колена на выходе из вертикального стенда эта неустойчивость вихревого жгута все еще присутствует. Также практически не меняется поле средней скорости в коническом диффузоре. Тем не менее, несимметричный выход влияет на пульсации давления. Характер пульсаций и доминантные частоты почти не изменяются, но заметно возрастают синхронные пульсации давления. При этом синхронная составляющая не связана напрямую с прецессией вихревого ядра, а отображает низкочастотные колебания.

Список литературы

1. Nishi M., Kubota T., Matsunaga S., Senoo Y. Study on swirling flow and surge in an elbow type draft tube // IAHR Section Hydraulic Machinery, Equipment, and Cavitation (Tokyo). 1980. Vol. 1. P. 557–568.
2. Falvey H.T. Draft tube surges // Report REC-ERC-71-42. Colorado, 1971. 25 p.
3. Cassidy J.J. Experimental study and analysis of draft tube surging // Rep. REC-OCE-69-5, No HYD-591. 1969. 41 p.
4. Kirschner O., Ruprecht A., Göde E. Experimental investigation of pressure pulsation in a simplified draft tube // In proceedings 3rd IAHR Intern. Meeting of the Workgroup on Cavitation and Dynamic Problems in Hydraulic Machinery and Systems, October 14–16, 2009, Brno, Czech Republic. P. 55–64.
5. Skripkin S., Tsoy M., Shtork S., Hanjalić K. Comparative analysis of twin vortex ropes in laboratory models of two hydro-turbine draft-tubes // J. Hydraulic Research. 2016. Vol. 54, No 4. P. 450–460.
6. Алексеев С.В., Куйбин П.А., Шторк С.И., Скрипкин С.Г., Цой М.А. Явление вихревого переключения в закрученном потоке // Письма в ЖЭТФ. 2016. Т. 103, вып. 7. С. 516–521.
7. Skripkin S., Tsoy M., Kuibin P., Shtork S. Swirling flow in a hydraulic turbine discharge cone at different speeds and discharge conditions // Experimental Thermal and Fluid Sci. 100. 2019. P. 349–359.
8. Dörfler P., Sick M., Coutu A. Flow-induced pulsation and vibration in hydroelectric machinery: Engineer's guidebook for planning, design and troubleshooting. London: Springer, 2013. 242 p.
9. Szakal R.A., Doman A., Muntean S. Influence of the reshaped elbow on the unsteady pressure field in a simplified geometry of the draft tube. Energies, 2021. Vol. 14, Iss. 5. P. 1393-1–1393-21.
10. Сентябов А.В., Гаврилов А.А., Дектерев А.А., Минаков А.В. Численное исследование прецессии вихревого ядра в модельной гидротурбине с помощью гибридных методов расчёта турбулентных течений // Теплофизика и аэромеханика. 2014. Т. 21, № 6. С. 739–750.
11. Francis-99 workshops, 2013. Experimental data for a high head Francis turbine model at several operating points. <http://www.ltu.se/research/subjects/Stromningslara/Konferenser/Francis-99>
12. Nicoud F., Ducros F. Subgrid-scale stress modeling based on the square of the velocity gradient tensor // Flow, Turbulence and Combustion. 1999. Vol. 62, No 3. P. 183–200.
13. Platonov D.V., Minakov A.V., Sentyabov A.V., Stork S.I., Skripkin S.G., Lobasov A.S. Investigation of the precessing vortex core reconnection phenomenon // Intern. J. of Heat and Fluid Flow. 2022. Vol. 96. P. 109006-1–109006-18.

*Статья поступила в редакцию 5 июля 2022 г.,
после доработки — 1 августа 2022 г.,
принята к публикации 8 декабря 2022 г.*