

Аннотация.

В ходе эксплуатации гидротурбин возникают нестационарные явления, такие как образование вращающегося вихревого жгута в конусе отсасывающей трубы гидротурбины в режиме неполной нагрузки и образование кавитационных полостей в режиме повышенной нагрузки. Для борьбы с этими явлениями используется впуск воздуха в проточный тракт гидротурбины. В данной работе проведено численное моделирование данного процесса, которое показало, что с увеличением впускаемого воздуха амплитуда пульсаций снижается, а частота не меняется. Также проведено численное моделирование течения в режиме повышенной неполной нагрузки с использованием модели сжимаемой смеси. Полученные результаты могут быть использованы для улучшения работы гидротурбин и повышения их надежности в условиях нестационарных явлений.

Тема работы.

Численное моделирование режима повышенной неполной нагрузки в гидротурбине

Состав коллектива.

- Щербаков Павел Константинович, младший научный сотрудник., Федеральный исследовательский центр информационных и вычислительных технологий.
- Чирков Денис Владимирович, старший научный сотрудник, Институт Теплофизики СО РАН.
- Скороспелов Владимир Анатольевич, старший научный сотрудник, Институт математики СО РАН.

Информация о гранте.

Отсутствует

Научное содержание работы.

Постановка задачи.

В ходе эксплуатации радиально-осевых турбин возникают нестационарные явления, такие как образование вихревых жгутов и кавитационных полостей в режимах повышенной неполной нагрузки. Для борьбы с этими явлениями используется впуск воздуха в проточный тракт гидротурбины. Однако, в режиме повышенной неполной нагрузки сжимаемость имеет ключевое значение, и поэтому было необходимо предложить такую математическую модель, в которой это учитывается. Целью данной работы является разработка

математической модели, позволяющей учитывать сжимаемость воздуха при впуске его в проточный тракт.

Современное состояние проблемы.

Сегодня проблема исследования нестационарных течений в гидротурбинах остается одной из наиболее актуальных в области гидроэнергетики. Специалисты со всего мира работают над разработкой новых методов и технологий, которые позволят более эффективно решать эту проблему.

В настоящее время существует множество подходов к исследованию нестационарных течений в гидротурбинах, включая математическое моделирование, экспериментальные исследования и тестирование на реальных объектах. Каждый из этих подходов имеет свои преимущества и недостатки, и их комбинация может привести к наилучшим результатам.

Современные технологии и инструменты, такие как высокоскоростные камеры, численное моделирование, лазерные измерения скорости и другие, позволяют специалистам получать более точные данные о нестационарных течениях в гидротурбинах и разрабатывать более эффективные решения для их управления и оптимизации.

Подробное описание работы, включая используемые алгоритмы.

Для моделирования течения, предлагается использовать следующую модель движения смеси «жидкость – пар – газ» (1-3), учитывающую сжимаемость фаз и фазовые превращения. При этом, плотность жидкости принимается постоянной, а плотность газа меняется согласно следующему закону:

$$\rho = \left(\frac{P}{K_G}\right)^\gamma \alpha_G + \rho_L(1 - \alpha_G)$$

В этом случае плотность смеси зависит не только от объемных долей компонент, но также принимается во внимание сжимаемость газовой фазы.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \mathbf{v}) = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho \mathbf{v}}{\partial t} + \text{div}(\rho \mathbf{v} \otimes \mathbf{v}) + \nabla \hat{p} = \text{div}(\boldsymbol{\tau}) + \rho \mathbf{f}, \quad (2)$$

$$\frac{\partial \alpha_G}{\partial t} + \text{div}(\alpha_G \mathbf{v}) = 0. \quad (3)$$

В качестве численного метода используется MUSCL схема третьего порядка для аппроксимации конвективных слагаемых. В областях больших градиентов объемной доли жидкости порядок схемы снижается до первого, что повышает устойчивость схемы. Вязкие члены аппроксимируются центрально-разностной схемой второго порядка точности.

Полученные результаты.

Сначала сравним расчеты, выполненные по модели несжимаемой жидкости в разных постановках: при фиксированном напоре H и фиксированном расходе

Q . Сравнение будем проводить следующим образом: зафиксируем сечение конуса отсасывающей трубы на высоте $z = const$ и отметим в этом сечении две диаметрально противоположные точки, см. рис. 1. Для визуализации пульсаций давления, связанных с прецессией вихревого жгута, рассмотрим параметр $P_{rope} = (P_1 - P_2) / 2$, где точки $P1$ и $P2$ расположены близко к входу вдува воздуха, см. рис.1.

Результаты расчетов представлены на рис. 2. Расход воздуха Q_{air} варьировался в диапазоне от 0.5 до 2 % от расхода жидкости Q .

На каждом рисунке показана зависимость значения P_{rope} от времени. Можно отметить, что при увеличении подачи воздуха с 0,5 % до 2 % амплитуда пульсаций даже несколько увеличивалась. Частота пульсаций также увеличилась примерно на 10%. Видно, что результаты, полученные при разных подходах, совпадают. Поле течения в сечении конуса отсасывающей трубы, а также вихревой жгут можно увидеть на рис. 3.

После получения аналогичных результатов для несжимаемой модели с использованием других граничных условий мы рассмотрели сжимаемую модель. Мы повторили расчеты с расходом нагнетания воздуха 0.5 и 2%. Также были рассмотрены два новых случая, когда расход воздуха составлял 4% и 10%, см. рис. 4. Расчеты проводились при фиксированном расходе Q , расчеты при фиксированном напоре H провести не удалось из-за проблем со сходимостью.

При этом характер амплитудно-частотных характеристик при расходе воздуха 0.5% по сжимаемой модели достаточно хорошо совпадает с результатами, полученными по несжимаемой модели. Видно, что начиная с расхода всасываемого воздуха 2% амплитуда пульсаций значительно снижается. Начиная с расхода 4%, можно отметить, что пульсации со временем затухают. Такие зависимости объясняются структурой течения: при 0,5 % структура вихревого жгута устойчива, а при 2 % и выше вихревой жгут исчезает, см. рис. 5.

Можно отметить, что амплитуда пульсаций, полученная по несжимаемой модели, хорошо согласуется с экспериментом во всем диапазоне нагнетания воздуха. Расчетная частота значительно меньше экспериментальной, хотя наблюдается тенденция к увеличению частоты с увеличением расхода воздуха.

Расчет с использованием сжимаемой модели при расходе воздуха 0,5 % почти повторяет результат с использованием несжимаемой модели. Однако картина течения, полученная при расходе воздуха 2 %, не совпадает с экспериментальными данными.

Иллюстрации, визуализации результатов.

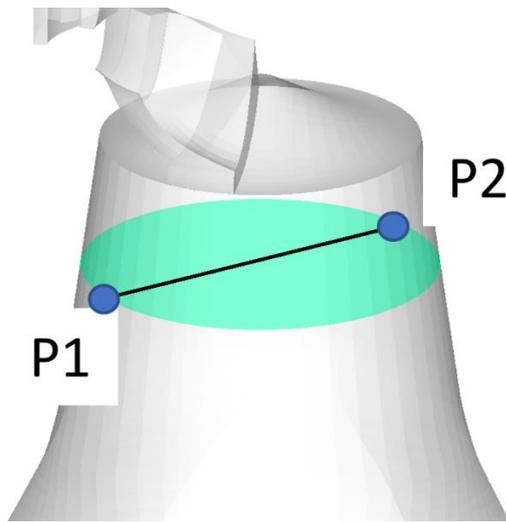


Рисунок 1. Расположение точек P1 и P2 в конусе отсасывающей трубы.

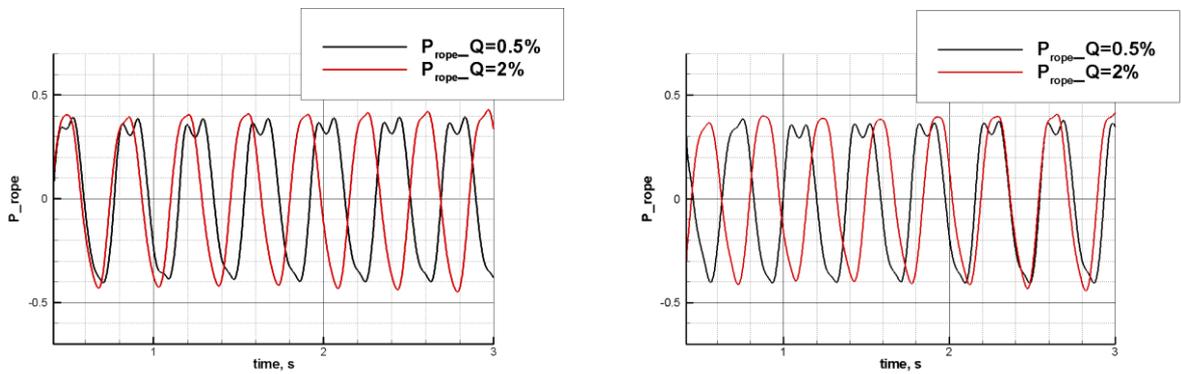


Рисунок 2. Пульсации давления, полученные с использованием (а) фиксированного расхода H (б) фиксированного напора Q .

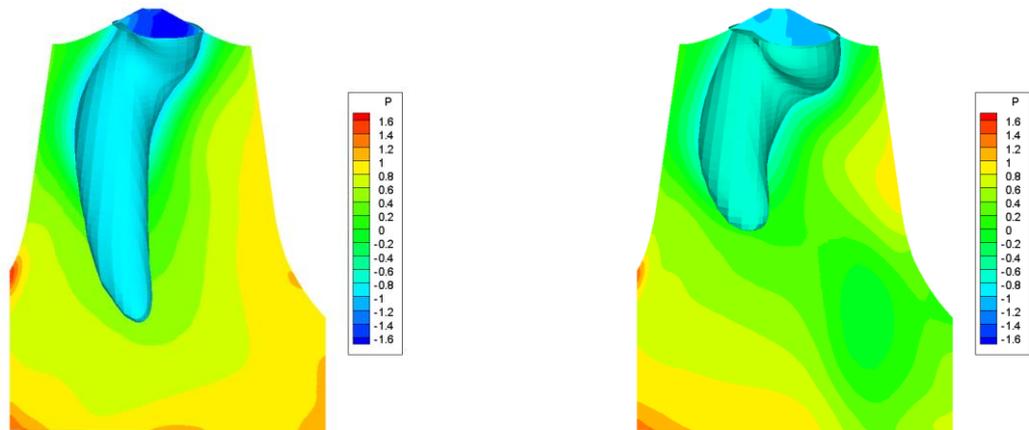


Рисунок 3. Поле давления в срезе отсасывающей трубы. Вихревой жгут визуализирован при помощи изоповерхности давления при расходе воздуха Q_{air} (а) 0.5% (б) 2%.

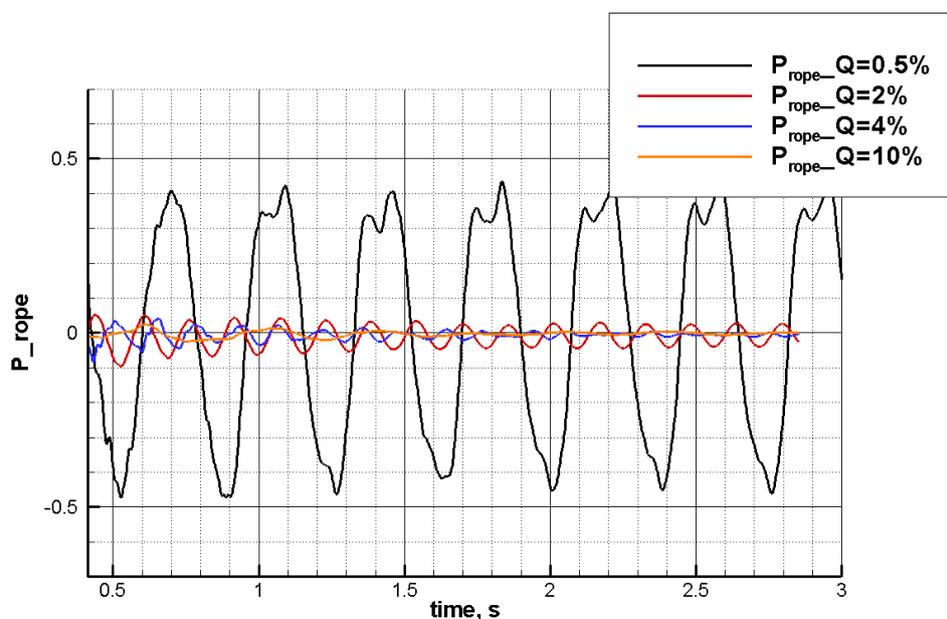


Рисунок 4. Зависимость амплитуды P_{rope} от времени. Фиксированный расход воздуха Q_{air} .

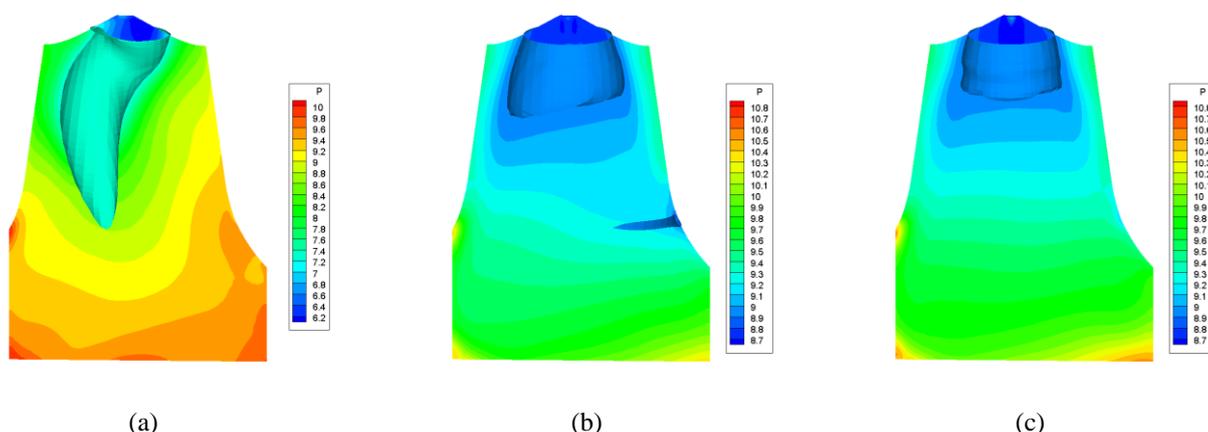


Рисунок 5. Поле давления в срезе отсасывающей трубы. Вихревой жгут визуализирован при помощи изоповерхности давления при расходе воздуха Q_{air} (a) 0.5% (b) 2%.

Эффект от использования кластера в достижении целей работы.

При расчете нестационарных эффектов в гидротурбине необходима подробная сетка, а также время установления расчета занимает большое количество физического времени. Без распараллеливания время проведения одного расчета может затянуться на месяцы. С учетом использования мощностей кластера это время уменьшается значительно, что позволяет проводить больше расчетов и более детально разобраться в природе происходящих в гидротурбине процессов.

Перечень публикаций, содержащих результаты работы.

Shcherbakov P. et al. Two models for calculating air injection into the hydraulic turbine //AIP Conference Proceedings. – AIP Publishing LLC, 2023. – Т. 2504. – №. 1. – С. 030112.