

Аннотация.

В ходе эксплуатации гидротурбины подвержены различным нестационарным явлениям. В режиме неполной нагрузки это образование вращающегося вихревого жгута в конусе отсасывающей трубы гидротурбины и, как следствие, связанные с его вращением поперечные пульсации давления. В режиме повышенной нагрузки это образование кавитационных полостей. Их гидродинамическая неустойчивость приводит к продольным пульсациям давлений. Одним из немногих способов борьбы с нестационарными явлениями в гидротурбине является выпуск воздуха в проточный тракт. Численному моделированию данного процесса посвящена эта работа. Показано, что с увеличением впускаемого воздуха амплитуда пульсаций снижается, а частота не меняется.

Тема работы.

Численное моделирование впуска воздуха в проточный тракт гидротурбины

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.

Необходимо создать математическую модель, позволяющую провести расчеты впуска воздуха в проточный тракт гидротурбины. Модель также должна учитывать кавитацию. После создания модели требуется получить картину течения во всем проточном тракте гидротурбины при впуске воздуха с постоянным расходом, выявить зависимости пульсаций давления от расхода впускаемого воздуха.

Современное состояние проблемы.

Задача моделирования впуска воздуха широко исследуется. Численное моделирование впуска воздуха в проточный тракт гидротурбины, как

правило, проводится в каком-либо коммерческом пакете программ. Отличительной особенностью данной работы является то, что в математической модели учитывается кавитация.

Подробное описание работы, включая используемые алгоритмы.

Для моделирования течения, предлагается использовать следующую модель движения смеси «жидкость – пар – неконденсируемый газ», учитывающую сжимаемость фаз и фазовые превращения. Предполагается, что все компоненты смеси имеют одну и ту же скорость, давление и температуру. Модель представляет собой уравнения Навье-Стокса для сжимаемой среды, дополненные уравнениями переноса для объемных долей жидкой и газовой фазы.

$$\frac{\partial \rho_m}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho_m \mathbf{u}) = 0; \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho_m u_i)}{\partial \tau} + \frac{\partial(\rho_m u_i u_j)}{\partial x_j} + \frac{\partial p}{\partial x_i} = \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \rho_m f_i \quad i = 1, 2, 3. \quad (2)$$

$$\frac{\partial e_m}{\partial t} + \frac{\partial((e_m + p)u_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial q_j}{\partial x_j} \quad (3)$$

$$\frac{\partial(\rho_L \alpha_L)}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho_L \alpha_L \mathbf{u}) = (m^+ + m^-); \quad (4)$$

$$\frac{\partial(\rho_G \alpha_G)}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho_G \alpha_G \mathbf{u}) = 0. \quad (5)$$

Более простые модели могут быть получены из (1)-(5), если пренебречь сжимаемостью жидкой и/или газовой фазы.

Используется MUSCL схема третьего порядка аппроксимации. В областях больших градиентов объемной доли жидкости порядок схемы снижается до первого, что повышает устойчивость схемы.

Полученные результаты.

Предложена двухфазная двухкомпонентная модель «жидкость-пар-воздух» для расчета нестационарного 3D потока жидкости в проточном тракте турбины Френсиса.

Рассмотрены течения в широком диапазоне режимов работы гидротурбины: начиная от режимов неполной нагрузки и заканчивая режимами повышенной нагрузки. Проведены нестационарные расчеты по моделям «жидкость-пар» и «жидкость-пар-воздух». Для замыкания уравнений использовалась k - ϵ модель турбулентности Кима-Чена и SST k - ω модель. Полученные результаты показали, что вдув воздуха способен снизить амплитуды пульсаций давления. Полученные результаты качественно совпадают с экспериментом. Показано, что выбор модели турбулентности играет важную роль при моделировании сложных нестационарных течений.

Исследовано влияния объема впускаемого воздуха на амплитуду и частоту пульсаций, возникающих от вращения вихревого жгута в режиме неполной нагрузки и гидродинамическую неустойчивость кавитационной полости в режиме повышенной нагрузки. Показано, что с увеличением впускаемого воздуха амплитуда пульсаций давления изменяется немонотонно. В расчетах не удалось смоделировать эффект увеличения частоты пульсаций давления, связанный с увеличением объема впускаемого воздуха. В связи с этим была предложена новая математическая модель, являющаяся развитием существующей, которая учитывает сжимаемость воздуха.

Результаты расчетов сравнивались с результатами, полученными в пакете программ ANSYS и с экспериментальными данными.

Показано, что учет кавитации при моделировании нестационарных явлений в гидротурбине необходим для воспроизведения результатов эксперимента.

Иллюстрации, визуализации результатов.

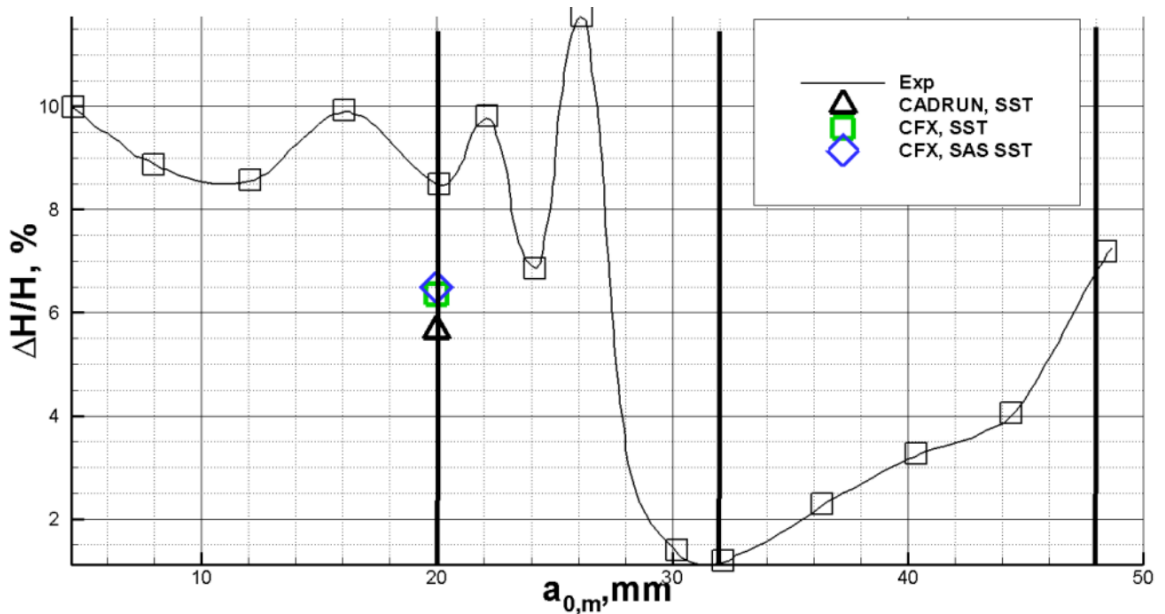


Рисунок 1. Сравнение амплитуд пульсаций давления, полученной в различных решателях, с экспериментальными данными.

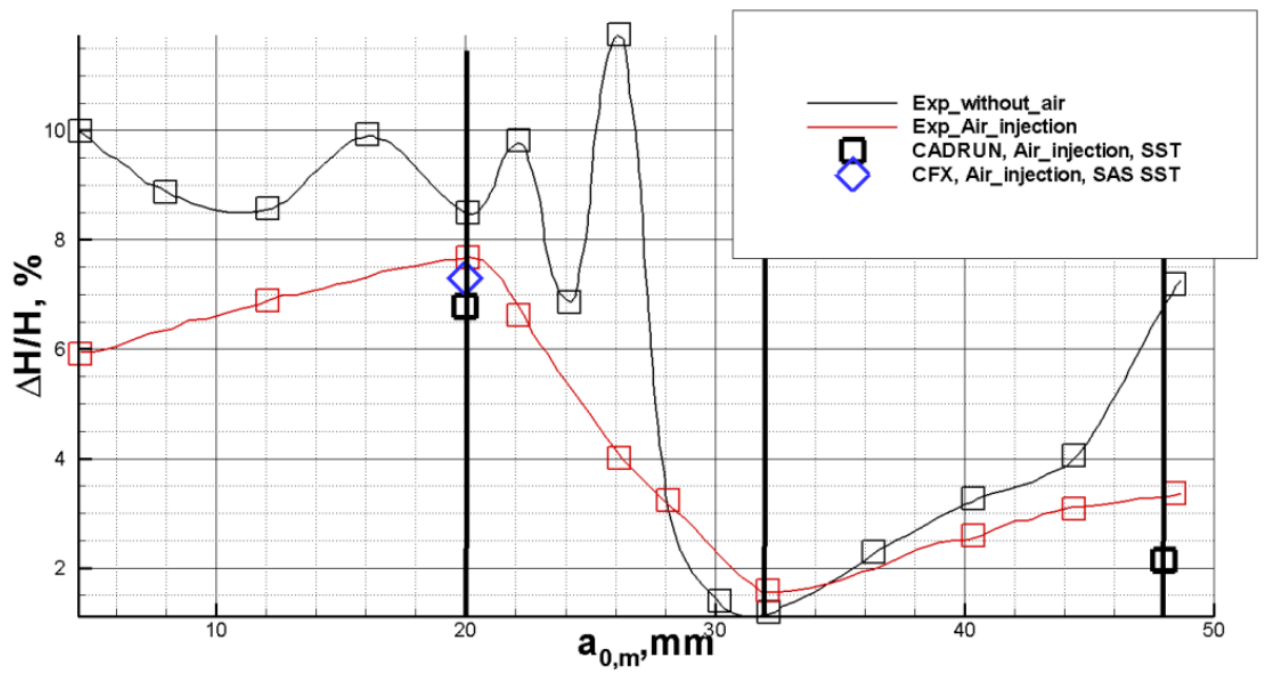


Рисунок 2. Впуск воздуха. Сравнения амплитуд пульсаций давления, полученных в различных решателях, с экспериментальными данными.

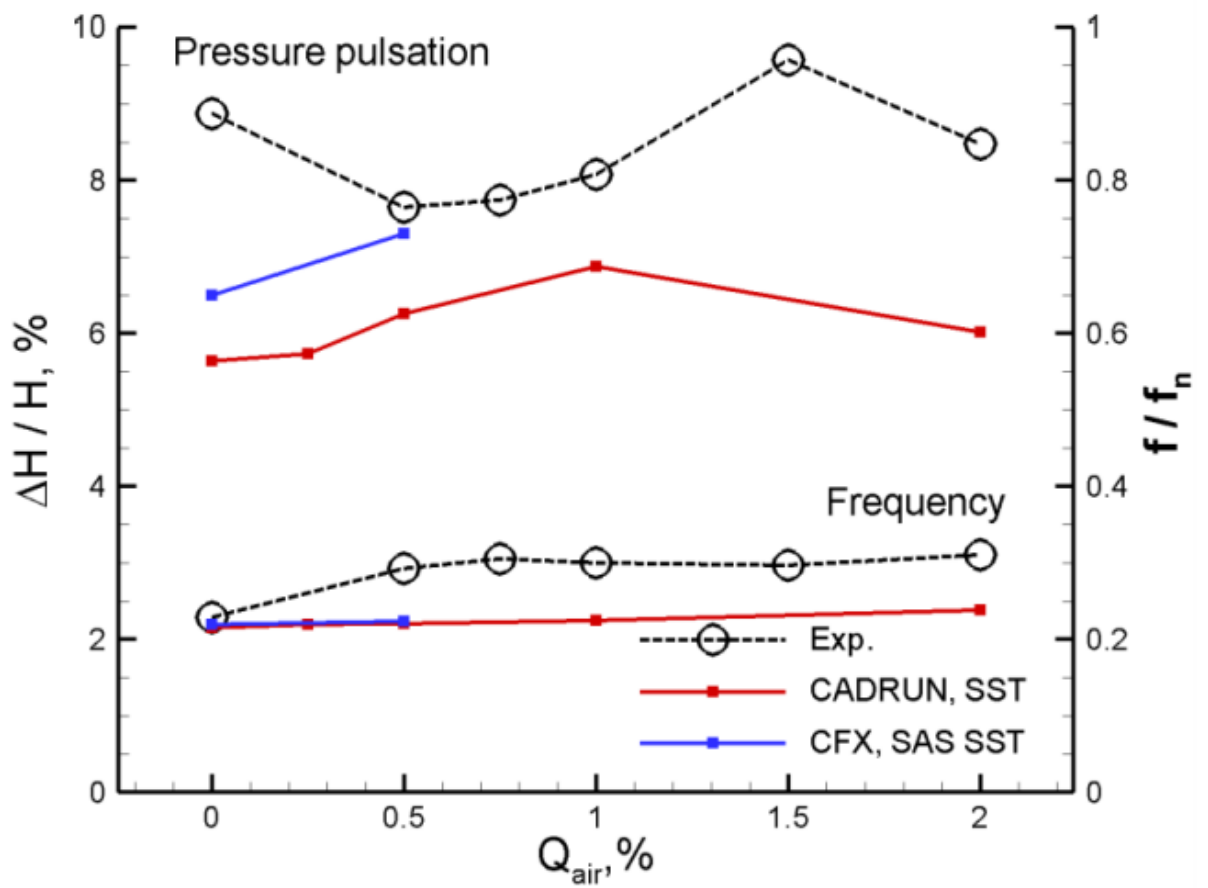


Рисунок 3. Влияние объема впускаемого воздуха на амплитуду и частоту пульсаций давления.

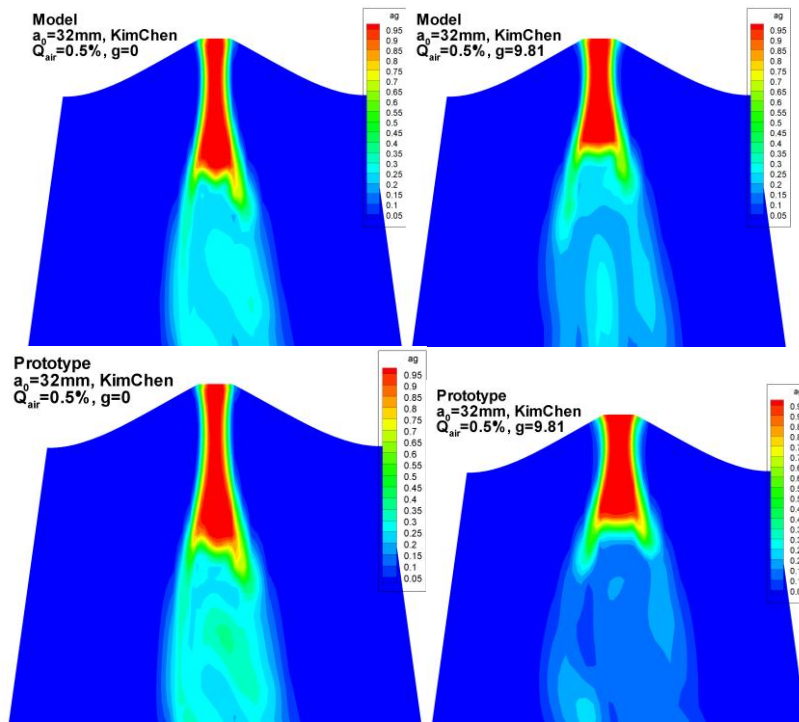


Рисунок 4. Распределение объемной доли воздуха в конусе отсасывающей трубы для различных ускорений свободного падения g . Вверху: модельная постановка, внизу: натурная.

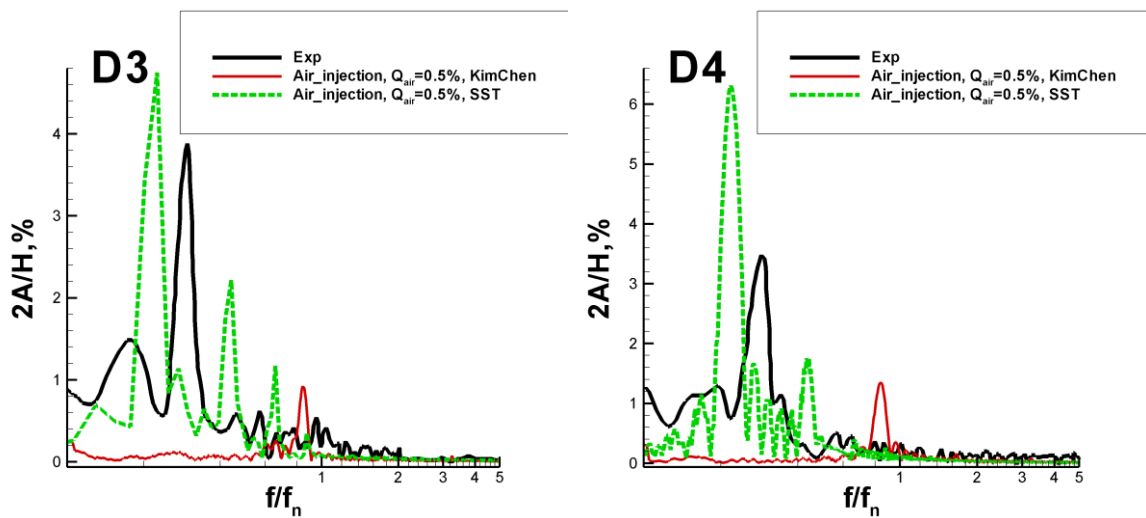


Рисунок 5. Сравнительный анализ спектра пульсаций давления в эксперименте со впуском воздуха и в расчетах в различных точках.

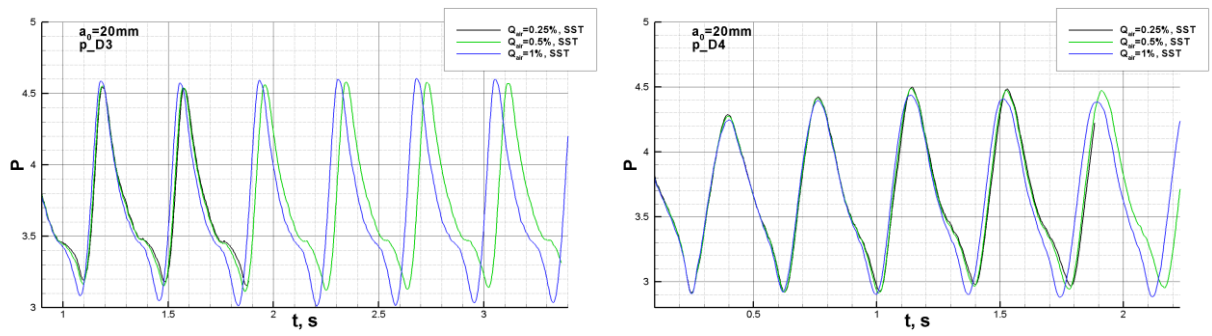


Рисунок 6. Пульсации давления при различной интенсивности двухаемого воздуха ($Q_{air}=0.25\%, 0.5\%, 1\%$).

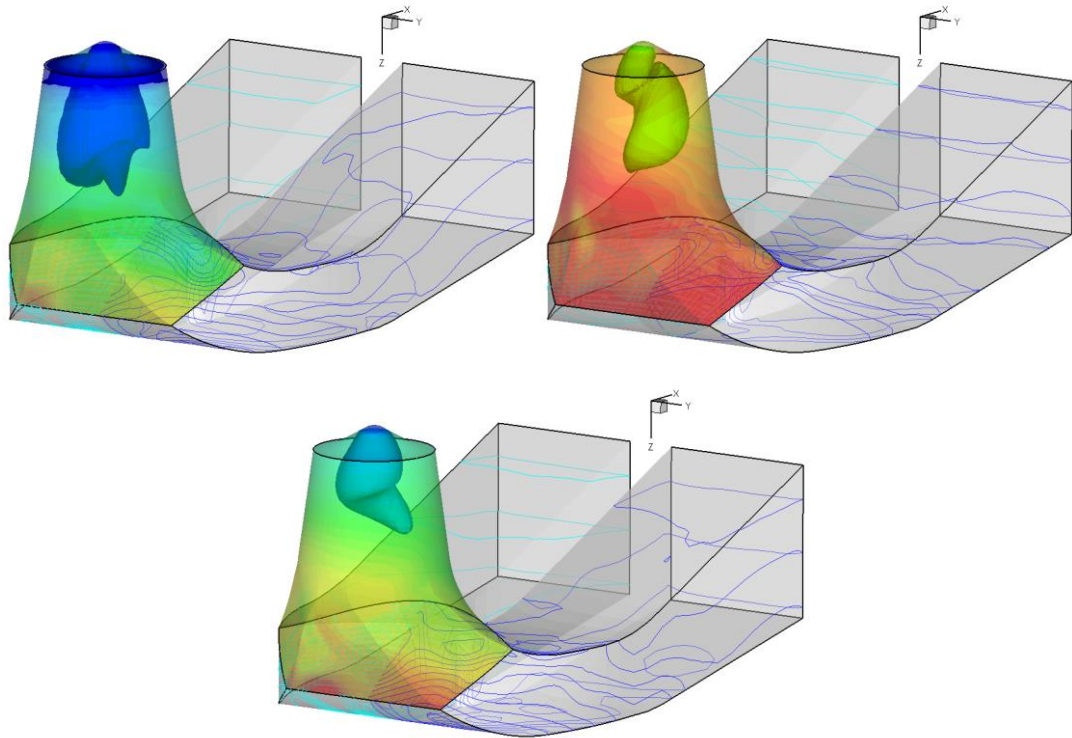


Рисунок 7. Изоповерхность давления в различные моменты времени расчете без ддува воздуха, $SST k-\omega$ модель турбулентности.

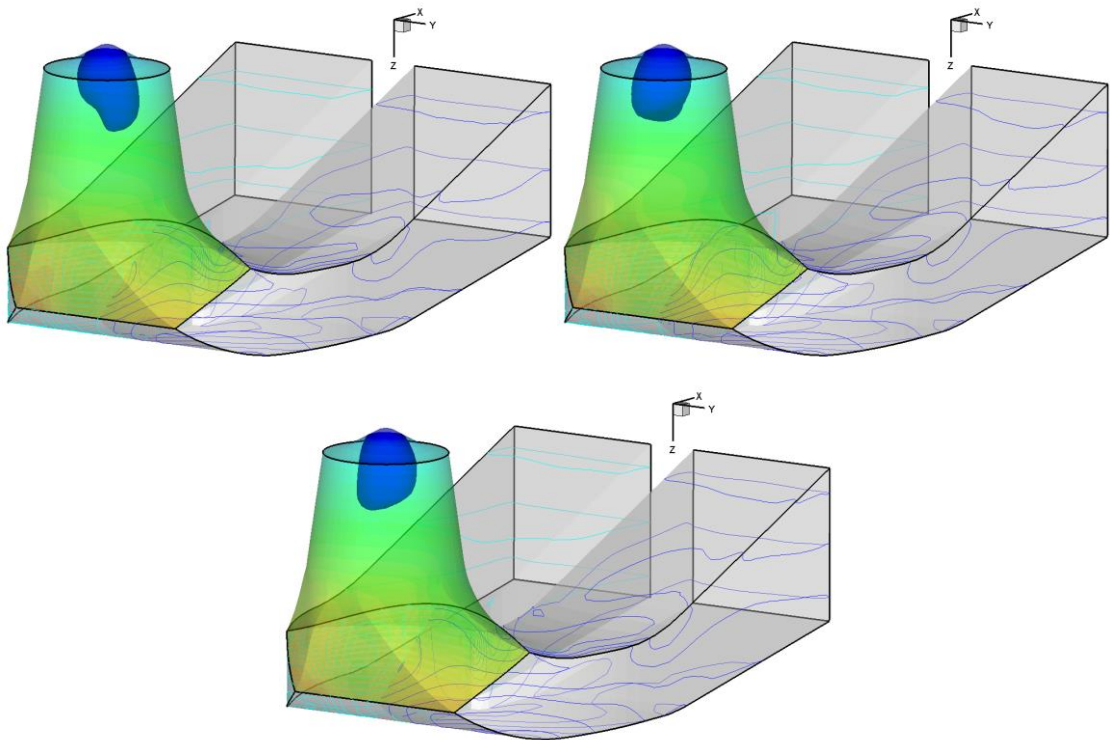


Рисунок 8. Исоповерхность давления в различные моменты времени в расчете со вдувом воздуха, SST $k-\omega$ модель турбулентности.

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.

Chirkov D., Scherbakov P., Skorospelov V., Cherny S., Zakharov A. Numerical simulation of air injection in Francis turbine // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. - 2019. - Vol.240. - Iss. 2. - Art.022043. - ISSN 1755-1307. - EISSN 1755-1315.

Chirkov D. V. et al. Three-dimensional simulation of full load instability in Francis turbines // Journal of Hydraulic Research. – 2018.