

УДК: 681.5.017:621.224.7

А. Дж. Обозов<sup>1</sup>, [obozov-a@mail.ru](mailto:obozov-a@mail.ru),

Т.Т. Медеров<sup>1</sup>, [mtt-kg@mail.ru](mailto:mtt-kg@mail.ru),

Р.А. Акпаралиев<sup>1</sup>, [ruslan.akparaliev@gmail.com](mailto:ruslan.akparaliev@gmail.com)

К.Н. Оразбаев<sup>2</sup>, [kazbek\\_orazbaev@mail.ru](mailto:kazbek_orazbaev@mail.ru)

<sup>1</sup>Институт машиноведения и автоматизации НАН КР

<sup>2</sup>Жезказганский университет им. О. А. Байконурова

## ПРИМЕНЕНИЕ СРЕДЫ КОМПАСFLOW ДЛЯ ДЕМОНСТРАЦИИ ТЕЧЕНИЯ ЖИДКОСТИ ГРАВИТАЦИОННОЙ ВОДОВОРОТНОЙ ГЭС

В статье рассматривается задача разработки гравитационной водоворотной микро-ГЭС (ГВВМГЭС), в которой для выработки электрической энергии используют скорость течения водоворотного потока, формирующегося за счет гравитации. Такая технология является относительно новой в области гидроэлектроэнергетики. Течения потока жидкости в ГВВМГЭС с тремя различными моделями гидротурбин в цилиндрическом бассейне были смоделированы с использованием программы KompasFlow. Основное уравнение движения жидкости – это уравнение Навье-Стокса. Изложено подробное описание алгоритма моделирования. Представлены результаты численного эксперимента моделей.

**Ключевые слова:** гидроэлектростанция; микро-ГЭС; напор; расход; мощность; выработка; гидротурбина; гидрогенератор; водоворот; компас-3D, вычислительная гидродинамика (ВГД); возобновляемые источники энергии.

### Введение

Во всем мире сегодня ученые исследуют технологии и ищут пути их использования для поддержки перехода электроэнергетического комплекса к низкоуглеродным системам. В этой связи для Кыргызской Республики с её богатым гидроэнергетическим потенциалом являются весьма актуальными вопросы исследования и использования гидроэнергетических установок для получения электроэнергии [1, 4, 9]. Гидроэнергетика на сегодняшний день представляет зрелый и конкурентоспособный возобновляемый источник энергии, который может балансировать колебания между спросом на энергию и ее предложением. Относительно новой технологии, предназначенной для генерации электроэнергии и относящейся к возобновляемым источникам энергии, считается низконапорная гравитационная водоворотная микро-ГЭС [2, 6]. Она классифицируется как микромасштабная гидроэлектростанция и содержит водоворотную гидротурбинную систему. Установка разработана для работы в непосредственной близости от ручья на основе круглого бассейна с центральным отверстием, а также входного и выходного каналов. Общий вид установки, включая гидроагрегат, представлен на рис. 1.

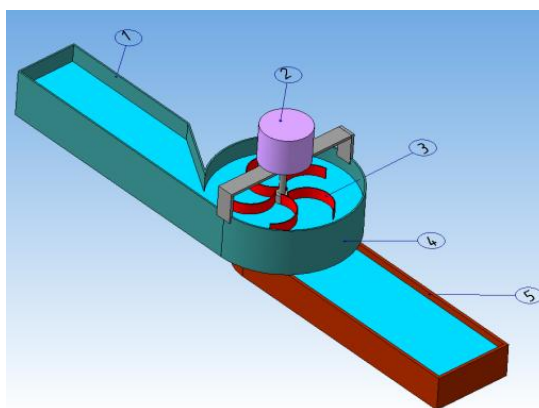


Рисунок 1 – Гравитационная водоворотная микро-ГЭС

1 – подводящий канал; 2 – гидрогенератор; 3 – гидротурбина; 4 – круглый бассейн; 5 – отводящий канал

Создание устойчивого водного вихря (воронки) над отверстием приводит в действие водяную гидротурбину, которая устанавливается на подходящей высоте. Поэтому эта установка способна преобразовывать гидравлическую энергию движущегося потока в механическую энергию вращения, используя низкий напор.

В ГВВМГЭС энергия перемещающейся водной массы преобразуется в гидравлическую энергию за счет гравитации с помощью круглого бассейна с отверстием на дне, и в центре образованного водоворота гидротурбиной извлекается механическая энергия вращения вала. Рабочий диапазон ГВВМГЭС, предложенный Тимилсиной и др. [3], показан на рис. 2 с предлагаемым диапазоном напора, который имеет гораздо больший рабочий диапазон, чем водяные колеса и винт Архимеда. Как видно, данная установка покрывает существующий пробел в эксплуатации низконапорных гидроэнергетических систем.

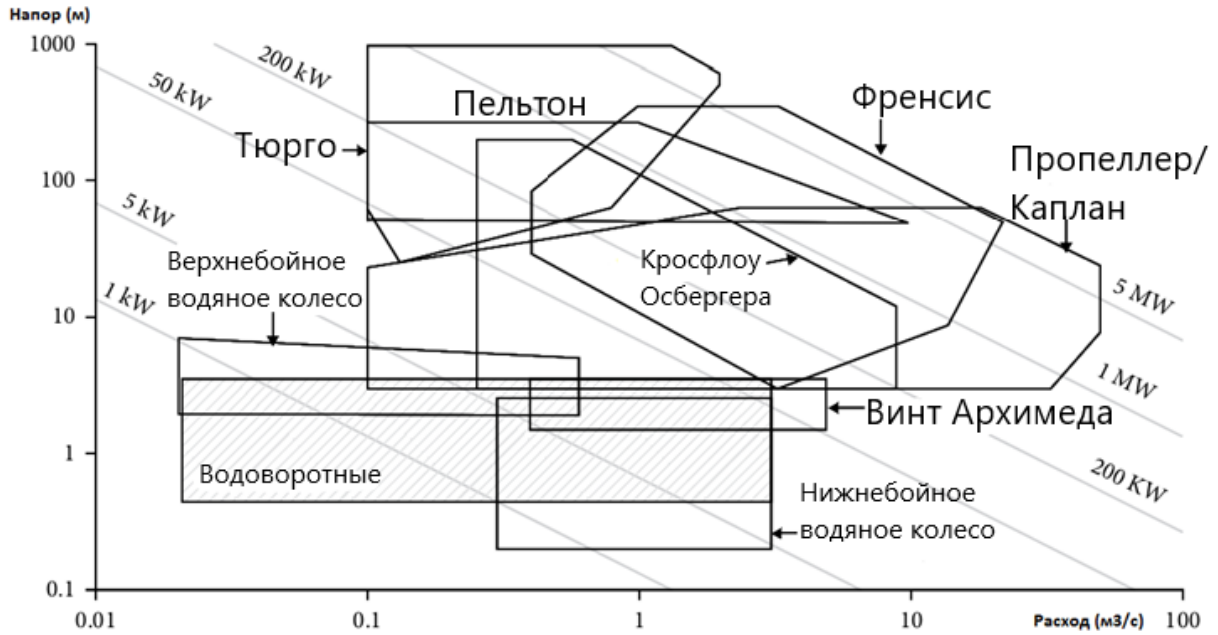


Рисунок 2 – Диапазон применения гидравлических турбин с указанием диапазона, охватываемого водоворотной турбиной

Как и во всех гидроэнергетических установках, сердцевиной ГВВМГЭС является гидроагрегат, состоящий из гидрогенератора и гидротурбины. Гидротурбина в свою очередь является первичным двигателем системы, определяющим в целом эффективность установки. Поэтому в первую очередь необходимо изучить гидродинамическую теорию решеток и рассмотреть взаимодействие гидравлической воронки с лопастной системой гидротурбины микрогидроэлектростанции.

### Постановка задачи

Поставлена задача исследовать течения жидкости в ГВВМГЭС с помощью компьютерной программы KomrasFlow. Для ГВВМГЭС с тремя различными типами турбин визуально рассмотреть линии тока жидкости и определить значения скоростей во всем проточном тракте.

### Основные уравнения

Уравнение Навье – Стокса движения вязкой несжимаемой жидкости [5,6]:

$$\frac{d\vec{\vartheta}}{dt} = \vec{F} - \frac{1}{\rho} \text{grad } p + \nu \nabla^2 \vec{\vartheta}, \quad (1)$$

где  $\frac{d\vec{\vartheta}}{dt}$  – полное ускорение частицы жидкости;  $\vec{F}$  – ускорение от массовых сил;  $-\frac{1}{\rho} \text{grad } p$  – ускорение от сил давления;  $\nu \nabla^2 \vec{\vartheta}$  – ускорение от сил вязкости.

В цилиндрической системе координат упомянутое выше уравнение запишется в виде:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \vartheta_r}{\partial t} + \vartheta_r \frac{\partial \vartheta_r}{\partial r} + \vartheta_z \frac{\partial \vartheta_z}{\partial r} - \frac{\vartheta_\theta^2}{r} &= 2\omega_0 \vartheta_\theta - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r} + v \left( \frac{1}{r} \frac{\partial \vartheta_r}{\partial r} + \frac{\partial^2 \vartheta_r}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 \vartheta_r}{\partial z^2} - \frac{\vartheta_r}{r^2} \right) \\ \frac{\partial \vartheta_z}{\partial t} + \vartheta_r \frac{\partial \vartheta_z}{\partial r} + \vartheta_z \frac{\partial \vartheta_z}{\partial z} - \frac{\vartheta_\theta^2}{r} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + v \left( \frac{1}{r} \frac{\partial \vartheta_z}{\partial r} + \frac{\partial^2 \vartheta_z}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 \vartheta_z}{\partial z^2} - \frac{\vartheta_z}{r^2} \right) \\ \frac{\partial \vartheta_\theta}{\partial t} + \vartheta_r \frac{\partial \vartheta_\theta}{\partial r} + \vartheta_z \frac{\partial \vartheta_\theta}{\partial z} - \frac{\vartheta_\theta \vartheta_r}{r} &= 2\omega_0 \vartheta_r - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r} + v \left( \frac{1}{r} \frac{\partial \vartheta_\theta}{\partial r} + \frac{\partial^2 \vartheta_\theta}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 \vartheta_\theta}{\partial z^2} - \frac{\vartheta_\theta}{r^2} \right) \\ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \vartheta_r) + \frac{\partial \vartheta_z}{\partial z} &= 0. \end{aligned} \quad (2)$$

При протекании жидкости через произвольную решетку, вращающуюся с постоянной угловой скоростью  $\omega$ , происходит изменение энергии потока, точнее уменьшается.

Изменение энергии, отнесенной к единице объема жидкости, между сечениями 1 и 2 произвольной поверхности тока будет полным давлением:

$$P = \frac{dE}{dV} = \left( \gamma z_2 + p_2 + \rho \frac{v_2^2}{2} \right) - \left( \gamma z_1 + p_1 + \rho \frac{v_1^2}{2} \right), \quad (3)$$

где  $dE$  – изменение энергии жидкости,  $dV$  – объем жидкости,  $z$  – высотная координата точки,  $p$  – давление,  $v$  – скорость,  $\gamma$  – удельная сила тяжести жидкости,  $\rho$  – плотность жидкости.

На основании уравнения Бернулли для относительного течения:

$$\gamma z_1 + p_1 + \rho \frac{w_1^2 - u_1^2}{2} = \gamma z_2 + p_2 + \rho \frac{w_2^2 - u_2^2}{2} + \Delta P_n, \quad (4)$$

где  $w$  – относительная скорость,  $u$  – окружная скорость,  $\Delta P_n$  – изменение полного давления за счет гидравлических потерь на участке между сечениями 1-2.

Из (4) будет

$$(z_2 - z_1)\gamma + (p_2 - p_1) = \rho \frac{w_1^2 - u_1^2}{2} - \rho \frac{w_2^2 - u_2^2}{2} - \Delta P_n.$$

Подставив далее в (3),

$$P = \frac{\rho}{2} (v_2^2 + u_2^2 - w_2^2) - \frac{\rho}{2} (v_1^2 + u_1^2 - w_1^2) - \Delta P_n.$$

Это уравнение позволяет определить изменение удельной энергии  $P$  потока на произвольной поверхности тока по скоростям потока в сечениях 1 и 2. Из треугольника скоростей известно

$$w^2 = v^2 + u^2 - 2uv \cos \alpha,$$

поэтому

$$\begin{aligned} P + \Delta P_n &= \rho (u_2 v_2 \cos \alpha_2 - u_1 v_1 \cos \alpha_1) \\ v_u &= v \cos \alpha \\ u &= \omega r \\ P + \Delta P_n &= \rho \omega (r_2 v_{2u} - r_1 v_{1u}). \end{aligned} \quad (5)$$

Циркуляция скорости перед решеткой

$$\Gamma_1 = 2\pi r_1 v_{1u}$$

и за решеткой

$$\Gamma_2 = 2\pi r_2 v_{2u}.$$

Отсюда изменение удельной энергии потока пропорционально плотности жидкости, угловой скорости вращения решетки и разности циркуляций:

$$P + \Delta P_n = \rho \frac{\omega}{2\pi} (\Gamma_2 - \Gamma_1). \quad (6)$$

Если  $\Gamma_2 > \Gamma_1$ , то правая часть положительная, что говорит об увеличении энергии жидкости (насос). Если  $\Gamma_2 < \Gamma_1$ , то жидкость теряет свою энергию, отдавая её лопастям (турбина).

В идеальном случае при отсутствии потерь в решетке теоретическое полное давление

$$P_T = \rho \frac{\omega}{2\pi} (\Gamma_2 - \Gamma_1). \quad (7)$$

С другой стороны,  $P_T$  – механическая удельная энергия, получаемая в турбинной решетке для реального течения.

Учитывая, что потеря  $\Delta P_n$  всегда положительна, коэффициент полезного действия для турбинной решетки, расположенной на рассматриваемой поверхности тока,

$$\eta = \frac{P_T}{P} = \frac{P_T}{P_T + \Delta P_n}. \quad (8)$$

Мощность, отданная потоком при обтекании решетки

$$N = \bar{P}Q,$$

где  $\bar{P}$  – среднее полное давление,  $Q$  – расход жидкости через решетку, откуда гидравлическая мощность на валу турбинного колеса

$$N_T = \bar{P}_T Q = \bar{P} Q \eta = \frac{\rho Q \omega (\bar{\Gamma}_1 - \bar{\Gamma}_2)}{2\pi}. \quad (9)$$

Из формулы (9) момент на валу гидротурбины будет

$$M = \frac{\rho Q}{2\pi} (\bar{\Gamma}_1 - \bar{\Gamma}_2). \quad (10)$$

Таким образом, при заданных величинах  $\rho$ ,  $Q$ ,  $\omega$  мощность и момент на валу рабочего колеса зависят от изменения циркуляции скорости при обтекании решетки рабочего колеса.

### Описание алгоритма моделирования в компьютерной программе

KompasFlow представляет собой интегрированные в программу КОМПАС 3D v.18 модуль и адаптированную для исследователя версию универсального гидродинамического программного комплекса FlowVision[10]. Для начала формируем геометрическую модель расчетной области в программе, как показано на рис. 3.

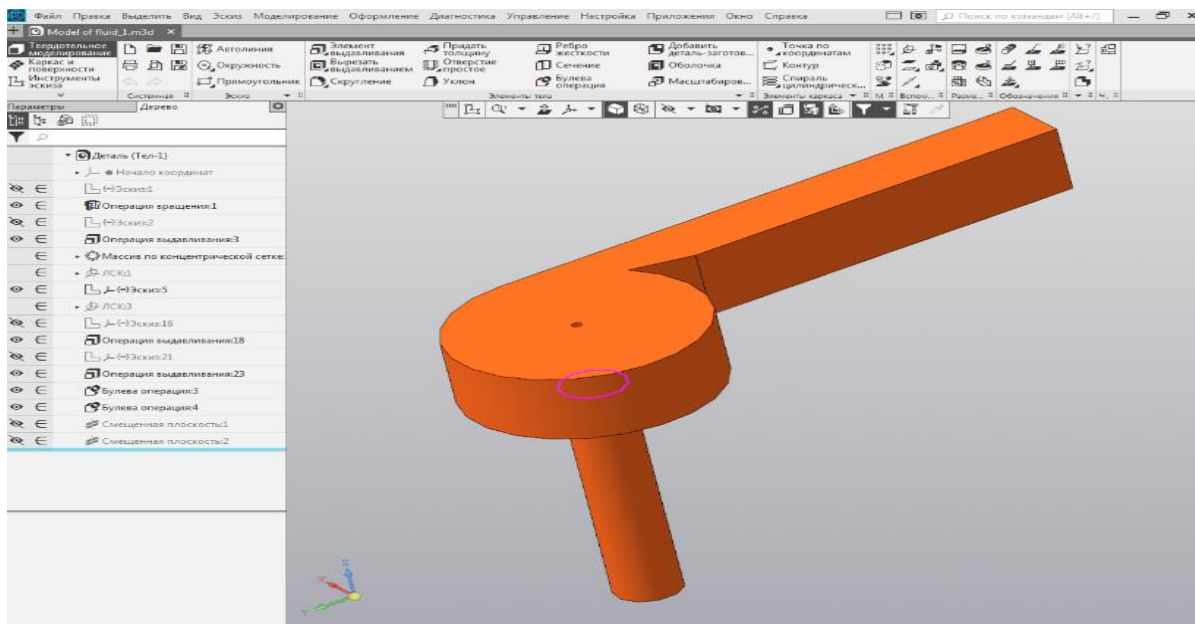


Рисунок 3 – Геометрическая модель расчетной области ГВВМГЭС

Затем в списке инструментальных панелей открываем KompasFlow, где в первую очередь задаются глобальные параметры. Для данного проекта опорное значение давления  $P_{ref}=101000$  Па (атмосферное давление).

Далее выбирается вещество. В качестве рабочей среды задается вода со следующими свойствами: плотность –  $1000 \text{ Кг/м}^3$ , молярная масса –  $0,018 \text{ кг/моль}$ , вязкость –  $0,001 \text{ кг/м}\cdot\text{с}$ , теплопроводность –  $0,6 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$ , удельная теплоемкость –  $4217 \text{ Дж/кг}\cdot\text{К}$ .

Затем идет набор решаемых уравнений. Поскольку в данном проекте моделируется турбулентное движение жидкости, то вместе с уравнениями движения (уравнение Навье-Стокса) необходимо применить модель турбулентности, используется стандартная k-ε модель турбулентности (k-epsilon standard).

Следующим шагом задаются граничные условия. На рис.4 представлены использованные граничные условия.

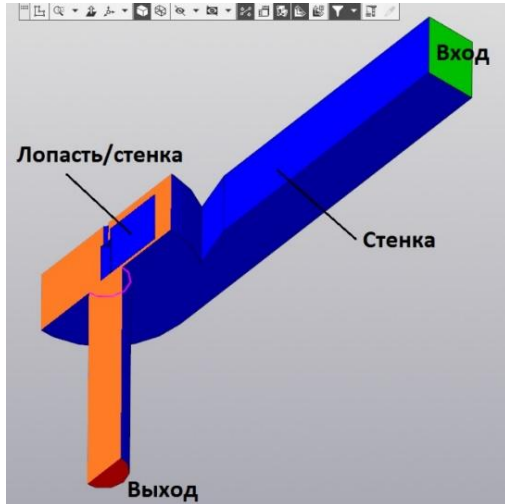


Рисунок 4 – Расстановка граничных условий

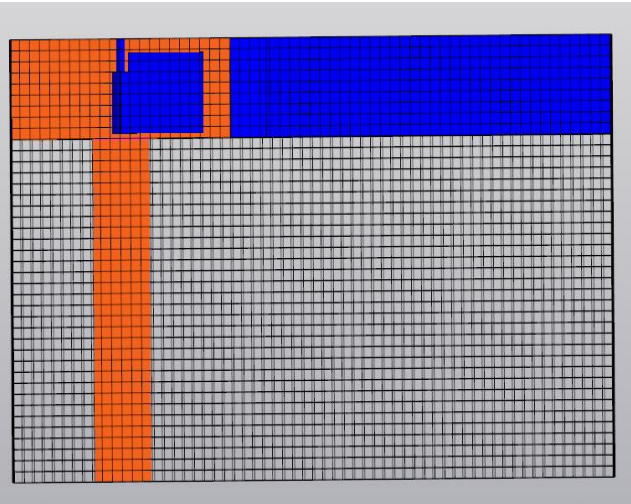


Рисунок 5 – Начальная сетка

Далее задаются начальные условия. Для ускорения сходимости решения к стационарному в проекте задается начальное приближение в виде следующих начальных условий: скорость по оси X равна 1 м/с, что соответствует расходу жидкости в сечении входа.

После устанавливается расчетная сетка, где весь расчетный объем разбивается на элементарные объемы. Для создания равномерной по всем осям расчетной сетки задана начальная сетка (рис. 5) со следующим количеством ячеек по осям: X: 200, Y: 60, Z: 40.

Параметры управления расчетом не изменяются и остаются по умолчанию (рис.6), так как их нужно менять при расчете сверхзвуковых потоков для сглаживания негативных численных эффектов.

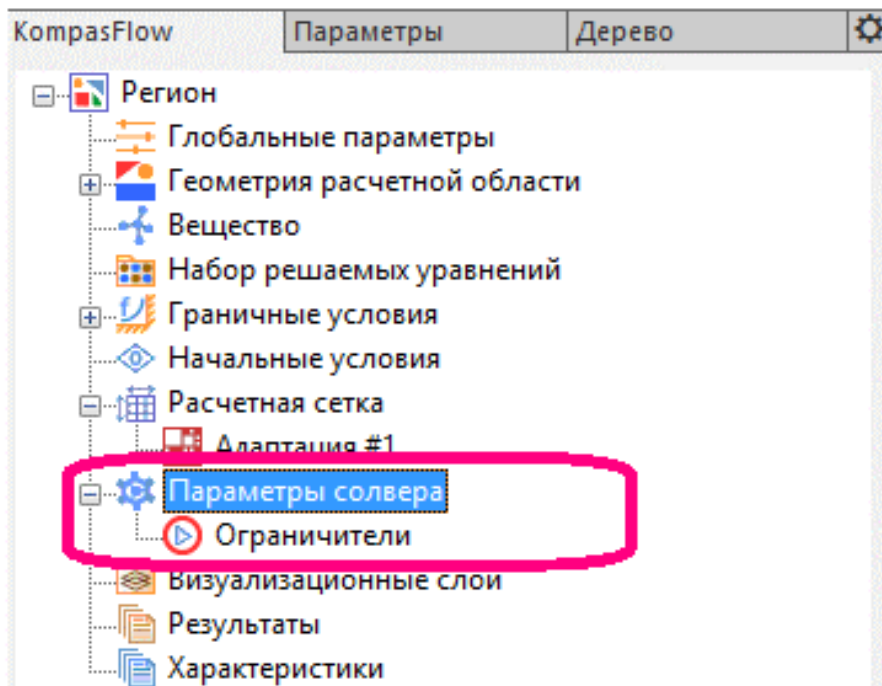


Рисунок 6 – Параметры солвера в дереве проекта

Наконец настраиваются отображения результатов расчета, где используются такие папки, как визуализационные слои, результаты, характеристики дерева проекта (рис.6).

### Результаты численного эксперимента

Был проведен численный анализ трех моделей: 1) течение жидкости в установке гидротурбиной с плоскими лопастями (рис.7а); 2) течение жидкости в установке гидротурбиной с полуцилиндрическими лопастями (рис.7б); 3) течение жидкости в установке гидротурбиной с полуцилиндрическими лопастями и зазором между валом и ребром лопасти (рис.7в).

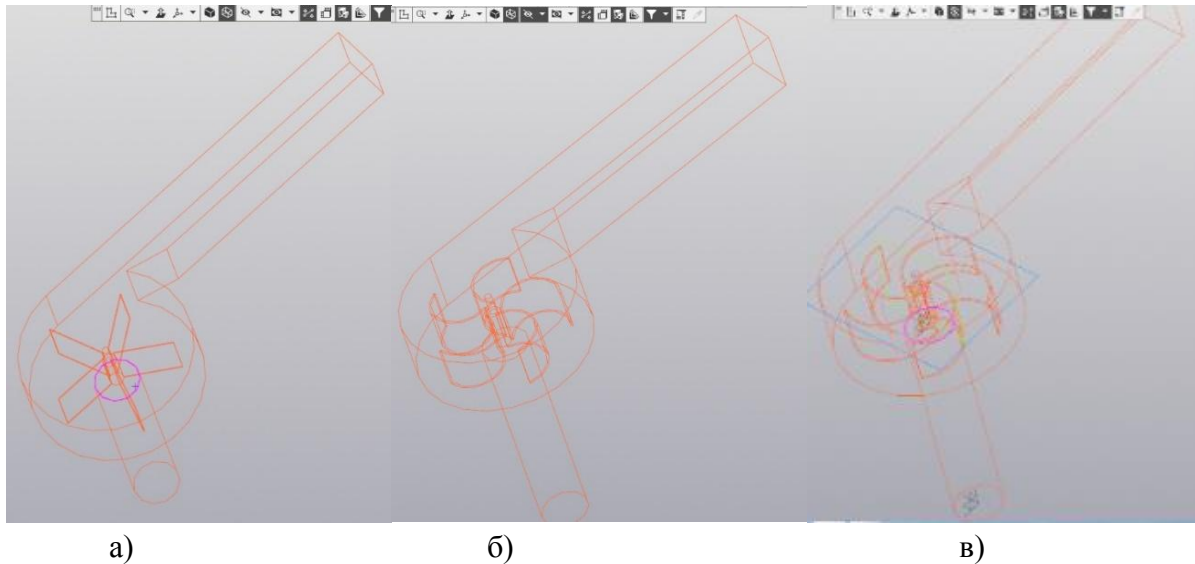
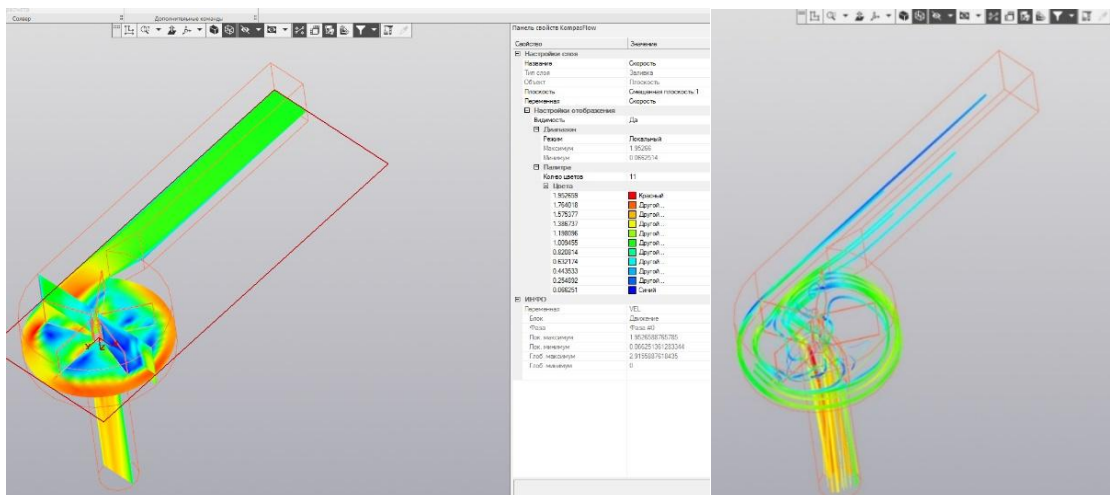


Рисунок 7 – Модели ГВВмГЭС с различными гидротурбинами

Во всех трех моделях глобальные параметры, вещество, набор решаемых уравнений и начальные условия одинаковы за исключением расчетных ячеек. Расчетная ячейка первой модели составила 62067, второй модели – 61849 и третьей модели – 62309. Шаг итерации численного расчета во всех трех моделях был принят 350.

*Исследование 1: Течение жидкости в установке гидротурбиной с плоскими лопастями.*

В цилиндрическом бассейне с диаметром 550 мм, высотой 220 мм, диаметром донного отверстия 85 мм, имеющим подводящий лоток и отводящую трубу, установлена гидротурбина с пятью плоскими лопастями с диаметром 300 мм. С целью исследования взаимодействия потока жидкости с плоскими лопастями и визуального просмотра векторов и значений скорости в установке. На рис.8 представлены результаты исследования.



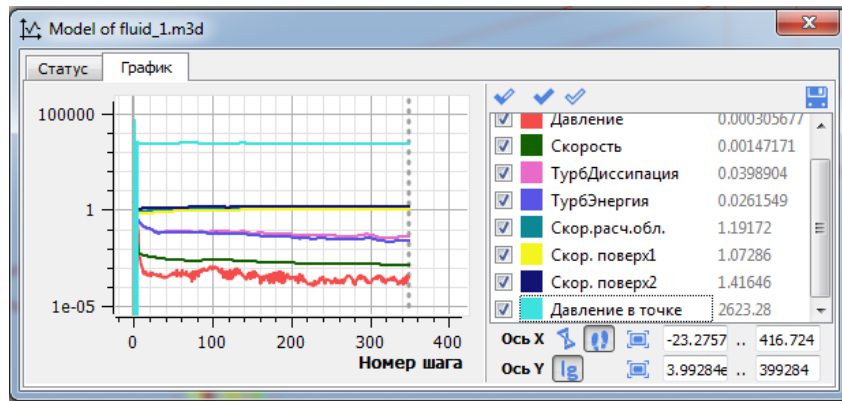


Рисунок 8 – Визуализационные слои «Заливка», «Линия тока» и график в окне мониторинга

*Исследование 2: Течение жидкости в установке гидротурбиной с полуцилиндрическими лопастями.*

В том же цилиндрическом бассейне с теми же параметрами, подводящим лотком и отводящей трубой установлена гидротурбина с пятью полуцилиндрическими лопастями с радиусом изгиба 65 мм, углом входа  $30^{\circ}$  и диаметром 300 мм. С целью исследования взаимодействия потока жидкости с полуцилиндрическими лопастями и визуального просмотра векторов и значений скорости в установке. На рис.9 представлены результаты исследования.

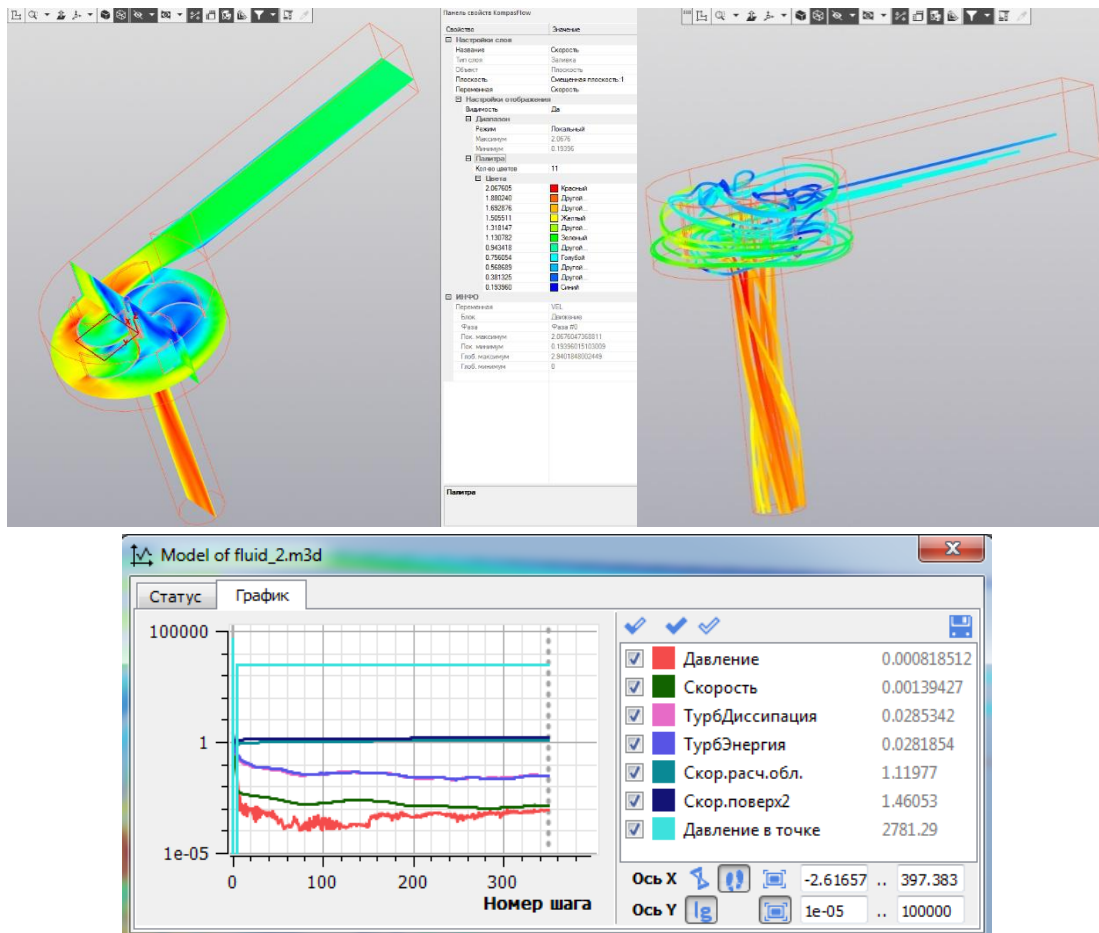


Рисунок 9 – Визуализационные слои «Заливка», «Линия тока» и график в окне мониторинга

*Исследование 3: Течение жидкости в установке гидротурбиной с полуцилиндрическими лопастями и зазором между валом и ребром лопасти.*

В том же цилиндрическом бассейне с теми же параметрами, подводящим лотком и отводящей трубой установлена гидротурбина с пятью полуцилиндрическими лопастями, но имеющими зазор между валом и ребром лопасти для возможности протечки потока жидкости. Радиусом изгиба лопасти 65 мм, углом входа 45°, диаметром 300 мм. С целью исследования взаимодействия потока жидкости с полуцилиндрическими лопастями, имеющими зазор между валом и ребром лопасти, визуального просмотра векторов и значений скорости в установке. На рис.10 представлены результаты исследования.

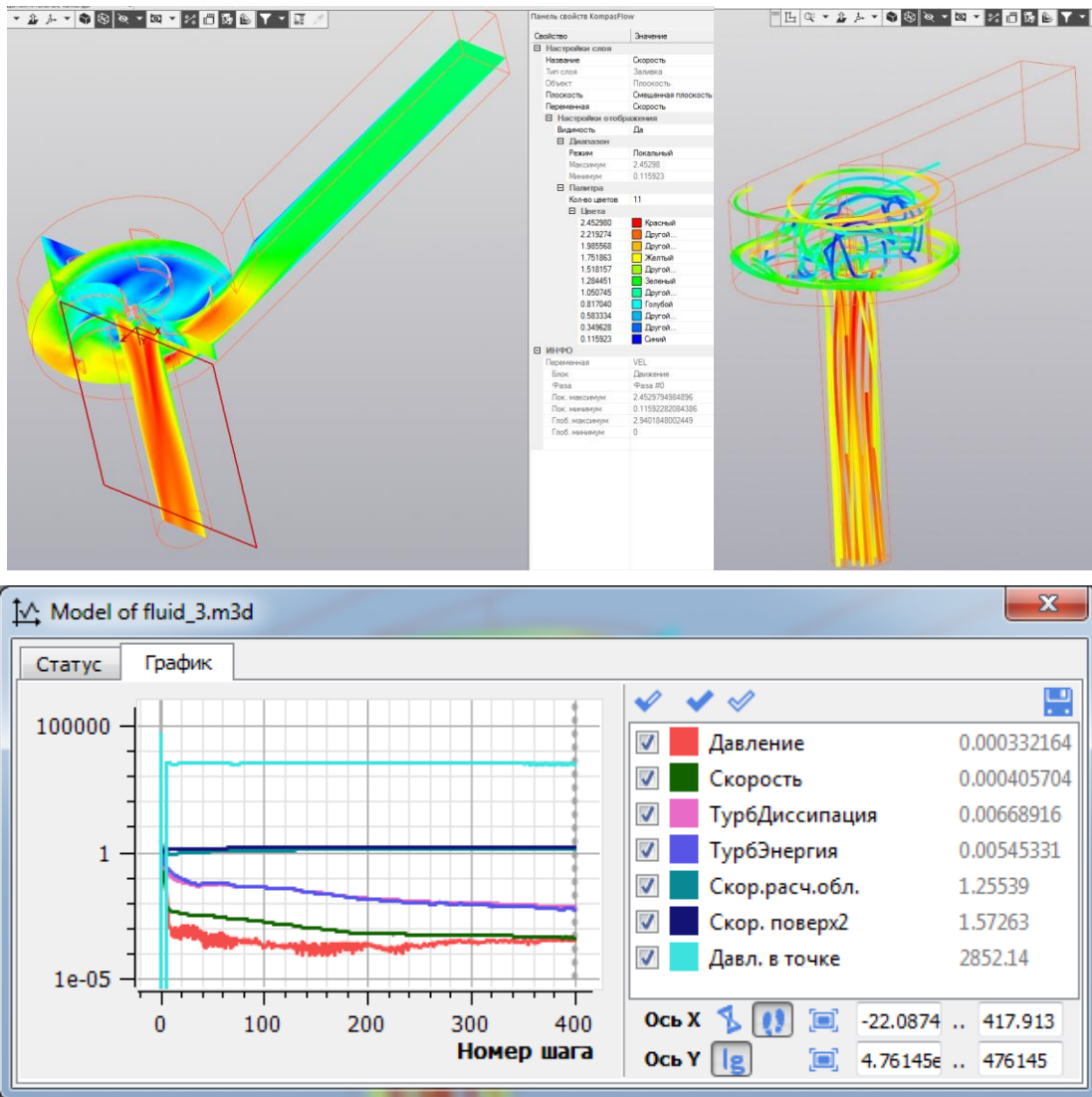


Рисунок 10 – Визуализационные слои «Заливка» по скорости, «Линия тока» и график в окне мониторинга

**Заключение**

В результате исследования можно визуально посмотреть течения жидкости в ГВВмГЭС, где отчетливо видно образование воронки в бассейне, циркуляцию скорости перед и за лопастями, а также распределение скорости в установке. Поток в цилиндрическом бассейне движется от периферии к центру в радиальном направлении, а затем на выходе в осевом направлении. Как показывают результаты анализа, во всех трех моделях, предложенных нами, водоворотных гидротурбин скорости на выходе будут почти одинаковыми. На входе же у модели 1 с плоскими лопастями скорости будут меньше по сравнению с моделями 2 и 3, поскольку относительная скорость, зависящая от формы



лопасти, будет меньше. На входных кромках модели 2 и модели 3 скорости будут примерно одинаковыми. А зазор, оставленный между валом и ребром в модели 3 для повышения эффективности, как оказалось, не влияет на скорости, т.к. выход осуществляется по осевому направлению, как показывает траектория движения жидкости, центральная часть гидротурбины, где имеется зазор, остается в воздушном пространстве созданной гидроворонки. Видно, что скорость потока жидкости в бассейне до взаимодействия с гидротурбиной имеет более высокое значение, а затем низкие значения после того, как отдает энергию гидротурбине. В окнах мониторинга показано, что у модели 1 давление в точке на поверхности лопасти имеет самое низкое значение из трех моделей. Из вышеизложенного предпочтение следует отдать второй модели гидротурбины.

### ***Литература***

1. Медеров, Т.Т. Моделирование и исследование процессов преобразования энергии в бироторной микро-ГЭС/ Медеров Т.Т., Обозов А.Дж., Акпаралиев Р.А., Ураимов Р.У. // Известия Кыргызского государственного технического университета им. И. Раззакова. – №32. – Бишкек, 2014. – С. 273– 278.
2. T.R. Bajracharya, R.M. Ghimire, A.B. Timilsina Design and performance analysis of water vortex powerplant in context of Nepal, 20th International Seminar on Hydropower Plants, 14-16 November 2018, Vienna, Austria.
3. B. Timilsina, S. Mulligan, and T. R. Bajracharya, “Water vortex hydropower technology: a state-of-the-art review of developmental trends,” Clean Technologies and Environmental Policy, vol. 20, no. 8, pp. 1737–1760, 2018.
4. Медеров, Т.Т. Результаты построения гидродинамической модели турбины микро-ГЭС / Т.Т. Медеров. // Известия Кыргызского государственного технического университета им. И. Раззакова. – №33. – Бишкек, 2015. – С. 273– 278.
5. Викторов, Г.В. Гидродинамическая теория решеток. – М.: «Высшая школа», 1969. – 368 с.
6. Wanchat S. and R. Suntivarakorn. Preliminary design of a vortex pool for electrical generation / S. Wanchat, R. Suntivarakorn // Journal of Computational and Theoretical Nanoscience, 13(1), 2011.
7. Обозов, А.Дж. Возобновляемые источники энергии./ Учебное пособие для вузов. – Бишкек, ИЦ «Техник», 2010 г. – 264 с.
8. Лойцянский, Л.Г. Механика жидкости и газа/ Учеб. для вузов. – Изд. 7-е / Л.Г. Лойцянский. – М.: Дрофа, 2003. – 840 с.
9. Бакасова, А.Б. Расширенные варианты использования гидроветряной электроустановки и автоматическая стабилизация режимов ее работы/ Бакасова А.Б., Асанов М.С., Сатаркулов К. // Проблемы автоматики и управления. –2021.– №3(42). –С. 4–14.
10. [https://kompas.ru/source/info\\_materials/2018/KompasFlow-Help.pdf](https://kompas.ru/source/info_materials/2018/KompasFlow-Help.pdf) (Дата обращения: 01.11.21)