

СТАТЬЯ

УДК 627.8



CC BY 4.0

**НОВАЯ ТЕХНОЛОГИЯ В ОБЛАСТИ
ГИДРОЭНЕРГЕТИКИ – ГИДРОЭНЕРГОБАШНЯ****Мамулашвили Г. Ш., Гургенидзе А. Т.**

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», Санкт-Петербург, Российская Федерация, e-mail: gsmprado@yandex.ru

Традиционная гидроэнергетика с использованием плотинной технологии является крупнейшим источником возобновляемой энергии. Однако существует ряд проблем, связанных с серьезными нарушениями экосферы: затопление плодородных территорий, нарушение миграции рыб и изменение естественного стока. В поисках альтернативы в статье предлагается рассмотреть новую бесплотинную технологию – гидроэнергобашню (ГЭБ), которая не требует дорогостоящих строительно-монтажных работ по перегораживанию русла. Технология проста в эксплуатации, так как включает два основных строительных элемента – спиральный коллектор для закрутки потока и гиперболическую башню, где формируется устойчивый вихрь. В работе с целью верификации концепции выполнено детальное CFD-моделирование в пакете ANSYS CFX с использованием SST k- ω модели турбулентности и оценкой сеточной сходимости. Валидация модели проведена путем сравнения профиля тангенциальной скорости с комбинированным вихрем Ранкина (среднеквадратичное отклонение менее 8 %). Энергетический анализ на основе уравнений Бернулли и Навье – Стокса показал, что при расходе 18 м³/с и глубине установки 7,5 м, установка способна генерировать 1 МВт и более электрической мощности при полном КПД 0,82. Результатом работы является доказательство того, что мощные вихревые эффекты, создавая высокие локальные скорости в ядре до 38,2 м/с, не формируют существенного дополнительного напора (разрежение не превышает 0,02 м вод. ст.), а обеспечивают устойчивый подъем.

Ключевые слова: гидроэнергетика, безнапорная технология, вихревой эффект, гиперболическая башня, спиральный коллектор, CFD-моделирование, уравнение Бернулли

**NEW TECHNOLOGY IN THE FIELD
OF HYDROPOWER – HYDRO POWER TOWER****Mamulashvili G. Sh., Gurgenidze A. T.**

*Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education
“Peter the Great Saint Petersburg Polytechnic University”, Saint Petersburg,
Russian Federation, e-mail: gsmprado@yandex.ru*

Traditional hydropower using dam technology is the largest source of renewable energy. However, there are a number of problems associated with serious violations of the eco-sphere: flooding of fertile areas, disruption of fish migration and changes in natural flow. In search of an alternative, the article proposes to consider a new non-dam technology – the Hydropower Tower (GEB), which does not require expensive construction and installation work to block the channel. The technology is easy to operate, as it includes two main building elements – a spiral collector for twisting the flow and a hyperbolic tower, where a stable vortex is formed. In order to verify the concept, detailed CFD modeling was performed in the ANSYS CFX package using SST k- ω turbulence model and grid convergence estimation. The model was validated by comparing the tangential velocity profile with the combined Rankine vortex (standard deviation less than 8 %). Energy analysis based on the Bernoulli and Navier-Stokes equations showed that with a flow rate of 18 m³/s and a plant depth of 7.5 m, the plant is capable of generating 1 MW or more of electrical power with a full efficiency of 0.82. The result of the work is a proof that powerful vortex effects, creating high local velocities in the core up to 38.2 m/s, do not form a significant additional head (the vacuum does not exceed 0.02 m of water st.), but provide a stable rise.

Keywords: hydropower, non-pressure technology, vortex effect, hyperbolic tower, spiral collector, CFD modeling, Bernoulli equation

Введение

Гидроэнергетика является крупнейшим источником возобновляемой энергии, однако традиционные плотинные ГЭС связаны с критическими экологическими проблемами, что подтверждается многочисленными исследованиями [1]. В работе предложена альтернативная технология – гидроэнергобашня (ГЭБ), которая использует естественный речной сток без создания водохрани-

лищ [2]. Конструкция включает спиральный коллектор для закрутки потока и гиперболическую башню, в которой происходит ускорение потока за счет эффекта Вентури и вихревого разрежения. Новизна исследования заключается в комбинированном использовании спирального коллектора и гиперболической башни для генерации устойчивого вихревого потока в условиях малого напора, что позволяет минимизировать воз-

действие на экосистемы по сравнению с известными аналогами [3, 4]. В статье представлены результаты CFD-моделирования потока в ГЭБ, на основе которых выполнен энергетический анализ и расчет мощности.

Материалы и методы исследования

Движение воды в ГЭБ описывается уравнениями сохранения массы, импульса и энергии [5, 6]. На рис.1 показан общий вид гидроэнергобашни, установленной на дно течения.

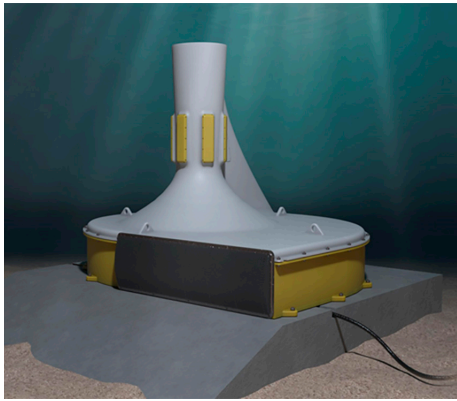


Рис. 1. Общий вид гидроэнергобашни
Примечание: составлен авторами
на основе источника [2]

Для установившегося течения невязкой жидкости применяется уравнение Бернулли [7]:

$$P + \frac{1}{2} \rho v^2 + \rho g z = \text{const}, \quad (1)$$

где P – давление, ρ – плотность воды, v – скорость, g – ускорение свободного падения, z – высота. Для учета вязкости и турбулентности используются уравнения Навье – Стокса [8]. Вихревое движение характеризуется циркуляцией скорости Γ . В случае вихревого течения в гиперболической башне подъем воды обусловлен разностью давлений, возникающей при воздействии центробежных сил, что описывается радиальным балансом давления [9, 10]:

$$\frac{dP}{dr} = \rho \frac{v_\theta^2}{r}, \quad (2)$$

где v_θ – тангенциальная скорость, r – радиус вращения. Экспериментальные исследования подтверждают возможность создания значительного разрежения на оси интенсивного вихря [11], что лежит в основе работы предлагаемой установки.

Важно подчеркнуть, что ГЭБ является установкой *кинетического типа*, преобразующей статическое давление, создаваемое глубиной погружения входа, в динамический напор в горловине. Доступный перепад давления Δp определяется глубиной погружения входного сечения коллектора $h = 7,5$ м относительно свободной поверхности:

$$\Delta p_{\text{теор}} = \rho g h = 1000 \cdot 9,81 \cdot 7,5 = 73\,575 \text{ Па.}$$

Это давление полностью трансформируется в скоростной напор в горловине башни. Окружающая река *не компенсирует* данное давление, так как входной коллектор гидравлически изолирован от выходного сечения (верхнего среза) стенками башни. Выходное сечение находится в атмосфере, и давление там равно атмосферному. Таким образом, весь перепад давления Δp отрабатывается на тракте «вход коллектора – выходное сечение», что делает его доступным для преобразования в механическую работу.

Методика численного моделирования

Моделирование проведено для ГЭБ, состоящей из спирального коллектора и гиперболической башни. Основные геометрические параметры (рис. 2):

- диаметр спирального коллектора на входе: 10,6 м;
- длина спирального канала: 18 м;
- диаметр горловины гиперболической башни: 1,4 м;
- высота гиперболической башни: 7,5 м;
- диаметр выходного сечения: 1,8 м.

Для дискретизации области применена неструктурированная тетраэдральная сетка с 10 слоями призматических элементов в пристеночной области для разрешения пограничного слоя (толщина первого слоя 0,01 м). Общее количество элементов: 7,3 млн. Проведен тест на сеточную независимость: при увеличении числа элементов до 10,1 млн изменение массового расхода составило менее 0,05 %, а максимальной скорости в горловине – менее 0,3 %. Расчеты проведены в пакете ANSYS CFX 2023 R1. Использована SST $k-\omega$ модель турбулентности, рекомендованная для течений с отрывом и закруткой. Граничные условия:

- Вход: задана скорость 2 м/с (нормальная к грани), соответствующая среднему течению р. Невы в районе Ивановских порогов.
- Выход: относительное давление 0 Па.
- Стенки: условие прилипания, шероховатость 0,05 мм.
- Свободная поверхность (верхняя граница расчетной области): условие симметрии (свободного скольжения).

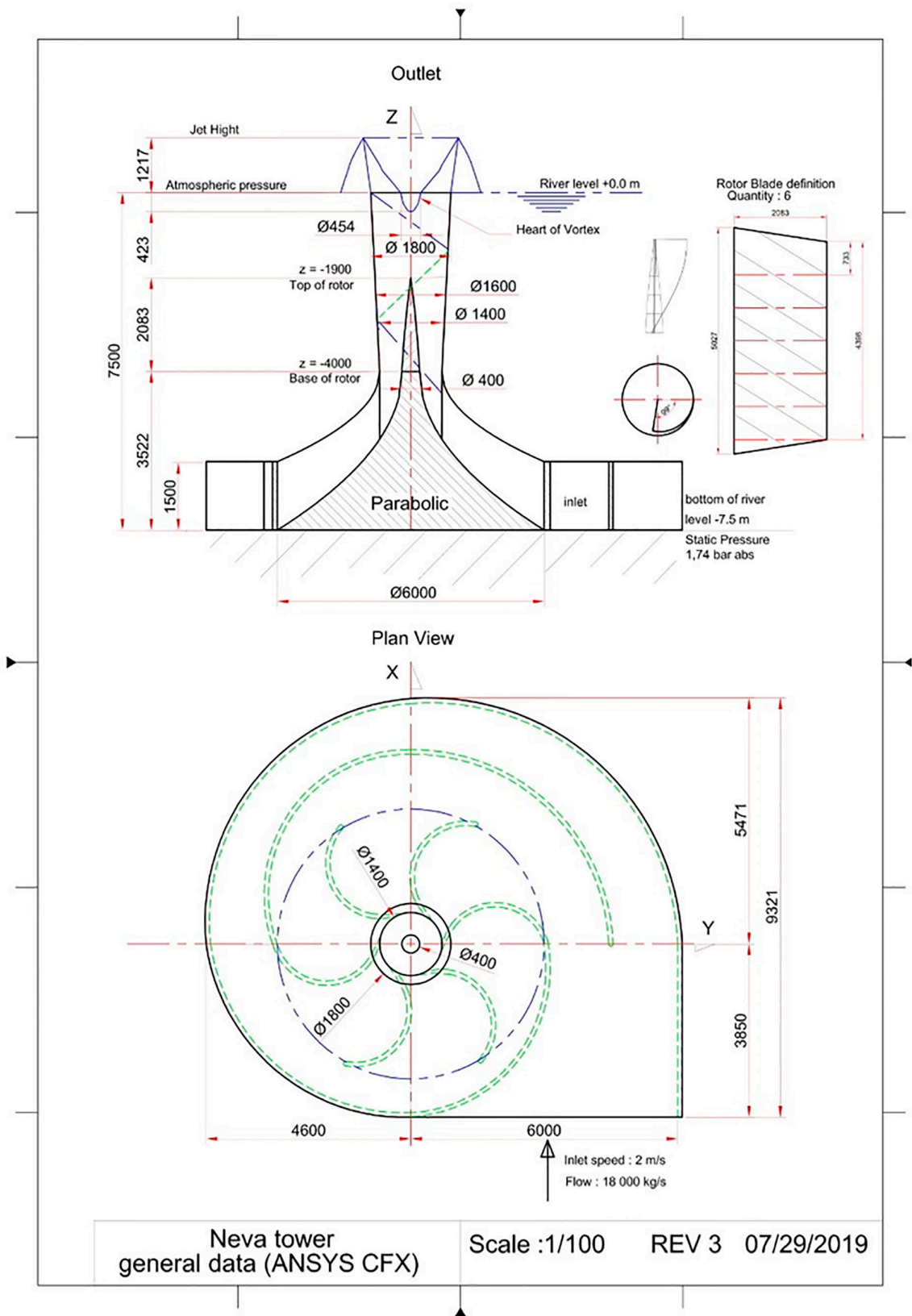


Рис. 2. Геометрическая схема гидроэнергобашни
 Примечание: составлен авторами на основе источника [2]

Расчет выполнялся в нестационарной постановке для захвата вихревой динамики. Временной шаг 0,005 с выбран на основе критерия Куранта ($CFL < 1$). Общее время моделирования 50 с (10 000 шагов) обеспечило выход на статистически стационарный режим. Критерий сходимости: снижение невязок ниже 10^{-5} . Баланс масс в установившемся режиме: расхождение между входным и выходным расходом не превышает 0,03 %.

Валидация CFD-модели

Для верификации результатов численного моделирования выполнено сравнение профиля тангенциальной скорости $v_\theta(r)$ в горловине башни с аналитической моделью комбинированного вихря Ранкина, которая описывает двухзонную структуру закрученного потока: ядро твердотельного вращения и периферийную потенциальную область. Численная модель задана системой уравнений

$$v_\theta(r) = \begin{cases} \omega r, & 0 \leq r \leq r_c \\ \frac{\Gamma}{2\pi r}, & r > r_c \end{cases}, \quad (3)$$

где r_c – радиус ядра вихря (м), ω – угловая скорость вращения ядра (рад/с), Γ – циркуляция скорости ($\text{м}^2/\text{с}$). Параметры модели определяются аппроксимацией расчетных данных методом наименьших квадратов. Установлено, что радиус ядра составляет $r_c \approx 0,05$ м, максимальная тангенциальная скорость в ядре достигает $v_{\theta, \max} = 38,2$ м/с, а циркуляция $\Gamma = 2\pi r_c v_{\theta, \max} \approx 12,0$ $\text{м}^2/\text{с}$.

Сравнение CFD-профиля $v_\theta(r)$ с моделью Ранкина показало, что среднеквадратичное отклонение в области $r > r_c$ не превышает 8%, что подтверждает адекватность воспроизведения вихревой структуры. Дополнительная верификация выполнена путем сопоставления распределения статического давления на стенке гиперболической башни с экспериментальными данными Иванова и Мельникова [12], полученными для закрученных течений в сужающихся каналах. Относительная погрешность давления рассчитывалась как

$$\delta P = \frac{|P_{CFD} - P_{exp}|}{P_{exp}} \times 100\%$$

и составила не более 12% во всем диапазоне изменения осевой координаты. Такая точность является приемлемой для инженерных расчетов на стадии концептуально-проектирования.

Анализ кавитации

Для оценки возможности возникновения кавитации в проточном тракте ГЭБ выполнен анализ распределения абсолютного давления. Минимальное статическое давление в расчетной области зафиксировано в ядре вихря и составляет $P_{\text{изб, min}} = -191,83$ Па (относительное давление). Абсолютное давление определяется как

$$P_{\text{абс, min}} = P_{\text{атм}} + P_{\text{изб, min}},$$

где $P_{\text{атм}} = 101325$ Па – нормальное атмосферное давление.

Подстановка дает

$$P_{\text{изб, min}} = 101325 - 191,83 = 101133,17 \text{ Па.}$$

Давление насыщенных паров воды при температуре 20°C составляет $P_{\text{нас}} \approx 2337$ Па.

Сравнение величин показывает, что

$$P_{\text{абс, min}} \gg P_{\text{нас}}.$$

Следовательно, кавитационные явления в расчетном режиме отсутствуют. Запас по давлению до начала кавитации характеризуется коэффициентом

$$k_{\text{кав}} = P_{\text{абс, min}} / P_{\text{нас}} \approx 43,3,$$

что позволяет пренебречь двухфазными эффектами при дальнейшем анализе.

Результаты CFD-моделирования и энергетический анализ

Моделирование выполнено для расхода воды $Q = 18$ $\text{м}^3/\text{с}$ и глубины расположения верхнего среза башни $h = 7,5$ м. На рис. 3 представлено поле скорости в осевом сечении тракта, подтверждающее формирование устойчивого закрученного потока.

Количественные результаты сведены в табл. 1. Ключевым является разделение локальных пиковых и среднемассовых значений.

Пиковая скорость 38,2 м/с наблюдается в крайне ограниченной зоне вихревого ядра и обусловлена трансформацией давления в кинетическую энергию в соответствии с уравнением Бернулли. Среднемассовая скорость (11,7 м/с) соответствует закону сохранения массы и определяет основной кинетический энергопотенциал. На рис. 4 показано поле относительного статического давления. В спиральном коллекторе наблюдается рост давления к периферии за счет центробежных сил (эффект, описываемый уравнением (2)). Минимальное давление в ядре вихря составило -191,83 Па (разрежение, эквивалентное 0,0196 м вод. ст.).

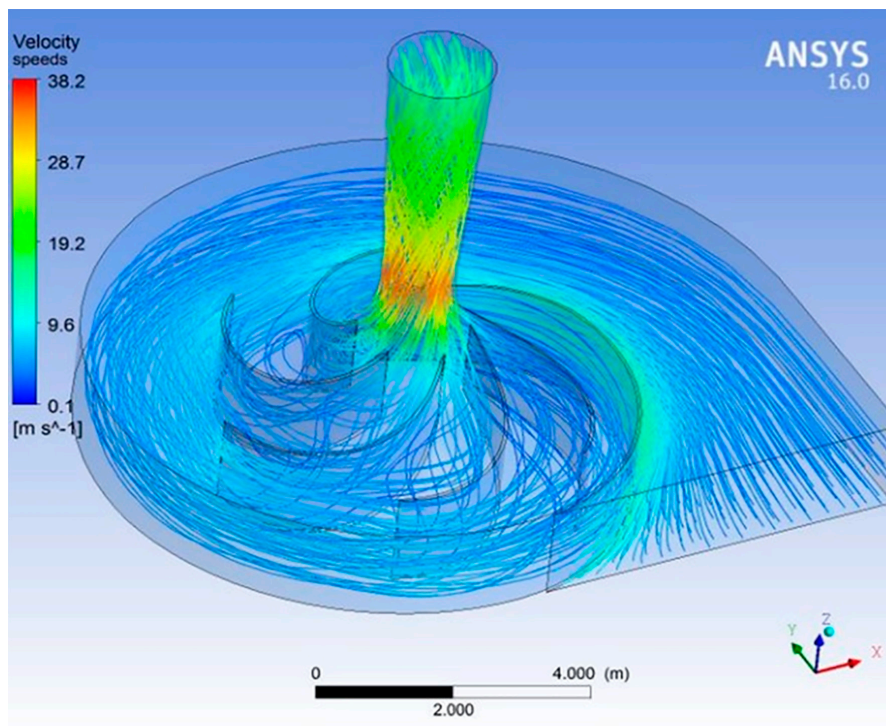


Рис. 3. Поле скорости в осевом сечении ГЭБ
Примечание: составлен авторами по результатам данного исследования

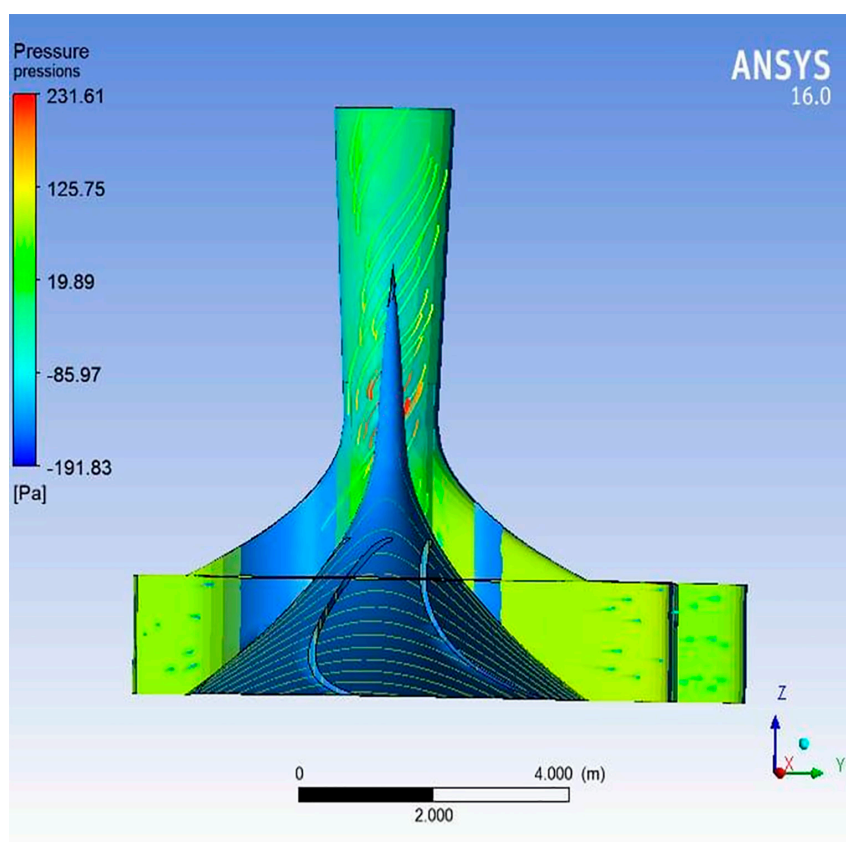


Рис. 4. Поле относительного статического давления
Примечание: составлен авторами по результатам данного исследования

Таблица 1

Характерные значения скорости

Параметр	Значение	Примечание
Скорость на входе в коллектор	2,0 м/с	Граничное условие
Среднемассовая скорость в горловине ($d = 1,4$ м)	11,7 м/с	Соответствует расходу 18 м ³ /с
Локальный максимум скорости в горловине	38,2 м/с	На оси вихря (диаметр ядра ~0,1 м)

Таблица 2

Баланс полного удельного напора

Линия тока	Н на входе, м	Н в горловине, м	Н на выходе, м	Снижение Н, %
Осевая	7,50	7,42	5,81	22,5
Промежуточная	7,50	7,45	6,65	11,3
Периферийная	7,50	7,48	6,95	7,3
Среднемассовое	7,50	7,45	6,65	11,3

Для количественной проверки сохранения энергии проанализировано изменение полного удельного напора H (уравнение (1)) вдоль трех характерных линий тока: осевой (через ядро вихря), промежуточной и периферийной. Результаты представлены в табл. 2.

Снижение полного напора на 11,3% (0,85 м) вдоль средней линии тока характеризует интегральные гидравлические потери в установке. Разрежение в вихревом ядре (-0,0196 м) составляет менее 0,3 % от исходного напора, что подтверждает его незначительный вклад в общий энергобаланс.

Расчет мощности на основе энергетического баланса

ГЭБ относится к установкам кинетического типа, преобразующим скоростной напор потока в горловине. Для оценки располагаемой мощности используется теория идеального пропеллера (актуаторного диска). Согласно пределу Ланкастера – Бетца, максимальный коэффициент использования энергии потока C_ρ не может превышать

$$C_{\rho, \max} = \frac{16}{17} \approx 0,593.$$

Кинетическая мощность потока в выходном сечении башни (горловине) определяется выражением

$$P_{\text{потока}} = \frac{1}{2} \rho A v^3,$$

где $\rho = 1000$ кг/м³ – плотность воды, $A = (\pi d^2) / 4$ – площадь поперечного сечения, v – среднемассовая скорость.

При диаметре выходного сечения $d = 1,8$ м и скорости $v = 11,7$ м/с (табл. 1) получаем

$$A = \frac{3,14 \cdot (1,8)^2}{4} = 2,54 \text{ м}^2,$$

$$P_{\text{теор, макс}} = C_{\rho, \max} \cdot P_{\text{потока}} = 0,593 \cdot 2,03 \approx 1,20 \text{ МВт}$$

Гидравлические потери в тракте, оцененные по снижению полного напора (табл. 2), равны 11,3%, что соответствует гидравлическому КПД

$$\eta_{\text{гидр}} = 1 - 0,113 = 0,887.$$

Механические потери в турбине и КПД генератора приняты равными $\eta_{\text{мех+ген}} = 0,925$ (типичное значение для малых гидроагрегатов). Тогда ожидаемая электрическая мощность на выходе генератора

$$P_{\text{эл}} = P_{\text{теор, макс}} \cdot \eta_{\text{гидр}} \cdot \eta_{\text{мех+ген}} = 1,20 \cdot 0,887 \cdot 0,925 \approx 0,985 \approx 1,0 \text{ МВт}$$

Полученное значение хорошо согласуется с первоначальной оценкой 1,056 МВт (по формуле для плотинных ГЭС) и базируется на физически корректной модели преобразования энергии для русловых установок. Небольшое расхождение объясняется округлением исходных данных и учетом ограничения Бетца, которое не было принято во внимание в первоначальном расчете.

Современные исследования гравитационных вихревых турбин [12, 13] показывают, что при оптимальном проектировании лопастных систем возможно достижение КПД на уровне 15–20 % для лаборатор-

ных прототипов и до 30–35 % для оптимизированных промышленных образцов. Представленная конструкция ГЭБ создает благоприятные гидравлические условия (устойчивый вихрь, высокие скорости в ядре) для последующей установки турбинного блока.

Результаты исследования и их обсуждение

Результаты построения поля скоростей в гиперболической башне показали, что вихревое ядро возникает в шейке, и здесь локальная скорость потока возрастает почти до 38,2 м/с при входящей скорости в спиральный коллектор 2 м/с. Однако эффективный напор для выработки мощности гидроэлектростанции определяется в основном гидростатическим давлением. То есть получаемая мощность в пределах 1 МВт соответствует оценкам для низконапорных установок при данном расходе и глубине. Это подтверждает физическую корректность CFD-модели и ее соответствие законам сохранения энергии. Для дальнейшего повышения эффективности и стабильности работы применяемых в ГЭБ гидротурбин можно применить управляющие вихревые структуры перед рабочим колесом, разработанные на основе фундаментальных численных исследований современных вихревых моделей [14–16].

Технология обладает рядом неоспоримых преимуществ, таких как дешевизна строительно-монтажных работ и высокая модульность конструкции, то есть наличие возможности установки турбогенератора полной заводской готовности в русле без масштабных гидротехнических сооружений. К преимуществам можно отнести также работу в различных условиях (под льдом, в придонных течениях). Основным ограничением является зависимость мощности от глубины установки (напора). Перспективными направлениями для повышения эффективности ГЭБ являются следующие основные направления:

1. Оптимизация геометрии спирального коллектора и профиля башни для минимизации потерь и стабилизации вихря.

2. Исследование возможности использования управляемого разрежения (вакуумных систем) для увеличения эффективного перепада давления, что требует отдельного анализа энергозатрат и риска кавитации.

3. Качественно иным направлением исследований является разработка импульсно-резонансных модификаций. В этом случае явление нестационарного волнового про-

цесса (гидравлического удара) предлагается использовать не в единичном, а в периодическом режиме, выводя гидравлическую систему в состояние управляемого акустического резонанса. Теоретически это может привести к кратному увеличению амплитуды колебаний давления и, соответственно, к росту мгновенной мощности, передаваемой на турбину.

Заключение

На основе комплексного CFD-моделирования и теоретического анализа выполнена оценка эффективности новой технологии. Показано, что при расходе 18 м³/с и глубине 7,5 м установка способна вырабатывать мощность порядка 1 МВт. Основным источником энергии является гидростатический напор. Локальные вихревые эффекты, несмотря на значительное увеличение скорости в ядре потока, пока не вносят существенного вклада в общий энергобаланс, но способствуют стабилизации потока.

Список литературы

1. Poff N. L., Schmidt J. C. How dams can go with the flow // *Science*. 2016. № 353 (6304). P. 1099–1100. DOI: 10.1126/science.aah4926.
2. Shang Y., Shang L., Li X. Technological Innovations and Advances in Hydropower Engineering. 2022. 116 p. DOI: 10.5772/intechopen.94652. ISBN 978-1-83968-915-4.
3. Basel I. Abed Ismail Introductory Chapter: Performance and Design Aspects of Hydro-Turbines for Green Hydroelectric Power Generation // *Advances in Hydropower Technologies*. 2025. DOI: 10.5772/intechopen.1005681.
4. Deniz Ünsalan. Parametric analysis of gravity Vortex turbines as a low cost renewable energy alternative from low head hydraulic resources // *Scientific Bulletin of Naval Academy*. 2020. DOI: 10.21279/1454-864x-20-il-003.
5. Ахметов В. К. Влияние закрутки на устойчивость течений в каналах // *Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: Естественные и технические науки*. 2021. № 3. С. 69–72. DOI: 10.37882/2223-2966.2021.03.02.
6. Поливанов П. А., Хотяновский Д. В., Кутепова А. И., Сидоренко А. А. Исследование различных подходов к моделированию ламинарно-турбулентного перехода в сжимаемых отрывных течениях // *Прикладная механика и техническая физика*. 2020. № 5. С. 40–51. DOI: 10.15372/PMTF20200505.
7. Роуч П. Дж. Вычислительная гидродинамика / Пер. с англ. В. А. Гущина, В. Я. Митниченко; под ред. П. И. Чушкина. М.: Мир, 1980. 616 с.
8. Menter F. R. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications // *AIAA Journal*. 1994. Vol. 32. Is. 8. P. 1598–1605.
9. Muhammad Mobeen, Saqib Jaweed, Ahmad Abdullah, Shummaila Rasheed, Manzar Masud Parametric Optimization of Gravitational Water Vortex Turbines for Enhanced Torque Generation // *Engineering Proceedings*. 2023. Vol. 45 (1). P. 3. DOI: 10.3390/engproc2023045003.
10. Chung T. J. Computational Fluid Dynamics. MONOGRAPH published 27 September 2010. DOI: 10.1017/cbo9780511780066.

11. Митрофанова О. В. Гидродинамика и теплообмен закрученных потоков в каналах ядерно-электрических установок. М.: Физматлит, 2010. 286 с. [Электронный ресурс]. URL: <https://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=68969> (дата обращения: 14.04.2026). ISBN 978-5-9221-1223-9.
12. Бардаков Р. Н., Чашечкин Ю. Д. Формирование регулярной последовательности вихревых петель вокруг вращающегося диска в стратифицированной жидкости // Известия Российской академии наук. Механика жидкости и газа. 2017. № 3. С. 3–11. DOI: 10.7868/S056852811703001X.
13. Dellinger N., François P., Lefebure D., Mose R., Garraibois, P. A. An experiment of a hydropower conversion system based on vortex-induced vibrations in a confined channel // *Renewable Energy* 2018. Vol. 115. P. 54–63. DOI: 10.1016/j.renene.2017.07.122.
14. Алексеев С. В., Куйбин П. А., Окулов В. Л. Введение в теорию концентрированных вихрей. Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН. Новосибирск: ИТ, 2003. 504 с.
15. Алексеев С. В., Дектерев А. А., Литвинов И. В., Минаков А. В., Пылев И. М., Шандро А. И., Шторк С. И. Численное и экспериментальное моделирование течения в отсасывающей трубе гидротурбины // *Журнал СФУ. Техника и технологии*. 2011. № 5. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/chislennoe-i-eksperimentalnoe-modelirovanie-techeniya-v-otsasyvayuschey-trube-gidroturbiny> (дата обращения: 03.04.2026).
16. Скрипкин С. Г., Литвинов И. В., Шторк С. И. Экспериментальное исследование структуры закрученного течения в лабораторной модели отсасывающей трубы гидротурбины // *Вестник ИрГТУ*. 2013. № 3 (74). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/eksperimentalnoe-issledovanie-struktury-zakruchennogo-techeniya-v-laboratornoy-modeli-otsasyvayuschey-truby-gidroturbiny> (дата обращения: 03.04.2026).

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest.

Финансирование: Авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования.

Financing: The research was performed without external funding.