

Повышение энергоэффективности предприятия за счет установки в системах его водоснабжения гидроэлектрических энергосистем по выработке электроэнергии

Н.К. Аубакирова, К.К. Елемесов, Д.Д. Басканбаева ✉, С.А. Бортебаев

*Казахский национальный исследовательский технический университет имени К.И. Сатпаева,
Республика Казахстан, г. Алматы, info@satbayev.university*

✉ d.baskanbayeva@satbayev.university

Аннотация. Для исследования показателей энергоэффективности предприятий обрабатывающей отрасли был выбран АО «Алматинский завод тяжелого машиностроения» (АЗТМ) как один из крупнейших машиностроительных предприятий в г. Алматы. Показано, что в условиях снабжения водопроводной системы предприятия технической водой могут быть использованы гидроэлектрические энергосистемы по выработке электроэнергии. Установлено, что такие гидроэлектрические энергосистемы могут быть размещены в системе водоснабжения производственных цехов. Проведена оценка, показавшая, что выработанная электроэнергия может быть использована для запитывания собственного оборудования, а также для подачи электроэнергии в общую сеть. Получен средний КПД гидроэлектрических энергосистем по выработке электроэнергии – 39 %. Это позволяет говорить о возможности выработки дополнительных 11 кВт мощности в реальных условиях. Разработанная и представленная в данной работе гидроэлектрическая энергосистема по выработке электроэнергии может быть использована в системах водоснабжения производственных предприятий. Данная система может способствовать повышению энергоэффективности предприятий. В дальнейшем планируется произвести масштабирование данных гидроэлектрических энергосистем по выработке электроэнергии, выполнить агрегаты меньшего и большего размера для использования на более крупных и меньших предприятиях.

Ключевые слова: горные районы, энергоснабжение, возобновляемая энергетика, гидроэнергетика, гидроэлектрические энергосистемы по выработке электроэнергии, промышленность, энергоэффективность

Благодарность/Финансирование: Эта работа была поддержана Министерством науки и высшего образования Республики Казахстан в рамках проекта BR18574141 «Комплексная многоцелевая программа по повышению энергоэффективности и ресурсосбережению в энергетике и машиностроении для промышленности Казахстана», за которую авторы выражают глубокую благодарность.

Для цитирования: Аубакирова Н.К., Елемесов К.К., Басканбаева Д.Д., Бортебаев С.А. Повышение энергоэффективности предприятия за счет установки в системах его водоснабжения гидроэлектрических энергосистем по выработке электроэнергии // Устойчивое развитие горных территорий. – 2024. – Т. 16. – № 2. – С. 642–654. DOI: 10.21177/1998-4502-2024-16-2-642-654.

Increasing the energy efficiency of an enterprise by installing hydroelectric power systems for electricity generation in its water supply systems

N.K. Aubakirova, K.K. Yelemessov, D.Dz. Baskanbayeva[✉], S.A. Bortebayev

Kazakh National Research Technical University named after K.I. Satpayev, Almaty, Republic of Kazakhstan,
info@satbayev.university

[✉]d.baskanbayeva@satbayev.university

Abstract. Introduction. The article presents the results of the research strategy for the development of mountainous territories of Kazakhstan. The study of the possibilities of developing the energy system of mountainous territories is shown on the example of the city of Almaty (Kazakhstan). **Materials and Methods.** To study the energy efficiency indicators of enterprises in the manufacturing industry, Almaty Heavy Machinery Plant (AHMP) was selected as one of the largest machine-building enterprises in Almaty. **Results.** It is shown that in the conditions of supplying the water supply system with industrial water from mountain rivers, hydro turbines can be used. It was found that such hydro turbines can be placed in water supply pipelines of production shops. **Discussion.** An assessment was made that showed that the electricity generated by them can be used to power their own equipment, as well as to supply electricity to the general network. **Conclusion.** The obtained average efficiency of the hydro turbine of 39 % allows us to calculate the possible generation of electricity in real conditions up to 11 kW, while the declared capacity was 16 kW. **Resume.** If we consider the tasks of energy saving in production, we can confidently predict that the generation of electricity from the developed hydro turbine will reduce the total electricity consumed from the grid. **Suggestions for practical applications and directions for future research.** The mini-hydroelectric power station developed and presented in this work can be used in water supply systems of industrial enterprises located in mountainous regions. This system can contribute to increasing the energy efficiency of enterprises. In the future, it is planned to scale these mini-hydroelectric power stations and make smaller and larger units for use in larger and smaller enterprises.

Key words: mountainous areas, energy supply, renewable energy, hydropower, hydroelectric power systems for electricity generation, industry, energy efficiency

Acknowledgments/Funding: This work was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Republic Kazakhstan through project BR18574141. "Comprehensive multi-purpose program for improving energy efficiency and resource saving in the energy sector and mechanical engineering for the industry of Kazakhstan" for which the authors are very grateful.

For citation: Aubakirova N.K., Yelemessov K.K., Baskanbayeva D.Dz., Bortebayev S.A. Increasing the energy efficiency of an enterprise by installing hydroelectric power systems for electricity generation in its water supply systems. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2024, vol. 16, no. 2, pp. 642–654. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.21177/1998-4502-2024-16-2-642-654>.

Введение

В Республике Казахстан был принят отраслевой Закон «Об энергосбережении и повышении энергоэффективности», предусматривающий основные направления политики страны в области энергосбережения и повышения энергоэффективности. Исходя из этого была разработана политика энергосбережения с целью снизить энергоёмкость ВВП на 25 % к 2025 году по сравнению с уровнем 2008 года.

Несмотря на успешную реализацию политики энергосбережения, промышленный сектор по-прежнему остается одним из основных потребителей энергоресурсов. На промышленный сектор приходится 30,3 % энергоресурсов (по доле потребления на втором месте после жилищного сектора).

Устаревание технологических процессов: существующее оборудование и технологии часто неэффективны в плане энергопотребления [1–4].

Физический износ оборудования: оборудование может быть устаревшим или изношенным, что приводит к его неполной производительности и повышенным затратам энергии [5–7]. Доля устаревшего и изношенного оборудования в некоторых отраслях составляет от 45 до 60 %.

Недостаточное использование производственных мощностей: устаревшее оборудование и технологии не позволяют полностью использовать производственные мощности, что приводит к повышенному удельному потреблению энергии на единицу продукции.

Анализ состояния энергопотребления промышленных предприятий установил, что на многих из них по-прежнему не проводится серьезной работы по внедрению энергосберегающих технологий. Причем ссылка делается на объективные экономические обстоятельства: резкое снижение объемов выпускаемой продукции; устаревшее технологическое оборудование; низкая степень обеспеченности предприятий современными техническими средствами учета использования энергоносителей и т. п. [8, 9].

Неэффективное использование угля, нефти, газа, электроэнергии и тепла в ближайшем будущем создадут проблемы в энергообеспечении страны, так как для покрытия возрастающей потребности экономики в электрической и тепловой энергии необходимо реконструировать и расширить существующие, строить новые генерирующие мощности, электрические и тепловые сети [8, 10].

Внедрение энергосберегающих технологий и реализация проектов в промышленном секторе может дать предприятиям многочисленные преимущества, существенно влияющие на их финансовые показатели и устойчивое развитие [11–15]. Исследования показывают, что инвестиции в энергосберегающие решения окупаются в кратчайшие сроки. В отличие от строительства новых генерирующих мощностей, требующего гораздо более длительного периода окупаемости (от 2 до 3 раз больше), энергоэффективные технологии дают ощутимую отдачу уже через несколько месяцев или в течение 5–7 лет.

Инвестируя в энергосберегающие технологии, предприятия не только сокращают свои эксплуатационные расходы, но и вносят вклад в сохранение природных ресурсов и улучшение экологической обстановки. Энергосбережение снижает выбросы парниковых газов, связанные с производством электроэнергии, что способствует за-

щите окружающей среды и борьбе с изменением климата [16–18].

Внедрение энергосберегающих технологий и проектов является стратегическим шагом для промышленного сектора Казахстана. Оно обеспечивает множество выгод, включая снижение затрат, повышение конкурентоспособности, экологию ТЭР и содействие устойчивому развитию.

Цель исследований: внедрение гидроэлектрических энергосистем по выработке электроэнергии на промышленном предприятии на примере АО «Алматинский завод тяжелого машиностроения» (АЗТМ).

Методы и материалы

Для исследования показателей энергоэффективности предприятий обрабатывающей отрасли был выбран АО «Алматинский завод тяжелого машиностроения» (АЗТМ) как один из крупнейших машиностроительных предприятий в г. Алматы. АО «АЗТМ» имеет полный цикл технологического процесса производства.

Потребителями электрической энергии на предприятии и зданиях являются технологическое оборудование, электродвигатели, насосы, электрические водонагреватели, оргтехника и система внутреннего и внешнего освещения. В рамках данной работы проведен расчет и практическое исследование возможности использования гидроэлектрических энергосистем по выработке электроэнергии в системе водоснабжения технической водой предприятия.

Результаты и обсуждение

АО «АЗТМ» в процессе производственной деятельности использует электрическую энергию, природный газ, бензин, дизельное топливо и воду для обеспечения нужд производства.

В рамках данной работы для повышения энергоэффективности предприятия в систему водоснабжения АО «АЗТМ» внедрили гидроэлектрическую энергосистему по выработке электроэнергии. Она была разработана в Казахском национальном исследовательском техническом университете имени К.И. Сатпаева в рамках выполнения проекта программно-целевого финансирования «Комплексная многоцелевая программа по повышению энергоэффективности и ресурсосбережению в энергетике и машиностроении для промышленности Казахстана». На данную гидроэлектрическую энергосистему выработки электроэнергии получен Евразийский патент [5].

Для улучшения показателей энергоэффективности АО АЗТМ предлагается установка гидроэлектрических энергосистем по выработке электроэнергии, которую можно устанавливать в технологические трубопроводы завода.

Система водоснабжения для хозяйственных, бытовых и технологических нужд АО АЗТМ осуществляется от городского водопровода по двум вводам. Диаметр трубопроводов 200 мм, точки подключения от границы предприятия 50 и 30 м, материал трубопроводов – трубы стальные электросварные.

Основным оборудованием экспериментальной установки являются искусственный резервуар с наклонным трубопроводом, уменьшенная модель гидротурбины, электрический генератор.

На рис. 1 представлена схема экспериментальной установки для выработки электроэнергии за счет энергии потока жидкости в трубе, установленной под наклоном 40–45°.

Предлагаемая гидроэлектрическая энергосистема выработки электроэнергии функционирует следующим образом.

Рабочая жидкость, с помощью насоса 2 из емкости 1 перекачивается в емкость 9 на высоту 2000 мм. Далее рабочая жидкость поступает через трубу 4 к цилиндрической тройниковой секции, в

которой расположены основные элементы энергосистемы – сферическая турбина и вырабатывающий электроэнергию генератор 3.

Схема элементов гидроэлектрической энергосистемы по выработке электроэнергии приведена на рис. 2.

Гидроэлектрическая энергосистема выработки электроэнергии (рис. 2) содержит расположенную в трубе 1 Т-образного профиля сборную сферическую турбину, к вертикальной цилиндрической тройниковой секции 2 которой прикреплен вырабатывающий электроэнергию генератор 3. Вращающийся вал 4 генератора соединен с валом 5 вращающейся под воздействием потока рабочего вещества турбины.

Сборная сферическая турбина включает в себя между параллельно расположенными верхней и нижней несущими поверхностями ступиц криволинейно изогнутые расположенные равномерно окружности лопатки 6.

Воздействуя на лопатки 6 турбины, рабочая жидкость приводит во вращение сферическую турбину и далее вал генератора, в результате чего вырабатывается электроэнергия. При этом, не зависимо от характеристик проходящей через трубу рабочей жидкости (плотности, скорости потока), предложенная энергосистема за счёт

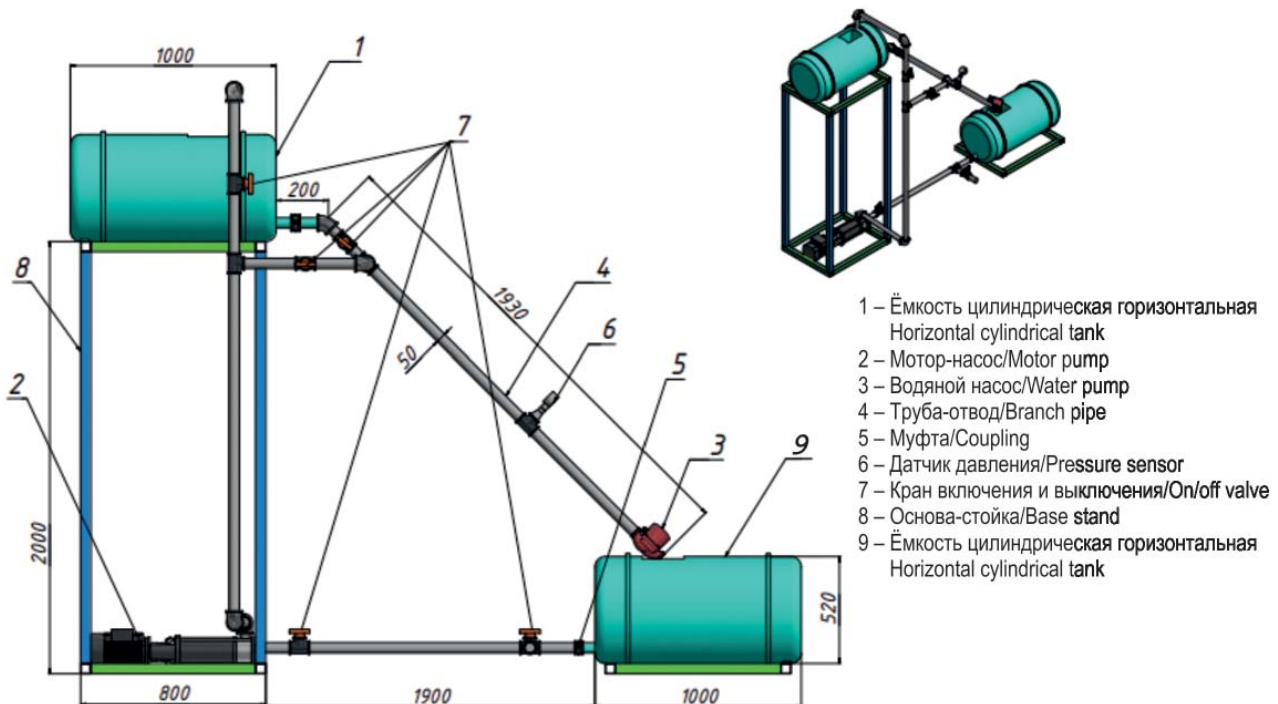


Рис. 1. Экспериментальная установка гидроэлектрической энергосистемы выработки электроэнергии
Fig. 1. Experimental installation of hydroelectric power generation system

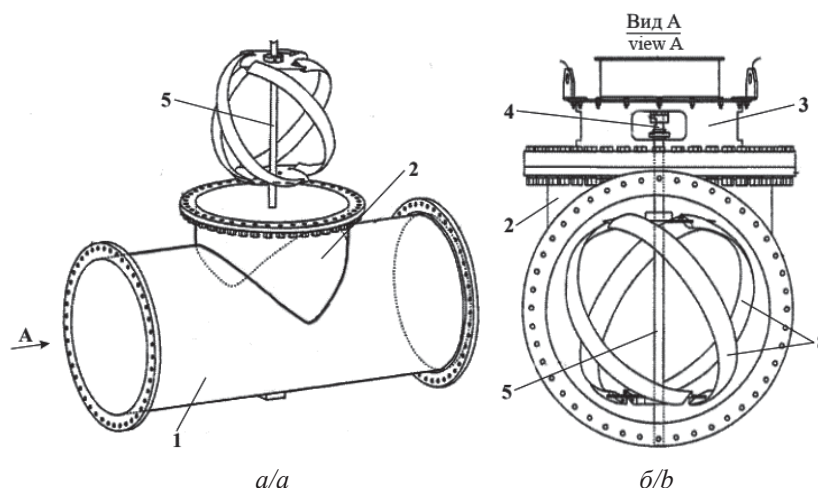


Рис. 2. Элементы гидроэлектрической энергосистемы:

a – труба Т-образного профиля; *б* – сферическая турбина.

Обозначения: 1 – труба; 2 – тройниковая секция; 3 – генератор; 4 – вал генератора; 5 – вал турбины; 6 – лопатки

Fig. 2. Elements of hydroelectric power system: *a* – T-shaped pipe; *b* – spherical turbine.

Designations: 1 – pipe; 2 – tee section; 3 – generator; 4 – generator shaft; 5 – turbine shaft; 6 – blades

подналадочного изменения конфигурации лопаток 6 турбины (дополнительного подналадочного углового разворота несущей поверхности верхней ступицы вместе с верхними консольными концами лопаток 6, а также за счёт дополнительного вертикального перемещения её смещением двуступенчатой цилиндрической втулки вместе со смещением в вертикальном направлении несущей поверхности верхней ступицы) создаёт такой в поперечном сечении аэродинамический профиль лопаток сферической турбины, при котором движение по трубе гидродинамического потока будет осуществляться с минимальной кавитацией и достигается максимальное преобразование аксиальной энергии в энергию вращения вала турбины и генератора.

На рис. 3 представлена схема взаимодействия сборной несущей поверхности верхней ступицы с прикрепленными к ней лопатками и схема взаимодействия микропроцессорного устройства управления с функциональными элементами энергосистемы.

На рис. 4 представлена схема взаимодействия сборной несущей поверхности верхней ступицы с прикрепленными к ней лопатками и схема взаимодействия микропроцессорного устройства управления с функциональными элементами энергосистемы.

В соответствии с предлагаемым изобретением (рис. 2) верхняя несущая поверхность 6 сту-

пицы выполнена сборной и состоящей из дополнительно введенной в состав двуступенчатой односторонне открытой цилиндрической втулки, на нижней, большего диаметра, ступени 9, а также на верхней, меньшего диаметра, ступени 10 которой изготовлены, соответственно, внутренний 11 и наружный 12 зубчатые венцы с треугольными поперечного профиля зубьями, взаимодействующими, соответственно, с идентичными по профилю наружным зубчатым венцом 13 прикрепленного к валу 5 турбины диска 14 и к внутреннему зубчатому венцу 15 промежуточной шестерни 16. Шестерня 16 кинематически (через треугольные зубья) связана с приводной шестерней 17.

В состав несущей поверхности верхней ступицы (рис. 3) дополнительно введены привод 18 подналадочного вращения приводной шестерни 17, привод 19 подналадочного вертикального перемещения двуступенчатой (со ступенями 9 и 10) цилиндрической втулки и микропроцессорное устройство управления 20.

Привод 19 подналадочного вертикального перемещения связан с двуступенчатой цилиндрической втулкой П-образно изогнутым сборным нажимным рычагом 21, в состав которого входит горизонтально ориентированный диск 22 и равномерно по окружности расположенные вертикально ориентированные нажимные рычаги 23, взаимодействующие с торцевой поверхностью двуступенчатой цилиндрической втулки.

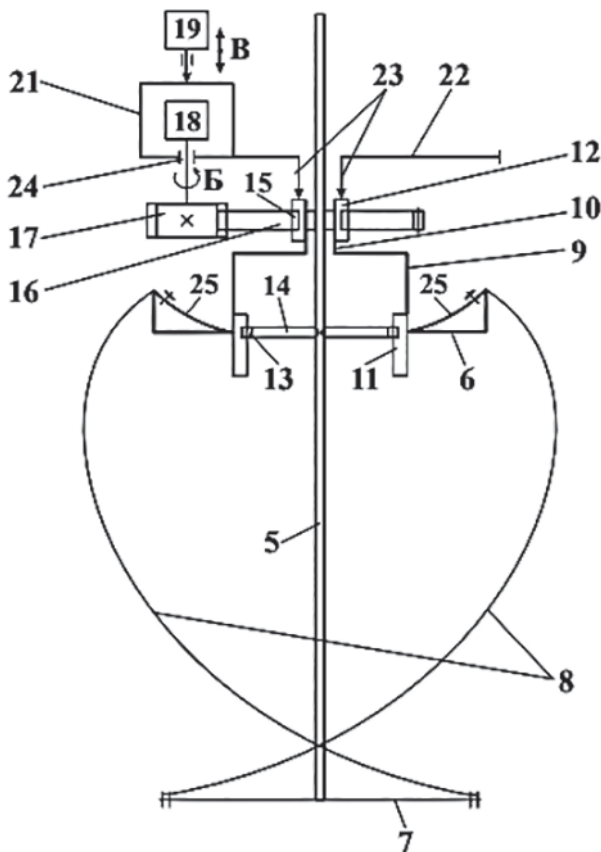


Рис. 3. Схема взаимодействия сборной несущей поверхности верхней ступицы с прикрепленными к ней лопатками.

Обозначения: 5 – вал турбины; 6 – поверхность ступицы; 7 – вал турбины; 8 – лопатки; 9 – нижняя ступень втулки; 10 – верхняя ступень втулки; 11 – внутренний венец; 12 – наружный венец; 13 – наружный венец вала; 14 – диск; 15 – внутренний зубчатый венец; 16 – промежуточные шестерни; 17 – приводная шестерня; 18 – привод приводной шестерни; 19 – привод втулки; 20 – устройство управления; 21 – сборный нажимной рычаг; 22 – диск; 23 – вертикальные нажимные рычаги; 24 – отверстие; 25 – спираль Архимеда

Fig. 3. Scheme of interaction between the assembled bearing surface of the upper hub and the blades attached to it.

Designations: 5 – turbine shaft; 6 – hub surface; 7 – turbine shaft; 8 – blades; 9 – lower stage of the hub; 10 – upper stage of the hub; 11 – inner ring; 12 – outer ring; 13 – outer shaft ring; 14 – disk; 15 – inner toothed ring; 16 – intermediate gears; 17 – drive gear; 18 – drive gear drive; 19 – hub drive; 20 – control device; 21 – assembled pressure lever; 22 – disk; 23 – vertical pressure levers; 24 – hole; 25 – Archimedes spiral

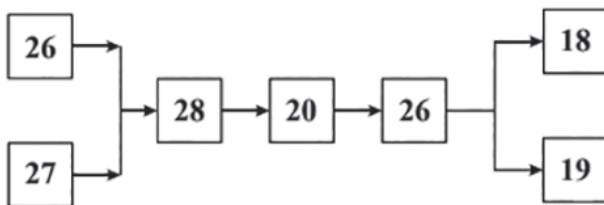


Рис. 4. Схема взаимодействия микропроцессорного устройства управления с функциональными элементами энергосистемы.

Обозначения: 18 – привод приводной шестерни; 19 – привод втулки; 20 – устройство управления; 26 – преобразовательное устройство; 27 – датчик скорости потока рабочей жидкости;

28 – усилительно-преобразовательное устройство

Fig. 4. Diagram of interaction of a microprocessor control device with functional elements of the power system.

Designations: 18 – drive gear; 19 – bushing drive; 20 – control device; 26 – converter device; 27 – working fluid flow rate sensor; 28 – amplifying and converting device

Одновременно, по расположенному на периферии диска 22 отверстию 24 базируется корпус привода 18 подналадочного вращения (по стрелке Б) приводной шестерни 17 с возможностью независимого вертикального перемещения (по

стрелке В) П-образного нажимного рычага 21 относительно неподвижного в вертикальном направлении привода 18 подналадочного вращения.

К периферийной поверхности верхней 6 несущей поверхности ступицы прикреплены верхние консольные концы лопаток 8. При этом профиль периферийной поверхности выступов выполнен криволинейно изогнутым в вертикальной плоскости, а именно по спирали Архимеда 25. Количество таких вертикально ориентированных выступов соответствует числу мест креплений концов лопаток.

Лопатки 8 турбины изготовлены прямоугольной формы тонкостенными из материала со стабильными упругими характеристиками, например из пружинно-рессорной стали 65Г.

Выход микропроцессорного устройства управления 20 через преобразовательное устройство 26 связан со входом привода 18 подналадочного вращения приводной шестерни 17 и входом привода 19 подналадочного вертикального перемещения двуступенчатой цилиндрической втулки.

Ко входу устройства 20 (при необходимости) через усилительно-преобразовательное устройство 28 могут подключаться измерительные пре-

образователи: например, датчик 26 плотности движущейся по трубе рабочей жидкости, датчик 27 скорости потока рабочей жидкости и другие.

Предлагаемая гидроэлектрическая энергосистема выработки электроэнергии функционирует следующим образом.

Рабочая жидкость поступает через трубу 1 к цилиндрической тройниковой секции, в которой расположены основные элементы энергосистемы – сферическая турбина и вырабатывающий электроэнергию генератор 3. Воздействуя на лопатки 8 турбины рабочая жидкость приводит во вращение сферическую турбину и далее вал генератора, в результате чего вырабатывается электроэнергия. При этом, не зависимо от характеристик проходящей через трубу рабочей жидкости (плотности, скорости потока), предложенная энергосистема за счёт подналадочного изменения конфигурации лопаток 8 турбины (дополнительного подналадочного углового разворота несущей поверхности верхней ступицы вместе с верхними консольными концами лопаток 8, а также за счёт дополнительного вертикального перемещения её смещением двуступенчатой цилиндрической втулки вместе со смещением в вертикальном направлении несущей поверхности верхней ступицы) создаёт такой в поперечном сечении аэродинамический профиль лопаток сферической турбины, при котором движение по трубе гидродинамического потока будет осуществляться с минимальной кавитацией и достигается максимальное преобразование аксиальной энергии в энергию вращения вала турбины и генератора.

Подналадочная трансформация кривизны лопаток 8 осуществляется в автоматическом режиме приводами 18 и 19 по принятым алгоритмам выработки управляющих воздействий на приводы управляющими командами микропроцессорного устройства управления 20. В состав обоих приводов 18 и 19 входят высокомоментные низкооборотные управляемые электродвигатели постоянного тока.

Мощность центробежного насоса экспериментальной установки

Для перекачки жидкости из нижнего резервуара в верхний, использован центробежный насос. Расчет мощности центробежного насоса выполнен по следующей методике [20].

Скорость воды во всасывающем трубопроводе $v_1 = 0,56$ м/с.

Диаметр всасывающего трубопровода

$$d_1 = \sqrt{\frac{4Q}{\pi v_1}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 1,2 \cdot 10^{-3}}{3,14 \cdot 0,56}} = 0,05 \text{ м.}$$

Скорость воды в нагнетательном трубопроводе $v_2 = 0,86$ м/с.

Диаметр нагнетательного трубопровода

$$d_2 = \sqrt{\frac{4Q}{\pi v_2}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 1,2 \cdot 10^{-3}}{3,14 \cdot 0,86}} = 0,041 \text{ м.}$$

Подбор насоса осуществляется путем определения рабочей точки при работе центробежного насоса на данную систему трубопроводов. Определяем манометрический напор H_m .

$$H_m = z_1 + z_2 + \frac{P_2 - P_1}{\rho g} + h'_w + h''_w.$$

Сумма гидравлических сопротивлений

$$h'_w + h''_w = \left[\frac{16}{2g\pi^2 d_1^4} \left(\sum_1 \zeta + \lambda \frac{l_1}{d_1} \right) + \frac{16}{2g\pi^2 d_2^4} \left(\sum_2 \zeta + \lambda \frac{l_2}{d_2} \right) \right] Q^2.$$

Дополнительные данные выбираем из табл. 1

Таблица 1. Параметры для гидравлического расчета
Table 1. Parameters for hydraulic calculations

P_2 , МПа MPa	g , м/с ² m/s ²	ρ , кг/м ³ kg/m ³	$v \square 10^{-6}$, м ² с m ² /s	$\zeta_{\text{вх}}$ ζ_{in}	$\zeta_{\text{пов}}$ ζ_{inc}	$\zeta_{\text{вт}}$ ζ_{vt}	$\zeta_{\text{кол}}$ ζ_{kol}
0,1	9,8	972	0,390	0,5	0,15	5	0,5

Для нахождения гидравлического сопротивления находим:

- сумма коэффициентов местных сопротивлений на всасывающей линии трубопровода:

$$\sum_1 \zeta = \zeta_{\text{вх}} + 2\zeta_{\text{пов}} + \zeta_{\text{вт}},$$

$$\sum_1 \zeta = 0,5 + 2 \cdot 0,15 + 5 = 5,8;$$

- сумма коэффициентов местных сопротивлений на нагнетательной линии трубопровода.

$$\sum_2 \zeta = \zeta_{\text{вх}} + 2\zeta_{\text{пов}} + Z_2,$$

$$\sum_2 \zeta = 0,5 + 2 \cdot 0,15 + 62 = 62,8.$$

Определяем коэффициент Дарси, для чего находим число Рейнольдса на всасывающей и нагнетательной линии трубопровода:

$$\begin{aligned} \text{Re}_{1,2} &= \frac{v_1 d_1}{\nu}, \\ \lambda_{1,2} &= \frac{1}{(1,8 \lg(\text{Re}_1) - 1,52)^2}, \\ \text{Re}_1 &= \frac{v_1 d_1}{\nu} = \frac{0,56 \cdot 0,05}{0,390 \cdot 10^{-6}} = 0,72 \cdot 10^5, \\ \lambda_1 &= \frac{1}{(1,8 \lg(\text{Re}_1) - 1,52)^2} = \\ &= \frac{1}{(1,8 \lg(0,72 \cdot 10^5) - 1,52)^2} = 0,014, \\ \text{Re}_2 &= \frac{v_2 d_2}{\nu} = \frac{0,86 \cdot 0,041}{0,390 \cdot 10^{-6}} = 0,9 \cdot 10^5, \\ \lambda_2 &= \frac{1}{(1,8 \lg(\text{Re}_2) - 1,52)^2} = \\ &= \frac{1}{(1,8 \lg(0,9 \cdot 10^5) - 1,52)^2} = 0,013. \end{aligned}$$

Длины всасывающего и напорного трубопроводов $l_1 = 1,9$ м, $l_2 = 2$ м

$$\begin{aligned} h'_\omega + h''_\omega &= \left[\frac{16}{2 \cdot 9,8 \cdot 3,14^2 \cdot 0,05^4} \times \right. \\ &\times \left(5,8 + 0,014 \cdot \frac{1,9}{0,05} \right) + \\ &+ \frac{16}{2 \cdot 9,8 \cdot 3,14^2 \cdot 0,041^4} \times \\ &\times \left(62,8 + 0,013 \cdot \frac{2}{0,041} \right) \left. \right] \times \\ &\times (1,2 \cdot 10^{-3})^2 = 3,53, \\ H_m &= 1,9 + 2 + \frac{0,1 \cdot 10^6 - 0,11 \cdot 10^6}{974 \cdot 9,8} \cdot 3,53 = 1,22. \end{aligned}$$

В результате расчетов получены минимальные требования к мощности центробежного насоса:

- минимальная требуемая мощность насоса – 70 Вт;
- желаемая мощность насоса – 100 Вт;
- расчетное значение минимального расхода – 1 л/с = 3,6 м³/ч (для трубы диаметром 50 мм);
- желаемый расход – 5 м³/ч;
- минимальная высота подъема – 3 м;
- напряжение – 230 В, 50 Гц, однофазное;
- тип соединения – резьбовой фитинг.

Таблица 2. Результаты замеров вырабатываемой мощности гидротурбины
Table 2. Results of measurements of the generated power of a hydraulic turbine

№ No.	Расход воды в трубе, л/с Water flow in the pipe, l/s ($D = 50$ mm)	Объемный расход воды в трубе, м³/с Volumetric water flow in the pipe, m³/s ($D = 50$ mm)	Потери напора по длине, м Head loss along the length, m	Мощность напора, кВт Power of pressure, kW	Вырабатываемая мощность турбины, кВт Turbine output power, kW	Вырабатываемая мощность электрогенератора с учетом КПД = 80 %, кВт Generated power of the electric generator taking into account the efficiency = 80 %, kW	КПД турбины, % Turbine efficiency, %
1	0,25	0,00025	0,014	3,7	1,443	1,1544	39
2	0,5	0,0005	0,014	7,4	2,886	2,3088	39
3	0,75	0,00075	0,014	11	4,29	3,432	39
4	1	0,001	0,014	14,7	5,733	4,5864	39
5	1,25	0,00125	0,014	18,4	7,176	5,7408	39
6	1,5	0,0015	0,014	22,1	8,619	6,8952	39
7	1,75	0,00175	0,014	25,8	10,062	8,0496	39
8	2	0,002	0,014	29,4	11,466	9,1728	39
9	2,25	0,00225	0,014	33,1	12,909	10,3272	39
10	2,5	0,0025	0,014	36,8	14,352	11,4816	39

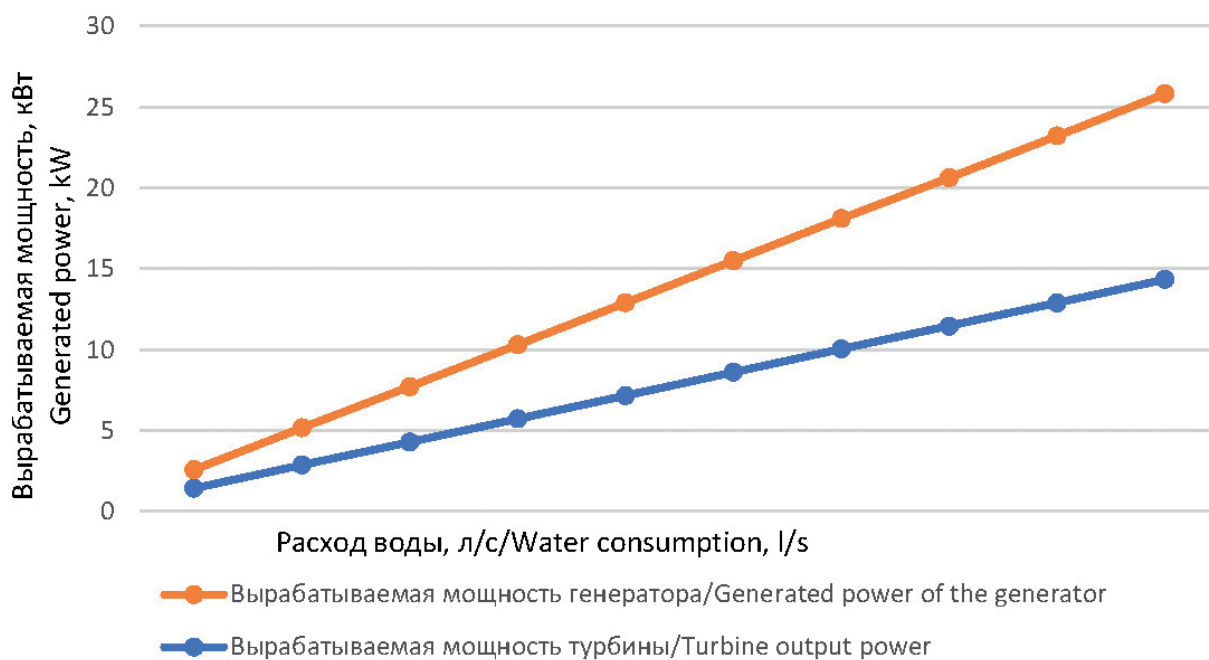


Рис. 5. Зависимость вырабатываемой мощности от расхода воды

Fig. 5. Dependence of generated power on water consumption

Для определения мощности напора жидкости в трубопроводе по наклонной в 45° , используется формула мощности напора:

$$P = Q\rho gH\eta, \text{ кВт},$$

где Q – объемный расход в трубе, $\text{м}^3/\text{с}$; ρ – плотность жидкости, для воды равна $1000 \text{ кг}/\text{м}^3$; g – ускорение свободного падения, $\text{м}/\text{с}^2$; H – высота напора, м; η – КПД турбины.

При опытной эксплуатации турбины на АО «АЗТМ» в качестве рабочей жидкости в трубопроводе использована техническая вода. Для регулирования скорости потока воды в трубе от верхнего резервуара используется шариковый кран. Показания о расходе воды в трубе определяются с помощью аналогового расходомера. Определение вырабатываемой электрической мощности на выходе генератора осуществляется с помощью ваттметра, подключаемого к клеммам генератора.

В ходе испытаний экспериментальной установки при разных скоростях движения жидкости в трубе ($D = 50 \text{ мм}$), регулируемого с помощью крановой задвижки, а также вырабатываемой мощности, удалось определить среднюю производительность разработанной гидротурбины. Полученное среднее значение производительности гидротурбины в целом позволяет оценить выработку электроэнергии в реальных условиях для увеличенного в масштабах опытного образца.

В табл. 2 представлены результаты замеров для 10 значений расхода воды в наклонной трубе $D = 50 \text{ мм}$, расчета мощности гидротурбины и электрического генератора (КПД 80 %) с высотой напора 1,5 м, а также потерями напора по длине 0,014 м.

На рис. 5 представлен график зависимости вырабатываемой мощности от расхода воды. Графики показывают, что с увеличением расхода воды повышается вырабатываемая мощность, т. е. наблюдается линейная зависимость.

Заключение

1. В результате выполненных работ был определен средний КПД используемой в работе гидротурбины. Он составил 39 %. Знание этого КПД позволяет произвести расчет возможной генерации электроэнергии разработанной установки в реальных условиях. Его значение может достигать величины 11 кВт. В то время как заявленной мощностью являлось 16 кВт. Если взять систему энергоснабжения рассматриваемого предприятия в целом, то включение в нее разработанной гидроэлектрической энергосистемы существенно повышает её энергоэффективность.
2. Предложенная энергосистема может быть размещена в трубопроводах водоснабжения производственных цехов и зданий. Максимальная эффективность выработки электроэнергии от

разработанной гидроэлектрической энергосистемы достигается при использовании её в системе водоснабжения из горных источников (рек, водохранилищ).

3. Результаты проведенных работ показывают, что при увеличении расхода воды через разработанную гидроэлектрическую энергосистему повышается вырабатываемая мощность. Зависимость вырабатываемой мощности от расхода воды имеет линейный характер.

Выводы

1. В статье приведены результаты проектирования оптимальной конфигурации и оптимальных характеристик гидроэлектрических энергосистем по выработке электроэнергии для их

использования в системе водоснабжения промышленного предприятия. Работа проведена на базе АО «АЗТМ» (г. Алматы, Казахстан).

2. В работе показано, что спроектированная и изготовленная гидроэлектрическая энергосистема по выработке электроэнергии может успешно вырабатывать до 11 кВт дополнительной электроэнергии. Мощность вырабатываемая этой гидроэлектрической энергосистемой зависит от расхода воды через нее. Зависимость вырабатываемой мощности от расхода носит линейный характер.
3. Коэффициент полезного действия разработанной и изготовленной гидроэлектрической энергосистемы составляет 39 %.

Список литературы

1. Zinovieva O.M., Smirnova N.A. On the issue of assessing the reliability of technical devices at mining enterprises // MIAB. Mining Inf. Anal. Bull. – 2024. – No. 1. – P. 157–168. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2024_1_0_157.
2. Ключев Р.В., Моргоева А.Д., Гаврина О.А., Босиков И.И., Моргоев И.Д. Прогнозирование планового потребления электроэнергии для объединенной энергосистемы с помощью машинного обучения // Записки Горного института. – 2023. – Т. 261. – С. 392–402. EDNFJGZTV.
3. Соколов А.А., Орлова Л.Г., Башмур К.А., Кузьмич Р.И., Кукарцев В.В. Моделирование различных режимов работы трансформаторов, применяемых на подстанциях горнодобывающей промышленности // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2023. – № 11-1. – С. 278–291. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2023_111_0_278.
4. Sherov A.K., Myrzakhmet B., Sherov K.T., Absadykov B.N., Sikhimbayev M.R. Method for selecting the location of the clearance fields of the landing surfaces of gear pump parts with a biaxial connection // News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan, Series of Geology and Technical Sciences. – 2022. – V. 1. – No. 451. – P. 159–166. <https://doi.org/10.32014/2022.2518-170X.153>
5. Balovtsev S.V., Merkulova A.M. Comprehensive assessment of buildings, structures and technical devices reliability of mining enterprises // MIAB. Mining Inf. Anal. Bull. – 2024. – No. 3. – P. 170–181. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2024_3_0_170.
6. Ginzburg S.M., Yudelevich A.M. Reliability assessment of hydraulic structures // Power Technology and Engineering. – 2021. – V. 54. – P. 793–801. <https://doi.org/10.1007/s10749-021-01289-0>.
7. Al-Chalabi H. Development of an economic replacement time model for mining equipment: a case study // Life Cycle Reliability and Safety Engineering. – 2022. – V. 11. – P. 203–217. <https://doi.org/10.1007/s41872-022-00188-1>.
8. Концепция развития электроэнергетической отрасли Республики Казахстан до 2035 года. <https://www.gov.kz/memleket/entities/energo/documents/details/349883?lang=ru>.
9. Sokolov A.A., Fomenko O.A., Ignatev I.V. Development of algorithms for control and control of electric power parameters based on information-measuring system data // Journal of Physics: Conference Series. – 2022. – V. 2176. – P. 012076. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2176/1/012076>.
10. Петров В.Л., Кузнецов Н.М., Морозов И.Н. Управление спросом на электроэнергию в горнопромышленном секторе на основе интеллектуальных электроэнергетических систем // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2022. – № 2. – С. 169–180. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2022_2_0_169.
11. Shutaleva A., Nikonova Z., Savchenko I. Sustainability of Inclusive Education in Schools and Higher Education: Teachers and Students with Special Educational Needs // Sustainability. – 2023. – V. 15. – No. 4. – P. 3011. <https://doi.org/10.3390/su15043011>.
12. Khalikov I.H., Kukartsev V.A., Kukartsev V.V. Review of Methods for Improving the Energy Efficiency of Electrified Ground Transport by Optimizing Battery Consumption // Energies. – 2023. – V. 16. – No. 2. – P. 729. <https://doi.org/10.3390/en16020729>.
13. Boychuk I.P., Kukartsev V.A., Tynchenko Y.A. A Methodological Approach to the Simulation of a Ship's Electric Power System // Energies. – 2023. – V. 16. – No. 24. – P. 8101. <https://doi.org/10.3390/en16248101>.
14. Malozyomov B.V., Martyushev N.V., Sorokova S.N., Efremkov E.A., Qi M. Mathematical Modeling

- of Mechanical Forces and Power Balance in Electromechanical Energy Converter // *Mathematics*. – 2023. – V. 11. – P. 2394. <https://doi.org/10.3390/math11102394>.
15. Bosikov I.I., Klyuev R.V., Tynchenko V.S. Complex Assessment of X-ray Diffraction in Crystals with Face-Centered Silicon Carbide Lattice // *Crystals*. – 2023. – V. 13(3). – P. 528. <https://doi.org/10.3390/cryst13030528>.
 16. Силаев В.И., Ключев Р.В., Еремеев Д.В., Мартынова Т.А., Данильченко Ю.В. Анализ углеродного следа, создаваемого горными предприятиями // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. – 2023. – № 11-1. – С. 265–277. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2023_111_0_265.
 17. Куликова А.А. Новый подход к оценке выбросов от горных предприятий с учетом углеродного следа // *Устойчивое развитие горных территорий*. – 2023. – Т. 15. – № 4. – С. 825–832. <https://doi.org/10.21177/1998-4502-2023-15-4-825-832>.
 18. Методологическое пособие по передовым практикам в области энергосбережения и повышения энергоэффективности Республики Казахстан. – Алматы, 2021.
 19. Елемесов К.К., Басканбаева Д.Д., Бортебаев С.А., Сарсенбаев Е.А., Аубакирова Н.К. Гидроэлектрическая система выработки электроэнергии // *Евразийский патент на изобретение № 046299/23.02.2024*, заявка опублик. 20.02.2024, Бюлл. № 02.
 20. Еловик В.Л., Войтов И.В., Седлухо Ю.П. Расчет и анализ режимов работы центробежных насосов с частотно-регулируемым электроприводом. – Минск: БГТУ, 2022. – 110 с.
-
- ## References
1. Zinovieva O.M., Smirnova N.A. On the issue of assessing the reliability of technical devices at mining enterprises. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.*, 2024, no. 1, pp. 157–168. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2024_1_0_157.
 2. Klyuev R.V., Morgoeva A.D., Gavrina O.A., Bosikov I.I., Morgoev I.D. Forecasting planned electricity consumption for the united power system using machine learning. *Journal of Mining Institute*, 2023, vol. 261, pp. 392–402. EDN FJGZTV.
 3. Sokolov A.A., Orlova L.G., Bashmur K.A., Kuzmich R.I., Kukartsev V.V. Ensuring uninterrupted power supply to mining enterprises by developing virtual models of different operation modes of transformer substations. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.*, 2023, no. 11-1, pp. 278–291. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2023_111_0_278.
 4. Sherov A.K., Myrzakhmet B., Sherov K.T., Absadykov B.N., Sikhimbayev M.R. Method for selecting the location of the clearance fields of the landing surfaces of gear pump parts with a biaxial connection. *News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan, Series of Geology and Technical Sciences*, 2022, vol. 1, no. 451, pp. 159–166. <https://doi.org/10.32014/2022.2518-170X.153>.
 5. Balovtsev S.V., Merkulova A.M. Comprehensive assessment of buildings, structures and technical devices reliability of mining enterprises. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.*, 2024, no. 3, pp. 170–181. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2024_3_0_170.
 6. Ginzburg S.M., Yudelevich A.M. Reliability assessment of hydraulic structures. *Power Technology and Engineering*, 2021, vol. 54, pp. 793–801. <https://doi.org/10.1007/s10749-021-01289-0>.
 7. Al-Chalabi H. Development of an economic replacement time model for mining equipment: a case study. *Life Cycle Reliability and Safety Engineering*, 2022, vol. 11, pp. 203–217. <https://doi.org/10.1007/s41872-022-00188-1>.
 8. Concept for the development of the electric power industry of the Republic of Kazakhstan until 2035. <https://www.gov.kz/memleket/entities/energo/documents/details/349883?lang=ru>.
 9. Sokolov A.A., Fomenko O.A., Ignatev I.V. Development of algorithms for control and control of electric power parameters based on information-measuring system data. *Journal of Physics: Conference Series*, 2022, vol. 2176, p. 012076. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2176/1/012076>.
 10. Petrov V.L., Kuznetsov N.M., Morozov I.N. Electric energy demand management in mining industry using smart power grids. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.*, 2022, no. 2, pp. 169–180. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2022_2_0_169.
 11. Shutaleva A., Nikonova Z., Savchenko I. Sustainability of Inclusive Education in Schools and Higher Education: Teachers and Students with Special Educational Needs. *Sustainability*, 2023, vol. 15, no. 4, p. 3011. <https://doi.org/10.3390/su15043011>.
 12. Khalikov I.H., Kukartsev V.A., Kukartsev V.V. Review of Methods for Improving the Energy Efficiency of Electrified Ground Transport by Optimizing Battery Consumption. *Energies*, 2023, vol. 16, no. 2, p. 729. <https://doi.org/10.3390/en16020729>.
 13. Boychuk I.P., Kukartsev V.A., Tynchenko Y.A. A Methodological Approach to the Simulation of a Ship's Electric Power System. *Energies*, 2023, vol. 16, no. 24, p. 8101. <https://doi.org/10.3390/en16248101>.
 14. Malozyomov B.V., Martyshev N.V., Sorokova S.N., Efremkov E.A., Qi M. Mathematical Modeling of Mechanical Forces and Power Balance in Electromechanical Energy Converter. *Mathematics*, 2023, vol. 11, p. 2394. <https://doi.org/10.3390/math11102394>.

15. Bosikov I.I., Klyuev R.V., Tynchenko V.S. Complex Assessment of X-ray Diffraction in Crystals with Face-Centered Silicon Carbide Lattice. *Crystals*, 2023, vol. 13(3), p. 528. <https://doi.org/10.3390/cryst13030528>.
16. Silaev V.I., Klyuev R.V., Ereemeev D.V., Martynova T.A., Danilchenko Yu.V. Analysis of the carbon footprint created by mining enterprise. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.*, 2023, no. 11–1, pp. 265–277. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2023_111_0_265.
17. Kulikova A.A. A new approach to estimating emissions from mining enterprises, taking into account the carbon footprint. *Sustainable Development of Mountain Territories*, 2023, vol. 15, no. 4, pp. 825–832. <https://doi.org/10.21177/1998-4502-2023-15-4-825-832>.
18. Methodological manual on best practices in the field of energy saving and increasing energy efficiency of the Republic of Kazakhstan. Almaty, 2021.
19. Elemesov K.K., Baskanbaeva D.D., Bortebeaev S.A., Sarsenbaev E.A., Aubakirova N.K. Hydroelectric power generation system. Eurasian invention patent no. 046299/23.02.2024, application published. 02/20/2024, Bull. no. 02.
20. Elovik V.L., Voitov I.V., Sedlukho Yu.P. Calculation and analysis of operating modes of centrifugal pumps with variable-frequency electric drives. Minsk: BSTU, 2022, 110 p.

Сведения об авторах

Аубакирова Назира Курмангажикызы – магистр технических наук, докторант кафедры технологических машин и оборудования Института энергетики и машиностроения им. А. Буркитбаева, Казахский национальный исследовательский технический университет имени К.И. Сатпаева, Республика Казахстан, г. Алматы, 050000, ул. Сатпаева, 22. ms.n.a.k@bk.ru



Nazira K. Aubakirova – Master of Technical Sciences, Doctoral student of the Department of Technological Machines and Transport of Institute of Energy and Mechanical Engineering, Kazakh National Research Technical University named after K.I. Satpayev, 22, Satpayeva str., Almaty, 050000, Republic of Kazakhstan. ms.n.a.k@bk.ru

Елемесов Касым Коптлеуевич – кандидат технических наук, профессор, Директор Института энергетики и машиностроения им. А. Буркитбаева, Казахский национальный исследовательский технический университет имени К.И. Сатпаева, Республика Казахстан, г. Алматы, 050000, ул. Сатпаева, 22. k.yelemessov@satbayev.university



Kassym K. Yelemessov – Cand. Sc., Professor, Director of the Burkitbaev Institute of Energy and Mechanical Engineering, Kazakh National Research Technical University named after K.I. Satpayev, 22, Satpayeva str., Almaty, 050000, Republic of Kazakhstan. k.yelemessov@satbayev.university

Басканбаева Динара Джумабаевна – доктор философских наук, заместитель директора Института энергетики и машиностроения им. А. Буркитбаева, Казахский национальный исследовательский технический университет имени К.И. Сатпаева, Республика Казахстан, г. Алматы, 050000, ул. Сатпаева, 22. d.baskanbayeva@satbayev.university



Dinara Dz. Baskanbayeva – Dr. Sc., Deputy Director of the Institute of Power Engineering and Mechanical Engineering, Kazakh National Research Technical University named after K.I. Satpayev, 22, Satpayeva str., Almaty, 050000, Republic of Kazakhstan. d.baskanbayeva@satbayev.university

Бортебаев Сайын Абильханович – кандидат технических наук, доцент; доцент кафедры технологических машин и оборудования Института энергетики и машиностроения им. А. Буркитбаева, Казахский национальный исследовательский технический университет имени К.И. Сатпаева, Республика Казахстан, г. Алматы, 050000, ул. Сатпаева, 22. s.bortebayev@satbayev.university



Saiyn A. Bortebayev – Cand. Sc., Associate Professor; Associate Professor of the Department of Technological Machines and Transport, Institute of Energy and Mechanical Engineering, Kazakh National Research Technical University named after K.I. Satpayev, 22, Satpayeva str., Almaty, 050000, Republic of Kazakhstan. s.bortebayev@satbayev.university

Автор-корреспондент: Басканбаева Д.Д., d.baskanbayeva@satbayev.university

Corresponding author: Baskanbayeva D.Dz., d.baskanbayeva@satbayev.university

Критерии авторства

Аубакирова Н.К. – концепция статьи, Елемесов К.К. – правка статьи, ресурсы для исследований, Басканбаева Д.Д. – написание статьи, Бортэбаев С.А. – ресурсы для исследований.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors

Aubakirova N.K. – the concept of the article, Yelemessov K.K. – editing of the article, resources for research, Baskanbayeva D.D. – writing an article, Bortebayev S.A. – resources for research.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Получена редакцией: 02.04.2024
Получена после рецензии: 30.04.2024
Принята к печати: 30.05.2024

Received: 02.04.2024
Revised: 30.04.2024
Accepted: 30.05.2024