Теоретическое исследование начинающих ученых
УДК 628.3
DOI: 10.46418/3033-7852_2026_3_3_93–98

МИКРОТУРБИННАЯ УТИЛИЗАЦИЯ ЭНЕРГИИ ПАДАЮЩЕЙ СТОЧНОЙ ВОДЫ В ПЕРЕПАДНЫХ КОЛОДЦАХ БЕЗ ИЗМЕНЕНИЯ ГИДРАВЛИКИ СЕТИ

Виктория Александровна Фомина, Владислав Витальевич Куделко, Наталья Всеволодовна Пантелей

Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Республика Беларусь

© Фомина В. А., Куделко В. В., Пантелей Н. В., 2026

Автор-корреспондент: В. А. Фомина, e-mail: fominaa.victoriaa@gmail.com

АННОТАЦИЯ

Статья посвящена проблеме утилизации гидравлической энергии сточных вод в самотечных канализационных сетях Республики Беларусь. Отмечается, что значительная часть энергии, затраченной насосными станциями на подъём сточных вод, необратимо рассеивается в перепадных колодцах, количество которых только в Минске превышает 1200 единиц. Традиционные решения — микротурбины в напорных водоводах, малые ГЭС на выпусках очистных сооружений и органический цикл Ренкина — ограничены высокой концентрацией взвешенных веществ, абразивным действием песка, малыми перепадами высот и нормативными запретами на изменение гидравлического режима самотечных коллекторов.

Автором предложена конструктивная схема байпасной микротурбины с ковшовым рабочим колесом и магнитной левитацией, размещаемой на стенке перепадного колодца вне потока. Передача вращения осуществляется через герметичную магнитную муфту, что исключает контакт генератора с агрессивной средой. Приведены расчёты электрической мощности для характерных расходов и высот перепада: при $Q = 800$ м^3/ч и $H = 4{,}5$ м мощность составляет 6,37 кВт, суточная выработка — 168 кВт·ч. Экономия оценивается в 14 400 руб./год, срок окупаемости — около 1,5 года. Рассмотрены риски обледенения и коррозии, предложены способы их снижения. Сделан вывод о перспективности байпасных микротурбин для существующих перепадных колодцев без изменения гидравлики сети.

Ключевые слова: микротурбина, сточные воды, перепадный колодец, энергоэффективность, магнитная левитация, ковшовое колесо

Для цитирования: Фомина В. А., Куделко В. В., Пантелей Н. В. Микротурбинная утилизация энергии падающей сточной воды в перепадных колодцах без изменения гидравлики сети // Технология и энергетика. 2026. № 3 (3). С. 93–98. DOI: 10.46418/3033-7852_2026_3_3_93–98.

MICROTURBINE-BASED ENERGY RECOVERY FROM FALLING WASTEWATER IN DROP WELLS WITHOUT ALTERING NETWORK HYDRAULICS

Victoria Aleksandrovna Fomina, Vladislav Vitalyevich Kudelko, Natalya Vsevolodovna Panteley

Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus

Corresponding author: V. A. Fomina, e-mail: fominaa.victoriaa@gmail.com

ABSTRACT

The paper addresses the problem of recovering hydraulic energy from wastewater in gravity-flow sewer systems of the Republic of Belarus. It is noted that a significant part of the energy spent by pumping stations on lifting wastewater is irreversibly dissipated in drop wells, the number of which exceeds 1200 units in Minsk alone. Traditional approaches, such as microturbines in pressurized conduits, small hydropower units at treatment plant outlets, and the organic Rankine cycle, are limited by several factors: high concentrations of suspended matter, abrasive sand action, small elevation drops, and regulatory restrictions on modifying the hydraulic conditions of gravity collectors.

The author proposes a design of a bypass microturbine with a Pelton-type runner and magnetic levitation, installed on the wall of a drop well outside the flow. Power transmission is accomplished through a hermetic magnetic coupling, thereby preventing contact of the generator with the corrosive environment. The paper presents calculations of electrical power for typical flow rates and heads: at $Q = 800$ m³/h and $H = 4.5$ m, the power output is 6.37 kW, with a daily generation of 168 kWh. The savings are estimated at 14,400 rubles per year, with a payback period of about 1.5 years. The risks of icing and corrosion have been examined, and approaches to their mitigation have been proposed. A conclusion has been formulated concerning the promise of bypass microturbines for existing drop wells without alteration of the network hydraulics.

Keywords: microturbine, wastewater, drop well, energy efficiency, magnetic levitation, bucketwheel

For citation: Fomina V. A., Kudelko V. V., Panteley N. V. (2026) 'Microturbine utilization of the energy of falling wastewater in drop manholes without changing the hydraulics of the network', Technology and Energy, no. 3(3), pp. 93–98. DOI: 10.46418/3033-7852_2026_3_3_93–98.

ВВЕДЕНИЕ

Задача энергосбережения в системах коммунального хозяйства Республики Беларусь традиционно сводится к снижению потерь при транспортировке воды и тепла, модернизации насосного оборудования и внедрению частотного регулирования [1, с. 4]. Гораздо реже обсуждается возможность не просто уменьшать потребление, но и генерировать электроэнергию непосредственно на существующих объектах водопроводно-канализационного хозяйства. В системах водоотведения населенных пунктов Республики Беларусь значительная часть гидравлической энергии, затраченной насосными станциями на подъём сточных вод, необратимо рассеивается в самотечных коллекторах. На участках с перепадом рельефа устраиваются перепадные колодцы, в которых кинетическая энергия падающей воды гасится о водобойную плиту или специальные элементы, превращаясь в тепло. Согласно опубликованным данным, только в Минске насчитывается более 1200 таких сооружений с высотой сброса от 1,5 до 8 метров, построенных в 1970–1980-х годах без учёта требований энергосбережения.

Традиционные способы утилизации энергии потока (микротурбины в напорных водоводах, малые ГЭС на выпусках очистных установок) неприменимы к самотечным канализационным сетям. Причинами являются высокая концентрация взвешенных веществ, наличие мусора (тряпки, нитки), абразивное действие песка. Установка турбины непосредственно в трубу приводит к её быстрому забиванию и выходу из строя. Кроме того, любое изменение гидравлического режима самотечного коллектора требует пересмотра проекта. Прежде чем предлагать новые варианты, имеет смысл кратко рассмотреть альтернативные способы утилизации гидравлической энергии сточных вод. Первый вариант — это установка микротурбины в напорный трубопровод перед очистными сооружениями. Такие решения пользуются спросом в США (Lucid Energy), Нидерландах. Однако напорный режим есть далеко не на всех объектах, и сточная вода в напорных коллекторах не менее агрессивна, чем в самотечных. Проблема засорения и износа остаётся. Вторым вариантом является использование энергии сбросного канала после очистных сооружений. Вода на этом этапе значительно чище, что снижает риск засорения. Но возникает новая трудность: перепад высот на выпуске невелик (0,5–2 м), поэтому энергетический потенциал невысок. Третьим вариантом предлагается органический цикл Ренкина для утилизации низкопотенциального тепла сточных вод. Технология рабочая, но сложна, дорога и имеет низкий КПД при малых мощностях.

В данной работе рассмотрим технологию отбора энергии не из потока внутри трубы, а из свободно падающей струи в перепадном колодце с использованием байпасной микротурбины, монтируемой на стенке колодца и не контактирующей с агрессивной средой.

Таблица 1. Сравнение альтернативных способов утилизации гидравлической энергии сточных вод
Table 1. Comparison of alternative methods for utilizing the hydraulic energy of wastewater

Критерий	Микротурбина в напорном водоводе	Микротурбина после очистных сооружений	Органический цикл Ренкина	Байпасная микротурбина
Необходимая инфраструктура	Напорный коллектор (есть не везде)	Выпускной канал (требует строительства)	Любой источник тепла (сложное оборудование)	Существующий перепадный колодец
Изменение гидравлики сети	Да (врезка в трубу)	Нет (открытый канал)	Нет	Нет (установка на стенке)
Риск засорения сточными водами	Высокий (волокна, песок)	Низкий (вода очищена)	Не применим	Низкий (открытое ковшовое колесо)
Необходимость установки водоотведения	Да	Да (строительные работы)	Нет	Нет
Эксплуатационная сложность	Средняя	Низкая	Высокая	Низкая

Сравнить альтернативные способы утилизации гидравлической энергии можем по основным критериям (таблица 1).

Как следует из таблицы, предлагаемая байпасная микротурбина не требует остановки водоотведения, имеет низкий риск засорения и может быть установлена на существующих перепадных колодцах.

Рассмотрим выгоду с экономической точки зрения. Средний расход сточных вод через типовой перепадный колодец в дневное время составляет 300–1000 м³/ч, ночью снижается до 50–150 м³/ч. Теоретическую мощность потока определим зависимостью [2, с. 112]:

$$P_{пот} = \rho g Q H \,, \qquad (1)$$

где $\rho = 1000$ кг/м³ — плотность воды;
$g = 9{,}81$ м/с²;
Q — расход в м³/с;
H — высота перепада в метрах.

С учётом КПД турбины и генератора ($\eta \approx 0{,}65$) электрическая мощность составит:

$$P_э = \eta P_{пот} \,. \qquad (2)$$

В качестве примера рассмотрим перепадный колодец на коллекторе в районе ул. Толстого г. Минска. Для расчёта принимаем характерный для городских сетей расход 800 м³/ч (0,222 м³/с), перепад — 4,5 м [3, с. 98]. Найдём теоретическую и электрическую мощность потока:

$$P_{пот} = 1000 \cdot 9{,}81 \cdot 0{,}222 \cdot 4{,}5 = 9800 \text{ Вт} \approx 9{,}8 \text{ кВт} \,.$$

$$P_э = 9{,}8 \cdot 0{,}65 = 6{,}37 \text{ кВт}.$$

В часы максимального водоотведения (утром и вечером) расход возрастает до 1400 м³/ч, что дает $P_э = 11{,}16$ кВт. В ночной период при расходе 100 м³/ч мощность падает до 0,9 кВт. При этом потери можно рассчитать по следующей формуле:

$$W_{потерь} = P_{пот} \cdot (1-\eta) \cdot 24 = \\ = 9{,}8 \cdot (1-0{,}65) \cdot 24 \approx 82 \text{ кВт} \cdot \text{ч} \,. \qquad (3)$$

Получаем суточную потерю энергии около 82 кВт·ч. Генерация при этом осуществляется на очистных сооружениях, насосных станциях, трансформаторных подстанциях.

Для оценки влияния различных параметров на энергетический потенциал представлены результаты расчёта для нескольких характерных сочетаний высоты перепада и расхода, типичных для канализационных сетей городов (таблица 2).

Таблица 2. Зависимость энергетического потенциала от высоты перепада и расхода (расчётные параметры)
Table 2. Dependence of energy potential on head and flow rate (design parameters)

H, м	Q, м³/ч	$P_{пот}$, кВт	$P_э$, кВт	$E_{год}$, тыс. кВт·ч
3	500	4,1	2,7	12–15
4,5	800	9,8	6,4	28–35
6	1000	16,4	10,7	47–58

Как видно из таблицы, увеличение перепада с 3 до 6 м при росте расхода с 500 до 1000 м³/ч приводит к увеличению электрической мощности более чем в четыре раза. Это указывает на целесообразность оснащения микротурбинами наиболее высоких и полноводных перепадных колодцев.

Расчёты свидетельствуют об огромном потенциале. Казалось бы, достаточно установить в колодец серийную

микротурбину — и проблема решена. Однако существуют препятствия для использования стандартных пропеллерных или центробежных микротурбин в сточных водах. Отсутствие широкого внедрения данных технологий в практике водоотведения объясняется тем, что сточные воды содержат взвешенные вещества и волокнистые включения. Это приводит к быстрому забиванию и абразивному износу проточных частей гидротурбин. Также большинство микротурбин рассчитано на стабильный гидравлический режим. При резком снижении расхода возможно прекращение вращения или переход в насосный режим с обратным током воды, что требует сложных систем управления и обратных клапанов.

Важную роль в выборе конструктивного решения играют и нормативные ограничения. Согласно СН 4.01.02-2019 «Канализация. Наружные сети и сооружения» запрещено любое изменение гидравлического режима самотечных коллекторов без переутверждения проекта [4]. Установка турбины внутри трубы квалифицируется как такое изменение. Монтаж оборудования, не затрагивающий геометрию потока, формально не подпадает под запрет, однако до настоящего времени подобные решения отсутствовали.

Учитывая эти ограничения, перейдём к рассмотрению конструктивной схемы байпасной микротурбины с магнитной левитацией. Установка размещается снаружи перепадного колодца на его стенке. Внутри колодца на пути свободно падающей струи устанавливается ковшовое рабочее колесо (аналог турбины Пелтона), которое приводится во вращение за счёт кинетической энергии воды. Колесо не контактирует с дном и стенками, его ковши выполнены с закруглёнными кромками для предотвращения захвата волокон. Передача вращения от колеса, находящегося в агрессивной среде, к генератору, расположенному снаружи, осуществляется через магнитную муфту. На оси колеса закреплён постоянный магнит (самарий-кобальтовый сплав), снаружи стенки колодца — ответный магнит, связанный с валом генератора. Между ними имеется герметичная титановая или нержавеющая перегородка толщиной 2 мм. Механический контакт отсутствует, что исключает протечки. Чтобы снизить трение в опорах колеса, кольцевые магниты создают подъёмную силу, удерживающую ротор с зазором 1–2 мм. Подшипники (керамические ZrO_2) используются только для центрирования и несут минимальную нагрузку. Колесо изготавливается из износостойкого полиуретана или высокохромистого чугуна.

Согласно учебному пособию О. Ф. Никитина, для малых ковшовых турбин рекомендуется принимать КПД в диапазоне 0,7–0,75 [5, с. 300–320]. Принимая для расчёта КПД ковшового колеса 0,71, магнитной муфты 0,97 и генератора 0,94, общий электрический КПД установки может достигать 0,65. Интегрирование мощности по реальному суточному графику водоотведения дало суточную выработку 168 кВт·ч, что соответствует 5000 кВт·ч в месяц. При тарифе для промышленных потребителей Беларуси на 2026 год (0,24 руб./кВт·ч без НДС) экономия составляет 1200 руб./мес. или 14400 руб./год, что в переводе в российские рубли составит 32105 рублей в месяц, либо 385263 рублей в год.

Капитальные затраты на изготовление одного комплекта (ковшовое колесо, система магнитной левитации, герметичная муфта, генератор и контроллер) по предварительным оценкам составят 15000–20000 руб. без учёта НДС. Эксплуатационные расходы включают периодическую очистку ковшей (около 200 руб./год) и замену подшипников раз в три года (около 100 руб./год). Примем итоговую сумму 300 руб./год и рассчитаем срок окупаемости при экономии 14400 руб./год:

$$T_{ок} = \frac{20000}{14400 - 300} \approx 1{,}5 \text{ года}. \qquad (4)$$

Хотя срок окупаемости достаточно низок, существуют технологические риски. Например, коррозионная агрессивность. Сточные воды Беларуси имеют pH=6,5–8,5 и содержат сульфиды, хлориды. Ковши рекомендуется изготавливать из полированной стали 12Х18Н10Т с полировкой, ось — из оксида алюминия, а применяемые магниты, устойчивые к окислению, сохраняют свои свойства до 300 °C. Также в отличие от проточных турбин, ковшовое колесо не имеет узких каналов. Крупные предметы при попадании на ковши под действием центробежных сил отбрасываются в водобойный колодец, не вызывая заклинивания. Кратковременное попадание посторонних предметов может привести к снижению КПД на 10–15% с последующим самовосстановлением после их удаления потоком. Климат Республики Беларусь характеризуется умеренно континентальными условиями с продолжительной зимой. Средняя температура января варьируется от -4 °C на юго-западе и до -8 °C на северо-востоке, а абсолютные минимумы могут достигать -30 °C. Эти особенности требуется учитывать при проектировании любого оборудования, размещаемого на открытом воздухе или в неотапливаемом помещении, поскольку перепадные колодцы не имеют систем обогрева. Температура воздуха внутри них в зимний период чуть выше уличной за счёт тепла сточных вод (обычно +5-10 °C). Однако брызги воды, образующиеся при падении струи на ковшовое колесо, могут намерзать на лопатки, особенно в ночные часы, когда расход воды минимален, а мороз максимален. Это приводит к дисбалансу ротора, снижению КПД, а в дальнейшем и останове турбины.

Для решения проблемы обледенения возможно изготовить ковши из материала с низкой теплопроводностью и антиобледенительным покрытием (полиуретан с гидрофобными добавками). Ещё одним вариантом может быть включение в конструкцию электрического подогрева корпуса магнитов или ковшового колеса. Оценочная мощность подогрева составит 50–100 Вт, что незначительно снижает полезную выработку электроэнергии (на 0,5–1%). Питание подогревателя возможно от самого генератора турбины и не требует внешнего источника. Также уместным будет применение автоматики в виде установки датчика температуры и вибрации, который при нарастании льда подаст сигнал на кратковременное увеличение нагрузки генератора (режим «растопки»). При этом колесо начинает вращаться быстрее, центробежная сила сбрасывает лёд. Такой вариант применяют на турбинах, работающих на открытом воздухе.

Подведя итог, можно сказать, что даже один типовой колодец может обеспечить 40–60 тыс. кВт·ч в год. В масштабах страны 200–300 установок дадут выработку, сравнимую с небольшой солнечной электростанцией, но без зависимости от погоды и с более предсказуемым суточным графиком. Реальные значения КПД, надёжность магнитной муфты в агрессивной среде, поведение ковшового колеса при засорении и работа в зимних условиях могут быть установлены только экспериментально. Конструкция байпасной микротурбины с ковшовым колесом и магнитной передачей вращения позволяет обойти ограничения, делающие невозможным применение традиционных гидроагрегатов в сточной среде. Именно поэтому установка на стенке колодца, вне потока, и передача момента через герметичную магнитную муфту — перспективное на сегодняшний день решение.

Список литературы

1. Закон Республики Беларусь от 08.01.2015 № 239-З «Об энергосбережении» (в ред. Закона от 31.12.2025 № 128-З) // Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь, 09.01.2026, 2/3056.
2. Штеренлихт Д. В. Гидравлика: учебник для вузов / Д. В. Штеренлихт. 4-е изд., перераб. и доп. Москва: КолосС, 2008. 656 с.
3. Яковлев С. В. Водоотведение и очистка сточных вод: учебник для вузов / С. В. Яковлев, Ю. М. Ласков. Москва: Стройиздат, 1987. 336 с.
4. СН 4.01.02–2019 «Канализация. Наружные сети и сооружения». 01.01.2020. Минск: Минстройархитектуры, 2019. 81 с.
5. Никитин О. Ф. Гидравлика и гидропневмопривод: учебное пособие для вузов / О. Ф. Никитин. 2-е изд., испр. и доп. Москва: Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2012. 432 с.

References

1. Law of the Republic of Belarus (2015) On Energy Saving, No. 239-Z of 8 January 2015 (as amended by Law No. 128-Z of 31 December 2025). National Legal Internet Portal of the Republic of Belarus, 9 January 2026, 2/3056.
2. Shterenlikht D. V. (2008) Hydraulics: A Textbook for Universities. 4th ed., revised and enlarged. Moscow: KolosS. (In Russian).
3. Yakovlev S. V. and Laskov Yu. M. (1987) Wastewater Disposal and Treatment: A Textbook for Universities. Moscow: Stroyizdat. (In Russian).
4. SN 4.01.02–2019 (2019) Sewerage. External Networks and Structures. Introduced 1 January 2020. Minsk: Ministry of Architecture and Construction of the Republic of Belarus. (In Russian).
5. Nikitin O. F. (2012) Hydraulics and Hydropneumatic Drive: A Textbook for Universities. 2nd ed., corrected and enlarged. Moscow: Bauman Moscow State Technical University Publishing House. (In Russian).

Информация об авторах

Фомина Виктория Александровна, *студентка Энергетического факультета, Белорусский национальный технический университет; 220013, Республика Беларусь, г. Минск, пр. Независимости, 65/2; SPIN-код: 3349–5503; Author ID (РИНЦ): 1349016; ORCID: 0009-0006-1753-5134; e-mail: fominaa.victoriaa@gmail.com.*

Куделко Владислав Витальевич, *студент Энергетического факультета, Белорусский национальный технический университет; 220013, Республика Беларусь, г. Минск, пр. Независимости, 65/2; SPIN-код: 6446–3448; Author ID (РИНЦ): 1348727; ORCID: 0009-0001-1342-3948; e-mail: vkudelko0@gmail.com.*

Пантелей Наталья Всеволодовна, *старший преподаватель кафедры тепловых электрических станций, Энергетический факультет, Белорусский национальный технический университет; 220013, Республика Беларусь, г. Минск, пр. Независимости, 65/2; SPIN-код: 1302–1575; Author ID (РИНЦ): 972801; ORCID: 0009-0004-8706-8741; e-mail: nvpaneley8@gmail.com.*

Information about the authors

Fomina Victoria Aleksandrovna, *student of the Faculty of Power Engineering, Belarusian National Technical University; 65/2 Nezavisimosti Ave., Minsk, 220013, Republic of Belarus; SPIN-code: 3349–5503; Author ID (RSCI): 1349016; ORCID: 0009-0006-1753-5134; e-mail: fominaa.victoriaa@gmail.com.*

Kudelko Vladislav Vitalyevich, *student of the Faculty of Power Engineering, Belarusian National Technical University; 65/2 Nezavisimosti Ave., Minsk, 220013, Republic of Belarus; SPIN-code: 6446–3448; Author ID (RSCI): 1348727; ORCID: 0009-0001-1342-3948; e-mail: vkudelko0@gmail.com.*

Panteley Natalya Vsevolodovna, *Senior Lecturer of the Department of Thermal Power Plants, Faculty of Power Engineering, Belarusian National Technical University; 65/2 Nezavisimosti Ave., Minsk, 220013, Republic of Belarus; SPIN-code: 1302–1575; Author ID (RSCI): 972801; ORCID: 0009-0004-8706-8741; e-mail: nvpaneley8@gmail.com.*