

## СТРОИТЕЛЬСТВО

УДК 628.12, 504.064

## МЕТОДИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ДЛЯ ОЦЕНКИ ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ ОТ ВНЕДРЕНИЯ ЧАСТОТНО-РЕГУЛИРУЕМОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА НА НАСОСНЫХ СТАНЦИЯХ СИСТЕМ ВОДОСНАБЖЕНИЯ И КАНАЛИЗАЦИИ

И. В. Войтов<sup>1</sup>, В. Л. Еловик<sup>2</sup><sup>1</sup> Д. т. н., профессор, ректор Белорусского государственного технологического университета, г. Минск, Беларусь, e-mail: [voitov@belstu.by](mailto:voitov@belstu.by)<sup>2</sup> Аспирант кафедры промышленной экологии Белорусского государственного технологического университета, г. Минск, Беларусь, e-mail: [valery.yalovik@outlook.com](mailto:valery.yalovik@outlook.com)

## Реферат

Представлена методика определения показателей воздействия на окружающую среду от работы центробежных насосов систем подачи и распределения воды (СПРВ) и систем перекачки сточных вод (СПСВ). Приведены основные зависимости, позволяющие рассчитать затраты условного топлива на процесс перекачки воды и сточных вод и уровень выброса парниковых газов в CO<sub>2</sub>-эквиваленте. Так же приведены зависимости определения уровня утечек за счет превышения расчетного напора в системе распределения воды. Даны рекомендации для практического применения методики при внедрении энергосберегающих и экологических мероприятий на насосных станциях СПРВ и СПСВ.

**Ключевые слова:** энергоэффективность, условное топливо, парниковые газы, система подачи и распределения воды, система перекачки сточных вод, насосный агрегат, экологичная эксплуатация, нерасчетные потери воды.

## METHODOLOGICAL BASES FOR ASSESSING THE ENVIRONMENTAL IMPACT FROM THE INTRODUCTION OF A FREQUENCY-CONTROLLED ELECTRIC DRIVE AT PUMPING STATIONS OF WATER SUPPLY AND SEWERAGE SYSTEMS

I. V. Voitov, V. L. Yalovik

## Abstract

A methodology for determining the environmental impact indicators from the operation of centrifugal pumps of water supply and distribution systems (WSDS) and wastewater pumping systems (WPS) is presented. The main dependences are given that allow calculating the cost of standard fuel for the process of pumping water and wastewater and the level of greenhouse gas emissions in CO<sub>2</sub> equivalent. The dependences of determining the level of leaks due to the excess of the calculated pressure in the water distribution system are also given. Recommendations are given for the practical application of the methodology in the implementation of energy-saving and environmental measures at the pumping stations of the WSDS and WPS.

**Keywords:** energy efficiency, standard fuel, greenhouse gases, water supply and distribution system, wastewater pumping system, pumping unit, environmentally friendly operation, off-design water losses.

## Введение

Обоснованное внедрение частотно-регулируемого электропривода (ЧРЭП) на насосных станциях СПРВ и СПСВ позволяет значительно снизить энергозатраты на транспортирование воды потребителю. Согласно положениям действующей нормативной литературы как на территории Республики Беларусь, так и за рубежом [5, 10] основным фактором воздействия на экологию от энергетического оборудования является уровень энергопотребления. Для удобства сравнения данный показатель рекомендуется определять относительно единицы выпускаемой продукции. Для насосного оборудования это величина удельного энергопотребления [3]. Данный показатель позволяет оценить и сравнить энергопотребление насосной станции в целом при варианном проектировании или при выборе конкурентноспособных комплектов насосного оборудования для реконструкции объекта и т. д. Оценить уровень использования потенциала энергоэффективности каждого конкретного насоса в составе насосной станции при помощи удельного энергопотребления весьма затруднительно.

### Определения индекса экологичной эксплуатации насосного оборудования в рамках разработанной методики расчета режимов работы

Для решения задачи энергетической и экологической эффективности работы насосного оборудования больше подошел бы показатель, характеризующий отклонение фактического энергопотребления в каждом конкретном режиме работы от эталонного режима с максимально возможной для данного насоса энергоэффективностью. Эталонным режимом вполне справедливо можно назначить режим работы насоса, в котором будет обеспечиваться максимальный

КПД [2]. Тогда в качестве требуемого показателя может быть выбран индекс экологичной эксплуатации насосного оборудования  $EFI$  (Eco-Friendly Index) [6]:

$$EFI_i = t_i \cdot \left( \frac{N_{уд}^i - N_{уд}^{опт}}{N_{уд}^{опт}} \right), \quad (1)$$

где  $t_i$  – продолжительность работы насосного оборудования в  $i$ -м режиме,

$N_{уд}$  и  $N_{уд}^{опт}$  – удельная потребляемая мощность насосом в  $i$ -м и оптимальном режиме соответственно:

$$N_{уд}^i = \frac{N_i}{Q_i}, \quad (2)$$

$$N_{уд}^{опт} = \frac{N_{опт}}{Q_{опт}}. \quad (3)$$

В данной работе расчет индекса  $EFI$  и его интерпретация несколько отличаются от предложенного Н. В. Фисенко [6,7] тем, что вместо индекса  $EFI$  предлагается определять и анализировать средневзвешенное отклонение потребляемой насосом энергии  $\Delta E_i$  для каждого режима каждого насоса, входящего в состав насосной станции в диапазоне водопотребления от  $Q_{min}$  до  $Q_{max}$

$$\Delta E_i = \left( \frac{N_{уд}^i - N_{уд}^{опт}}{N_{уд}^{опт}} \right). \quad (4)$$

Средневзвешенное отклонение потребляемой насосом энергии  $\Delta E$  характеризует экологический потенциал (в соответствии с рекомендациями [5,10]) по экономии энергоресурсов, снижения валового

потребления условного топлива и, соответственно, снижения выбросов в атмосферу парниковых газов относительно оптимального режима. Практически реализовать в полном объеме данный потенциал невозможно, так как невозможно обеспечить в каждом режиме работу насоса с максимальным КПД. Но задачей оптимального выбора комплекта насосного оборудования и выбора оптимального алгоритма его работы должно быть направлены на минимизацию  $\sum \Delta E$  как в целом по станции, так и  $\Delta E$  отдельного для каждого насоса.

Поскольку значение индекса  $\Delta E$  в оптимальном режиме принимает нулевое значение, в соответствии с положениями, изложенными в [3], необходимо подбирать насосное оборудование таким образом, чтобы наиболее продолжительное время насос работал с индексом  $\Delta E$ , равным либо близким к нулю.

#### Определение неучтенных потерь воды в СПРВ. Оценка снижения утечек при внедрении РЭП

Помимо очевидного влияния на окружающую среду за счет потребления энергоресурсов, можно выделить ряд косвенных факторов, сопутствующих внедрению ЧРЭП, которые также влияют на уровень антропогенной нагрузки, на окружающую среду и имеют значительный экологический эффект. Как уже рассматривалось выше, работа центробежных насосов с ЧРЭП позволяет обеспечить в системе распределения воды именно то давление, которое требуется в данный момент времени для обеспечения бесперебойного водоснабжения. В то же время традиционные методы регулирования, ввиду особенности работы центробежных насосов (см. главу 1), создают в водопроводной сети некоторое избыточное давление, которое может превышать требуемое в несколько раз. Согласно основным закономерностям истечения жидкости через отверстие, снижение давления в системе в 2 раза позволяет снизить потери воды на утечки примерно на 30 %. Такое сокращение позволяет не только снизить прямые затраты на транспортирование воды потребителю. Снижение объема утечек позволяет нивелировать последствия от искусственного повышения уровня грунтовых вод в районе разгерметизации напорного водопровода, снизить уровень заболачивания территорий, подмыва оснований зданий и сооружений, загрязнения водоносных горизонтов. За счет более низкого давления в системе снижается вероятность возникновения аварийных порывов трубопроводов.

В процессе эксплуатации водопроводной и канализационной сети неизбежно возникают аварийные ситуации, связанные с разгерметизацией напорных трубопроводов, запорно-регулирующей арматуры, технологических емкостей и т. п. в силу естественного износа, коррозионного разрушения или внешнего воздействия (на пример повреждения при проведении ремонтных работ).

Объем потерь питьевой воды в результате разгерметизации напорных трубопроводов, запорно-регулирующей арматуры и технологического оборудования по разным оценкам может составлять от 20 до 30 % от общего водопотребления [4]. При этом объем утечек и неучтенных потерь воды  $q_{ут}$  напрямую зависит от давления  $H$  в системе трубопроводов. Для расчета можно использовать формулу Торричелли [1, с. 25–26]:

$$q_{ут} = \mu \cdot \omega \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot H}, \quad (5)$$

где  $\mu$  – коэффициент расхода (приблизительно  $\mu = 0,6–0,62$ ),

$\omega$  – площадь живого сечения отверстия, через которое происходит утечка,

$g$  – ускорение свободного падения.

Поскольку применение ЧРЭП на насосных агрегатах СПРВ позволяет стабилизировать давление в системе на минимально требуемом уровне, обеспечивающем бесперебойное водоснабжение любого потребителя, то наряду с этим снижается и объем утечек и неучтенных потерь воды по сравнению с альтернативными способами регулирования. Для наглядности сравним два случая работы насосной станции, оборудованной ЧРЭП:

- 1) стабилизация давления осуществляется по датчику на напорном коллекторе насосной станции;
- 2) стабилизация давления осуществляется по датчику, расположенному в диктующей точке СПРВ.

В первом случае на станции поддерживается постоянное давление  $H_p$ , равное расчетному при максимальном водопотреблении. Давление в любой точке системы трубопроводов  $H_{ту}^1$  будет равняться давлению, развиваемому насосом  $H_p$  при водопотреблении  $Q$  [3], за вычетом разницы геодезических отметок (высот) установки оси насоса  $Z_{нас}$  и оси трубопровода в точке утечки  $Z_{ту}$ , и величины гидравлических потерь напора  $\Delta h_{ту}$  от насосной станции до точки утечки при водопотреблении  $Q$ :

$$H_{ту}^1 = H_p - (Z_{ту} - Z_{нас}) - \Delta h_{ту}. \quad (6)$$

Объем утечек в рассматриваемой точке в таком случае определяется согласно выражению (4.4):

$$q_{ту}^1 = \mu \cdot \omega \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot H_{ту}^1}. \quad (7)$$

Во втором случае, при подаче воды в СПРВ, при стабилизации давления в диктующей точке, станция будет поддерживать давление  $H_{тр}$ , требуемое для обеспечения текущего уровня водопотребления:

$$H_{ту}^2 = H_{тр} - (Z_{ту} - Z_{нас}) - \Delta h_{ту}. \quad (8)$$

Тогда объем утечек при использовании РЭП может быть определен как

$$q_{ту}^2 = \mu \cdot \omega \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot H_{ту}^2}. \quad (9)$$

Объем снижения утечек  $\Delta q_{ту}$  за счет стабилизации давления на минимально-требуемом уровне в водопроводной сети при помощи ЧРЭП можно определить как разницу:

$$\Delta q_{ту} = q_{ту}^1 - q_{ту}^2. \quad (10)$$

При этом дополнительный объем сэкономленной мощности можно определить согласно выражению (11) как

$$\Delta N_{утечки} = \frac{\rho \cdot g \cdot \Delta q_{ту} \cdot H_{нас}}{\eta}. \quad (11)$$

Объем неучтенных потерь воды из водоразборной арматуры при наличии избыточного давления оценивается аналогично утечкам при порыве трубопровода.

Снижение объема утечек, особенно скрытых и не фиксируемых визуально, оказывает положительное влияние не только на технико-экономические показатели СПРВ, но и непосредственным образом на снижение антропогенной нагрузки на окружающую среду за счет:

- снижения объема забора воды из природных источников;
- снижения уровня грунтовых вод и как следствие снижения негативного эффекта от подтопления и заболачивания территорий, размыва ландшафта и т. д.

Рассмотренный выше расчет может быть использован при оценке экологических рисков и экологического урона при эксплуатации СПРВ и СПСВ.

#### Оценка экологического эффекта при внедрении РЭП на насосных станциях СПРВ и СПСВ

В большинстве случаев основной целью внедрения ЧРЭП на насосных станциях СПРВ и СПСВ является повышение энергоэффективности процесса транспортирования потребителю воды и перекачки сточных вод. За счет этого оптимизируются не только экономические показатели, но и экологические за счет снижения удельного потребления условного топлива на выработку электроэнергии и как следствие снижение выброса в атмосферу парниковых газов.

По данным Национального статистического комитета Республики Беларусь и ГПО «Белэнерго», удельный расход условного топлива  $q_{тут}$  на отпуск электроэнергии по энергосистеме в целом составил 240,7 г/кВт·ч в 2019 г. и 238,5 г/кВт·ч в 2020 г. Таким образом, используя величину прогнозируемой экономии электроэнергии  $\Delta W_T$  после внедрения ЧРЭП [3], можно определить уровень снижения потребления условного топлива:

$$\Delta G_{mym} = \Delta W_m \cdot q_{mym} \quad (12)$$

Удельное значение выбросов парниковых газов в CO<sub>2</sub>-эквиваленте на генерацию 1 кВт·ч электроэнергии  $q_{CO_2}$  для электростанций, работающих на углеводородном топливе, составляет 491 г CO<sub>2</sub>-экв/кВт·ч, для атомных электростанций – 14,9 г CO<sub>2</sub>-экв/кВт·ч, для гидроэлектростанций – 6,6 г CO<sub>2</sub>-экв/кВт·ч, для ветроэлектростанций – 16,4 г CO<sub>2</sub>-экв/кВт·ч, для солнечных фотоэлектрических станций – 49,2 г CO<sub>2</sub>-экв/кВт·ч [8]. Используя структуру распределения генерируемой электроэнергии по типам электростанций [9, с. 61], можно получить средневзвешенное значение удельного выброса парниковых газов без учета атомной энергетики – 483,7 г CO<sub>2</sub>-экв/кВт·ч и с учетом перспективной доли атомной энергетики (до 30 %) – 340,6 г CO<sub>2</sub>-экв/кВт·ч. Снижение уровня выбросов парниковых газов в т CO<sub>2</sub>-экв за счет снижения энергопотребления насосной станции после внедрения РЭП можно определить из выражения:

$$\Delta G_{CO_2} = \Delta W_m \cdot \frac{q_{CO_2}}{10^6} \quad (13)$$

### Выводы

1. Разработанная методика расчета режимов работы позволяет оценить уровень экологичности эксплуатации насосного оборудования как по отдельности, так и в объеме насосной станции в целом. Индекс EFl, определенный для каждого конкретного режима работы насосной станции, характеризует теоретический потенциал по снижению энергозатрат используемым оборудованием. Наличие большого потенциала по экономии электроэнергии должно быть поводом для начала разработки мероприятий по оптимизации режимов работы насосного оборудования вплоть до его замены как на действующих объектах, так и при новом проектировании.
2. Внедрение ЧРЭП на насосных станциях СПРВ населенных пунктов и промышленных предприятий позволяет снизить уровень утечек и неучтенных нецелевых расходов воды. Это положительным образом влияет не только на снижение энергопотребления на транспортировку воды потребителю, но и снизит уровень нерационального потребления ресурса, снизит вероятность обводнения и заболачивания территорий. Предложенный метод расчета объема утечек возможно учитывать при оценке прогнозируемого или фактического экологического ущерба. Оценивать уровень нецелевых расходов воды в процессе водопользования.
3. Разработанная методика позволяет оценить прогнозируемый уровень снижения потребления уловного топлива и уровень снижения выбросов парниковых газов в результате планируемых мероприятий по внедрению ЧРЭП или оптимизации режимов работы насосного оборудования. Полученные результаты могут быть использованы для экологического обоснования проектных решений по модернизации, реконструкции и строительству новых насосных станций.

### Список цитированных источников

1. Агеева, В. В. Гидравлика. Лекции для студентов заочной формы обучения направления подготовки 270100 – «Строительство»: учебное пособие / В. В. Агеева. – Н. Новгород: Нижегород. гос. архит.-строит. ун-т, 2011. – Часть 2. Гидродинамика. – 81 с.
2. Еловик, В. Л. Критерии стабильной и эффективной работы насосного оборудования с частотно-регулируемым приводом / И. В. Войтов, В. Л. Еловик // Труды БГТУ. Серия 2. Химические технологии, биотехнологии, геоэкология. – 2021. – № 1 (241). – С. 197–204.
3. Еловик, В. Л. Методика расчета и анализа режимов работы насосных агрегатов, оборудованных регулируемым электроприводом / В. Л. Еловик // Труды БГТУ. Серия 2. Химические технологии, биотехнологии, геоэкология. – 2019. – № 2 (223). – С. 204–213.
4. Лезнов, Б. С. Энергосбережение и регулируемый привод в насосных установках / Б. С. Лезнов. – М.: ИК «Ягорба» - «Биоинформсервис», 1998. – 180 с.
5. Межгосударственный стандарт. Энергетическая эффективность. Оценка энергоэффективности насосных систем: ГОСТ 33969-2016 (ISO/ASME 14414:2015). – М.: Стандартинформ, 2017. – 17 с.

6. Фисенко, В. Н. Индексы энергетической эффективности группы погружных центробежных насосов, работающих с переменным профилем нагрузки в водозаборных скважинах / В. Н. Фисенко // Вода Magazine. – 2017. – № 9. – С. 24–30.
7. Фисенко, В. Н. Энергетическая эффективность насосов в системах водоснабжения и водоотведения / В. Н. Фисенко // Водоснабжение и санитарная техника. – 2018. – № 6. – С. 52–63.
8. Черняховская, Ю. В. Выбросы парниковых газов в электроэнергетике и их снижение от внедрения российских проектов атомных электростанций / Ю. В. Черняховская // Вестник МЭИ. – 2017. – № 3. – С. 46–52.
9. Энергетический баланс Республики Беларусь. Статистический сборник. – Мн.: Национальный статистический комитет, 2021. – 148 с.
10. Pump selection considerations: Energy tips - Pumping systems: tip sheet / U.S. Department of Energy. – 2005. – № 2.

### References

1. Ageeva, V. V. Gidravlika. Lekcii dlya studentov zaocnoj formy obucheniya napravleniya podgotovki 270100 – «Stroitel'stvo»: uchebnoe posobie / V. V. Ageeva. – N. Novgorod: Nizhegorod. gos. arhitek.-stroit. un-t, 2011. –Chast' 2. Gidrodinamika. – 81 s.
2. Elovik, V. L. Kriterii stabil'noj i effektivnoj raboty nasosnogo oborudovaniya s chastotno-reguliruемым приводом / I. V. Vojtov, V. L. Elovik // Trudy BGTU. Seriya 2. Himicheskie tekhnologii, biotekhnologii, geoeologiya. – 2021. – № 1 (241). – S. 197–204.
3. Elovik, V. L. Metodika rascheta i analiza rezhimov raboty nasosnyh agregatov, oborudovannyh reguliruемым электроприводом / V. L. Elovik // Trudy BGTU. Seriya 2 Himicheskie tekhnologii, biotekhnologii, geoeologiya. – 2019. – № 2 (223). – S. 204–213.
4. Leznov, B. S. Energoberezenie i reguliruемый привод v nasosnyh ustanovkah / B. S. Leznov. – M.: IK «YAgorba» - «Bioinformservis», 1998. – 180 s.
5. Mezghosudarstvennyj standart. Energeticheskaya effektivnost'. Ocenka energoeffektivnosti nasosnyh sistem: GOST 33969-2016 (ISO/ASME 14414:2015). – M.: Standartinform, 2017. – 17 s.
6. Fisenko, V. N. Indeksy energeticheskoy effektivnosti gruppy pogruzhnyh centrobeznyh nasosov, robotayushchih s peremennym profilem nagruzki v vodozabornyh skvazhinah / V. N. Fisenko // Voda Magazine. – 2017. – № 9. – S. 24–30.
7. Fisenko, V. N. Energeticheskaya effektivnost' nasosov v sistemah vodosnabzheniya i vodootvedeniya / V. N. Fisenko // Vodospabzhenie i sanitamaya tekhnika. – 2018. – № 6. – S. 52–63.
8. Chernyahovskaya, Yu. V. Vybrosty parnikovyh gazov v elektroenergetike i ih snizhenie ot vnedreniya rossijskih proektov atomnyh elektrostantsij / Yu. V. Chernyahovskaya // Vestnik MEI. – 2017. – № 3. – S. 46–52.
9. Energeticheskij balans Respubliki Belarus'. Statisticheskij sbornik. – Mn.: Nacional'nyj statisticheskij komitet, 2021. – 148 s.
10. Pump selection considerations: Energy tips - Pumping systems: tip sheet / U.S. Department of Energy. – 2005. – № 2.

Материал поступил в редакцию 20.05.2022