

БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

Объект авторского права

УДК 628.12:504.064.2

ЕЛОВИК

Валерий Леонидович

**ОСНОВЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ РЕЖИМОВ РАБОТЫ
ЦЕНТРОБЕЖНЫХ НАСОСОВ С ЧАСТОТНЫМИ
ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯМИ, РАБОТАЮЩИХ
В СОСТАВЕ НАСОСНЫХ СТАНЦИЙ СИСТЕМ
ВОДОПРОВОДНО-КАНАЛИЗАЦИОННОГО ХОЗЯЙСТВА**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

по специальности

05.23.04 – водоснабжение, канализация, строительные системы охраны вод-
ных ресурсов

Минск 2023

Научная работа выполнена в **УО «Белорусский государственный технологический университет»**

Научный руководитель: **Войтов Игорь Витальевич**, доктор технических наук, профессор, ректор УО «Белорусский государственный технологический университет», г. Минск

Официальные оппоненты: **Ивашечкин Владимир Васильевич**, доктор технических наук, профессор кафедры «Гидротехническое и энергетическое строительство, водный транспорт и гидравлика» Белорусского национального технического университета, г. Минск;
Штепа Владимир Николаевич, доктор технических наук, доцент, проректор по научной работе УО «Полесский государственный университет», г. Пинск

Оппонирующая организация: **УО «Брестский государственный технический университет», г. Брест**

Защита состоится 05.10.2023 г. в 15:00 на заседании совета по защите диссертаций Д 02.05.10 при Белорусском национальном техническом университете по адресу: 220013, г. Минск, проспект Независимости, 65, корп. 1, ауд. 202; телефон ученого секретаря: +375 17 263 00 49, e-mail: tgv_fes@bntu.by
С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Белорусского национального технического университета (г. Минск, ул. Я. Коласа, 16).
Автореферат разослан: 01.09.2023.

Ученый секретарь совета
по защите диссертаций
доктор технических наук, профессор



П. И. Дячек

ВВЕДЕНИЕ

Внедрение и использование энергосберегающих технологий в производственных процессах неразрывно связано с экономическими и экологическими факторами. Так, в структуре себестоимости услуг водоснабжения и водоотведения до 50–60% приходится на долю стоимости электроэнергии, затраченной на транспортирование питьевых и сточных вод. Это при среднем уровне энергоемкости подачи питьевой воды потребителю по Республике Беларусь в $1,2 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^3$ эквивалентно удельным выбросам в окружающую среду в размере 408 г CO_2 -экв на 1 м^3 поданной воды. Одним из основных направлений рационального использования энергетических ресурсов в водопроводно-канализационном хозяйстве (ВКХ) является применение регулируемых насосов (РН), оборудованных электроприводом с переменной частотой вращения на базе преобразователя частоты тока (ПЧТ).

Накопленный за последние 20–25 лет эксплуатации ПЧТ опыт показал, что, несмотря на высокий энергосберегающий потенциал, не всегда внедрение данного привода на насосных станциях ВКХ дает ожидаемые экономические результаты. Такая ситуация вызвана тем, что:

1) существующие на данный момент методики расчета и анализа режимов работы насосного оборудования не позволяют учесть в расчетах все особенности работы РН, а именно: изменение подачи нерегулируемых насосов (НН) относительно РН, работающих в параллельных режимах, изменение КПД насоса при изменении частоты вращения рабочего колеса и т. д.;

2) существующие методики не позволяют произвести детальный энергетический анализ расчетных или эксплуатационных режимов работы насосного оборудования при любом заданном значении водопотребления или притока сточных вод;

3) в существующих методиках используется ряд допущений и поправочных эмпирических коэффициентов, упрощающих расчет, но снижающих точность расчетов. Погрешность определения энергопотребления по известным методикам может составлять около 10–15%.

В связи с этим существует потребность в новых методах расчета, моделирования и анализа режимов работы РН с частотными преобразователями, их энергопотребления, надежности и экологической безопасности, учитывающих расчетные и эксплуатационные условия во всем диапазоне возможных подач. Для этого необходима разработка основ моделирования, расчета и анализа режимов работы насосных станций, оборудованных РН.

Автор выражает особую признательность и благодарность доктору технических наук, профессору Юрию Петровичу Седлухо за помощь в подготовке диссертационной работы.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с крупными научными программами и темами. Работа соответствует основным положениям Указа Президента Республики Беларусь от 7 мая 2020 г. № 156 «О приоритетных направлениях научной, научно-технической и инновационной деятельности на 2021–2025 годы», Директивы № 3 Президента Республики Беларусь от 14 июня 2007 г. «Экономия и бережливость – главные факторы экономической безопасности государства» и Концепции энергетической безопасности Республики Беларусь, утвержденной постановлением Совета Министров Республики Беларусь № 1084 от 23.12.2015, приоритетным направлениям республиканских программ «Энергосбережение» и «Комфортное жилье и благоприятная среда» (подпрограмма «Чистая вода»). Научные исследования по теме диссертации выполнялись в рамках темы № ГБ 07–10 «Разработка методики определения и повышения эффективности работы центробежных насосов с применением регулируемого привода», Минск, 2007 г., ГР № 2007909.

Цель и задачи исследования: разработка методики моделирования режимов работы центробежных насосов с частотными преобразователями, входящих в состав насосных станций водопроводно-канализационного хозяйства населенных мест, промышленных и сельскохозяйственных предприятий.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи:

– проанализировать существующие методы технологического, энергетического расчета и моделирования режимов работы центробежных насосов насосных станций ВКХ населенных мест, промышленных и сельскохозяйственных предприятий;

– разработать методику определения допустимого диапазона рабочих режимов центробежных насосов с частотными преобразователями с учетом эксплуатационных условий рассматриваемой системы;

– разработать методику моделирования режимов работы центробежных насосов с частотными преобразователями и расчета потребляемой ими энергии за расчетный период;

– разработать методику сравнительной экологической оценки воздействия на окружающую среду работы центробежных насосов с частотными преобразователями в результате внедрения энергосберегающих мероприятий;

– апробировать разработанные методики и методы расчета на реальных объектах.

Объект исследования – насосные станции водопроводно-канализационного хозяйства, оборудованные одним или несколькими центробежными насосами с частотными преобразователями.

Предмет исследования – режимы работы центробежных насосов с частотными преобразователями, функционирующих в составе насосной станции водопроводно-канализационного хозяйства.

Научная новизна и значимость проведенных исследований:

– разработана методика определения границ допустимого диапазона рабочих режимов центробежного насоса с частотными преобразователями с учетом эксплуатационных условий рассматриваемой системы;

– разработана методика моделирования и анализа режимов работы регулируемых центробежных насосов с частотными преобразователями во всем диапазоне эксплуатационных подач при любом количестве параллельно работающих агрегатов;

– разработана методика расчета потребляемой энергии центробежным насосом с частотными преобразователями за расчетный период с непосредственным учетом эксплуатационных условий;

– разработана методика сравнительной оценки воздействия на окружающую среду работы насосов с частотными преобразователями в результате внедрения энергосберегающих мероприятий.

Положения, выносимые на защиту.

1. Методика определения допустимого диапазона рабочих режимов центробежных насосов с частотными преобразователями с учетом эксплуатационных условий рассматриваемой системы, позволяющая на начальных этапах проектирования исключить варианты подбора оборудования за пределами допустимых эксплуатационных режимов;

2. Методика моделирования режимов работы центробежных насосов с частотными преобразователями, позволяющая определить значения основных характеристик и их взаимосвязь в отдельности для каждого насосного агрегата, входящего в состав насосной станции, во всем диапазоне эксплуатационных подач с учетом условий работы насосной системы;

3. Методика расчета потребляемой энергии центробежными насосами с частотными преобразователями за расчетный период, позволяющая учитывать расчетные и эксплуатационные условия, а также характеристики каждого насоса рассматриваемой насосной системы в виде взаимосвязанных переменных.

4. Методика сравнительной экологической оценки воздействия на окружающую среду работы центробежных насосов с частотными преобразователями, позволяющая определить расчетное изменение воздействия на окружающую среду насосного оборудования при внедрении энергосберегающих мероприятий.

Личный вклад соискателя ученой степени в результаты диссертации. Соискателем самостоятельно подготовлены план, программа и задачи исследования под общим руководством научного руководителя.

Соискателем самостоятельно произведена обработка и интерпретация полученных в ходе исследований данных, составляющих основу диссертации, проведен их анализ, выполнены расчеты, обобщен и изложен материал диссертации, а также разработаны рекомендации для проектирования и внедрения результатов исследований в процессе инженеринговых и проектных работ на объектах систем подачи и распределения воды и перекачки сточных вод.

Соискателем самостоятельно написан текст диссертации и автореферата.

Под редакцией научного руководителя соискателем на основе результатов диссертационных исследований подготовлены материалы для опубликования в научных рецензируемых изданиях.

Соискателем совместно с научным руководителем доложены и обсуждены результаты диссертационных исследований на научных конференциях и форумах и научно-технических семинарах.

Апробация диссертации и информация об использовании результатов: III Международная конференция «СУ АРНАСЫ–2007» «Водопользование: действительность, проблемы и перспективы» (Астана, 2007), I форум Союзного государства вузов инженерно-технологического профиля (Минск, 2012), Международная конференция «Современные тенденции в развитии водоснабжения и водоотведения» (Минск, 2019), 85-я научно-техническая конференция профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников и аспирантов БГТУ (Минск, 2021), II международный научно-практический семинар «Европейские инновационные технологии в строительстве и инженерии окружающей среды» (Тбилиси, 2021).

Результаты диссертационного исследования – «Методика расчета и анализа режимов работы насосных агрегатов, оборудованных регулируемым приводом» внедрены в производственный процесс ООО «ЦВИ», г. Краснодар, Российская Федерация, ООО «Эководстрой», г. Смоленск, Российская Федерация, УП «Полимерконструкция», г. Витебск, Республика Беларусь, ООО «ЗападВодСтрой», г. Витебск, Республика Беларусь.

Опубликование результатов. Основные результаты диссертации опубликованы в 23 научных работах, в том числе 1 монографии (6,4 авторского листа), 6 статьях в рецензируемых изданиях, включенных в Перечень ВАК Республики Беларусь (всего 3,5 авторского листа), 16 статьях и тезисах докладов конференции в рецензируемых изданиях, не включенных в Перечень ВАК Беларуси (всего 4,5 авторского листа).

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, общей характеристики работы, 5 глав, заключения, библиографического списка и приложений. Полный объем диссертации – 123 страницы, включая 8 страниц с приложениями. Работа содержит 115 страниц машинописного текста, 28 рисунков на 28 страницах, библиографический список из 123 наименований на 9 страницах, в их числе 23 авторские работы на 4 страницах.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

В **первой главе** рассмотрены основные типы насосных станций в составе ВКХ: насосные станции водозаборов подземных вод; насосные станции, работающие на свободный излив; насосные станции, подающие воду в напорную водопроводную сеть. Проанализированы основные особенности режимов работы по каждому типу станций и выделены их особенности, которые необходимо учитывать в расчетах. На основании вышеизложенного установлено, что исходя из неопределенности и разнообразности возможных режимов работы, наиболее сложными для анализа являются насосные станции, подающие воду в распределительную водопроводную сеть. Остальные типы станций можно считать частным случаем данного типа.

Рассмотрены исторические этапы развития способов регулирования работы центробежных насосов: дросселирование, перепуск, изменение вращения рабочего колеса. Показано, что применение привода с переменной частотой вращения на базе ПЧТ является наиболее перспективным с точки зрения энергосбережения и гибкости технологических режимов способом управления режимами работы центробежных насосов. Из-за высокой стоимости реализации преобразователя частоты тока на насосных станциях (НС) ВКХ требуется технико-экономическое обоснование его внедрения.

На основе анализа существующих методик расчета режимов работы центробежных насосов и их энергопотребления сделаны следующие выводы:

- существующие методы расчета базируются на оценке уровня энергопотребления за расчетный период;
- расчет производится по укрупненным показателям без учета конкретных режимов работы отдельных единиц насосного оборудования;
- в расчетах используются поправочные и уточняющие коэффициенты, разработанные для узкого диапазона условий работы насосного оборудования;
- рядом методик не в полной мере или вообще не учитывается возможность работы насосного оборудования с переменной частотой вращения рабочего колеса.

Исходя из этих выводов обоснована необходимость в разработке методики расчета и моделирования режимов работы центробежных насосов с частотными преобразователями в составе систем ВКХ и расчета потребляемой рассматриваемыми насосами энергии за расчетный период.

Во **второй главе** приведены теоретические разработки методики определения границ допустимого диапазона рабочих режимов центробежного насоса с частотным преобразователем с учетом эксплуатационных условий рассматриваемой системы. В ходе разработки методики был предложен ряд понятий, а именно:

1. Предложено понятие режимной характеристики и разработан метод ее расчета. Режимная характеристика центробежного насоса, функционирующего в составе насосной станции, позволяет определять положение рабочей точки регулируемого насоса при любой частоте вращения рабочего колеса в зависимости от значения рабочего диапазона подач от Q_{\min} до Q_{\max} , требуемого напора и количества параллельно работающих насосных агрегатов.

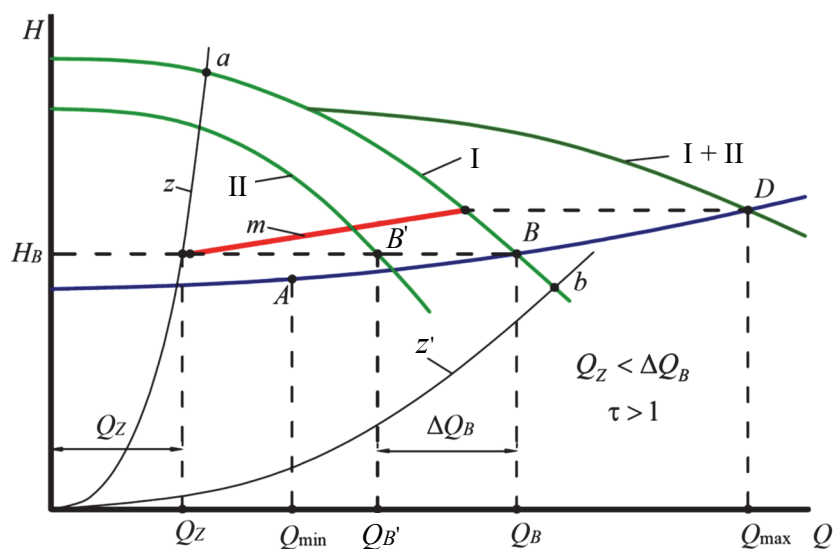
$$Q_{\text{пер}}^i = Q_{\text{тр}}(H_{\text{тр}}) - \sum_{i=0}^{i=m} Q_{\text{нрег}}^i(H_{\text{тр}}), \quad (1)$$

где $Q_{\text{тр}}(H_{\text{тр}})$ – характеристика системы водоводов, выраженная через $H_{\text{тр}}$; $Q_{\text{нрег}}^i(H_{\text{тр}})$ – характеристика i -го насоса, работающего параллельно с регулируемым, выраженная через $H_{\text{тр}}$; m – общее количество нерегулируемых насосов в составе насосной станции.

2. Предложено понятие степени разнотипности τ и разработана методика ее определения. Степень разнотипности центробежных насосов τ позволяет еще на стадии подбора параллельно работающих насосных агрегатов, один из которых оборудован электроприводом с переменной частотой вращения, определить, на сколько должны отличаться характеристики насосов для обеспечения работы регулируемого насоса в пределах рабочей зоны, установленной заводом-изготовителем.

$$\tau = \frac{Q_B - Q_B'}{Q_Z}, \quad (2)$$

где Q_B – номинальная подача регулируемого насоса, работающего на рассматриваемую систему распределения воды; Q_B' – подача нерегулируемого насоса при напоре H_B ; Q_Z – подача насоса на границе рабочей области при напоре H_B (рисунок 1).



I – частотно-регулируемый насос; II – нерегулируемый насос;
 m – режимная характеристика регулируемого насоса

Рисунок 1 – Степень разнотипности насосов

3. Определены условия подбора центробежных насосов, при которых обеспечивается наиболее продолжительная их работа в зоне с максимальным КПД.

$$Q_{opt} \rightarrow 0,9 \cdot Q_{cp}; \quad (3)$$

$$Q_{opt} \cdot \frac{n_{pm}}{n_H} \rightarrow 0,9 \cdot Q_{cp}, \quad (4)$$

где Q_{opt} – подача насоса в точке максимального КПД η_{max} ; Q_{cp} – подача насоса при среднем расчетном значении водопотребления; n_H – номинальная частота вращения рабочего колеса; n_{pm} – частота вращения рабочего колеса при подаче насоса, соответствующей наиболее вероятному значению водопотребления.

Использование условий (3) и (4) позволяет еще на стадии подбора насосного оборудования определять варианты с наибольшим потенциалом энергоэффективности.

4. Разработаны граничные условия возникновения неустановившихся режимов работы насосного оборудования при работе с переменной частотой вращения рабочего колеса. Использование данных условий позволяет при подборе насосного оборудования учитывать границы устойчивой работы регулируемого центробежного насоса с частотным преобразователем в составе рассматриваемой системы.

5. На основании результатов приведенных в главе 2 исследований сформулированы основные рекомендации для подбора насосного оборудования, работающего с переменной частотой вращения рабочего колеса, позволяющие обеспечить его работу в пределах допустимого диапазона рабочих режимов:

- должна быть обеспечена работа насосного оборудования в зоне максимального КПД наиболее продолжительное время;

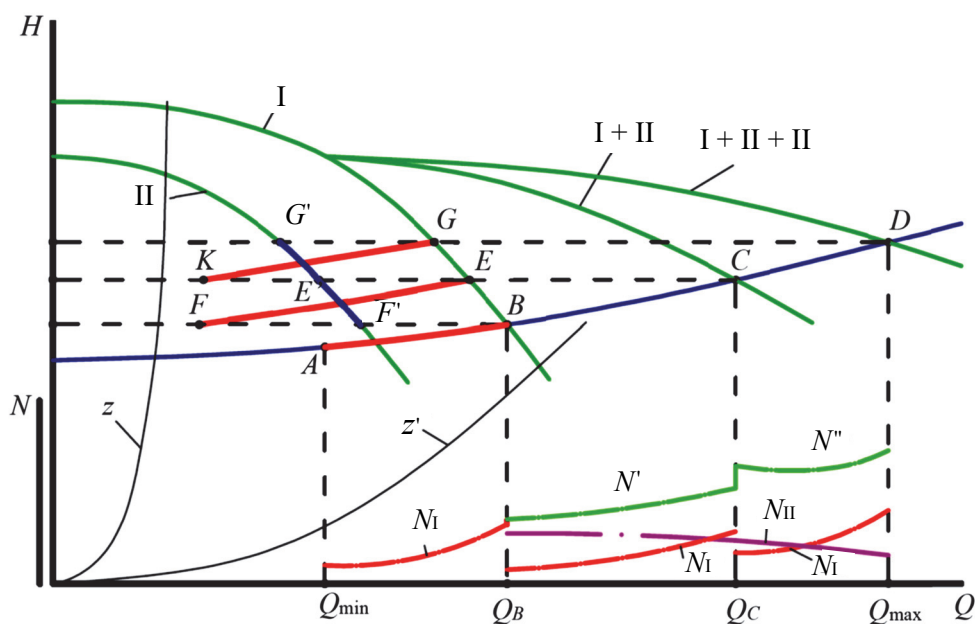
- в случае необходимости подбора нескольких насосов, работающих в параллельных режимах, важно соблюсти следующие требования:

- а) невозможна работа группы однотипных насосов, работающих в параллельных режимах в пределах допустимого диапазона рабочих режимов, если один из насосов оборудован электроприводом с переменной частотой вращения. В таком случае необходимо подбирать разнотипные насосы. Достаточная степень разнотипности для рассматриваемой насосной системы определяется исходя из выражения (2);

- б) при невозможности оборудовать насосную станцию разнотипными насосными агрегатами ПЧТ должны быть оснащены два однотипных насосных агрегата.

В третьей главе приводится методика расчета и моделирования режимов работы центробежных насосов с частотными преобразователями. Предложенная методика позволяет определять основные технологические характеристики насоса (подача, напор, скорость вращения рабочего колеса, КПД, потребляемая мощность) во всем рабочем диапазоне подач и при любом количестве параллельно работающих центробежных насосов – как регулируемых, так и нерегулируемых (рисунок 2).

Использование предложенных подходов в практике проектирования позволяет значительно расширить возможности анализа расчетных и эксплуатационных режимов работы центробежных насосов.



I – номинальная характеристика частотно-регулируемого насоса;
 II – характеристика нерегулируемого насоса;
 N_I и N_{II} – потребляемая мощность насосами I и II соответственно;
 N' и N'' – суммарная потребляемая мощность насосами
 на участках B–C и C–D соответственно

Рисунок 2 – Результат моделирования режимов работы разнотипных насосов

Для анализа эффективности работы насосной станции разработан метод прямого расчета объема потребляемой энергии насосной станцией за расчетный период. При этом расчет ведется на основании модели насосной станции, учитывающей все диапазоны расчетных или эксплуатационных режимов работы центробежных насосов. Это значительно повышает точность прогнозирования энергопотребления при внедрении тех или иных мероприятий, нацеленных на повышение эффективности работы насосного оборудования.

В работе показано, что расчет объема потребляемой энергии наиболее целесообразно производить на основании статистических данных о распределении значений водопотребления и, соответственно, расчетных подач НС за расчетный период. В случае отсутствия статистики по распределению водопотребления (например, при проектировании вновь возводимого объекта) показана возможность применения расчетных методов. Как пример – расчет по методу трехпараметрического гамма-распределения обеспеченности водопотребления, предложенному В. П. Старинским, или методу упорядоченной диаграммы водопотребления. Кривые обеспеченности $p = f(M)$ (по методу В. П. Старинского) с достаточной степенью точности возможно аппроксимировать полиномом пятой степени (достоверность аппроксимации $R^2 = 1,0000-0,9999$). Значение потребляемой мощности P имеет прямую взаимосвязь со значением подачи и, соответственно, значением водопотребления Q_i . Эта взаимосвязь определяется разработанной моделью режимов работы рассматриваемого насоса или группы насосов. На основании этого логично предположение, что обеспеченность

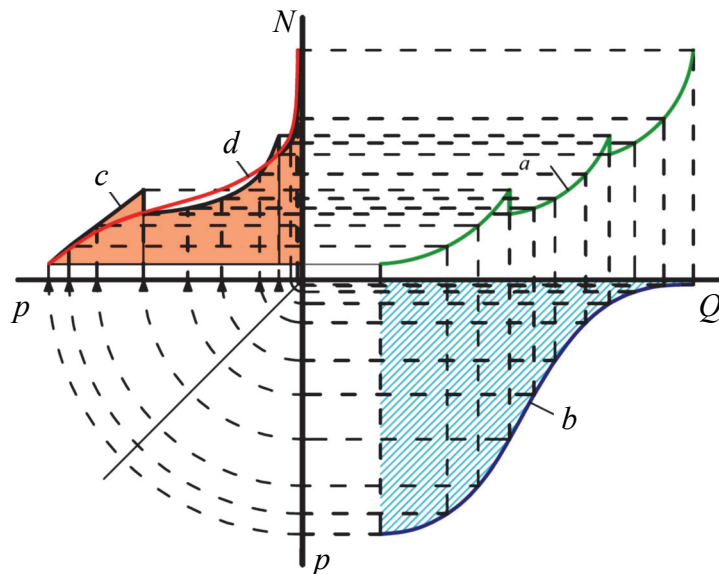
потребляемой мощности p будет равна обеспеченности водопотребления (см. рисунок 3):

$$p = a' + b' \cdot P + c' \cdot P^2 + d' \cdot P^3 + e' \cdot P^4 + f' \cdot P^5, \quad (5)$$

где a', b', c', d', e', f' – эмпирические коэффициенты обеспеченности энергопотребления.

Интегрируя зависимость (5) в пределах от P_{\min} до P_{\max} и умножая полученный результат на продолжительность расчетного периода T , получаем в итоге объем затрат энергии на транспортирование воды за расчетный период W_T :

$$W_T = T \cdot \int_{P_{\min}}^{P_{\max}} t(P) dN. \quad (6)$$



- a – зависимость потребляемой мощности от водопотребления;
- b – обеспеченность водопотребления;
- c – фактическая обеспеченность энергопотребления по участкам;
- d – аппроксимирующая кривая обеспеченности энергопотребления

Рисунок 3 – Определение обеспеченности энергопотребления

В четвертой главе приводятся этапы разработки методики оценки уровня экологичности эксплуатации насосного оборудования как по отдельности, так и в объеме насосной станции в целом. Экологичность эксплуатации насосного оборудования предлагается оценивать при помощи средневзвешенного отклонения потребляемой насосом энергии ΔE_i , которое рассчитывается для каждого режима каждого насоса, входящего в состав насосной станции, в диапазоне водопотребления от Q_{\min} до Q_{\max} .

$$\Delta E_i = \frac{P_{\text{уд}}^i - P_{\text{уд}}^{\text{opt}}}{P_{\text{уд}}^{\text{opt}}}, \quad (7)$$

где $P_{уд}^i$ и $P_{уд}^{opt}$ – удельная потребляемая мощность насосом в i -том и оптимальном режиме соответственно.

Использование средневзвешенного отклонения потребляемой насосом энергии в каждом конкретном режиме, в отличие от ранее используемого индекса *EFI* (*Eco-Friendly Index*), предложенного Н. В. Фисенко и оценивающего насосную станцию в целом, позволяет выявлять неэффективные режимы эксплуатации. Средневзвешенное отклонение потребляемой насосом энергии ΔE характеризует экологический потенциал (в соответствии с рекомендациями ГОСТ 33969–2016) по экономии энергоресурсов, снижению валового потребления условного топлива и, соответственно, снижению выбросов в атмосферу парниковых газов относительно оптимального режима.

Также в четвертой главе рассмотрен метод оценки снижения неучтенных потерь воды за счет стабилизации давления на уровне требуемого в системе ее распределения. Предложенный метод расчета объема утечек предлагается использовать при оценке прогнозируемого или фактического экологического ущерба, уровня нецелевых расходов воды в процессе водопользования.

Предложены способы оценки изменения потребления условного топлива $\Delta G_{\text{тут}}$ и выброса парниковых газов в CO_2 -эквиваленте ΔG_{CO_2} в результате внедрения преобразователя частоты тока на насосных станциях ВКХ или изменения эксплуатационных режимов работы насосного оборудования. Полученные результаты могут быть использованы для экологического обоснования проектных решений по модернизации, реконструкции и строительству новых насосных станций.

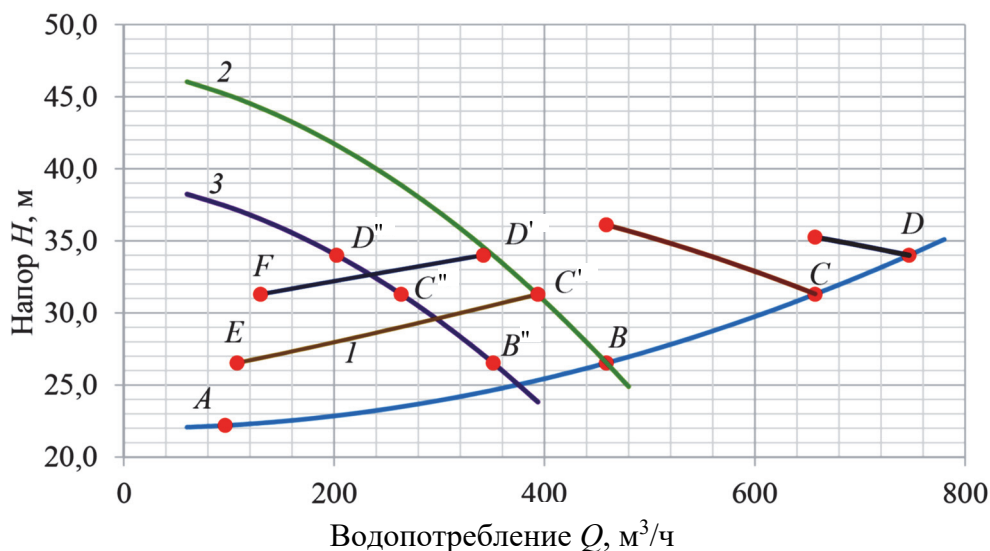
В пятой главе рассмотрен пример моделирования режимов работы реальной насосной станции со следующими исходными данными:

- населенный пункт с расчетным числом жителей (РЧЖ) – 34 897 человек;
- среднесуточное водопотребление – $Q_{\text{ср.сут}} = 7780 \text{ м}^3/\text{сут}$;
- максимальночасовое водопотребление – $Q_{\text{max}} = 747 \text{ м}^3/\text{ч}$;
- среднечасовое водопотребление – $Q_{\text{ср}} = 324,2 \text{ м}^3/\text{ч}$;
- минимальночасовое водопотребление – $Q_{\text{min}} = 96,3 \text{ м}^3/\text{ч}$;
- требуемый напор у насосной станции, необходимый для обеспечения максимального водопотребления, – $H_{\text{max}} = 0,34 \text{ МПа}$;
- требуемое давление поддерживается в диктующей точке системы распределения воды;
- расчетный период T – 1 год, или 8760 ч.

Подробно рассмотрены основные этапы расчета и анализа, а именно:

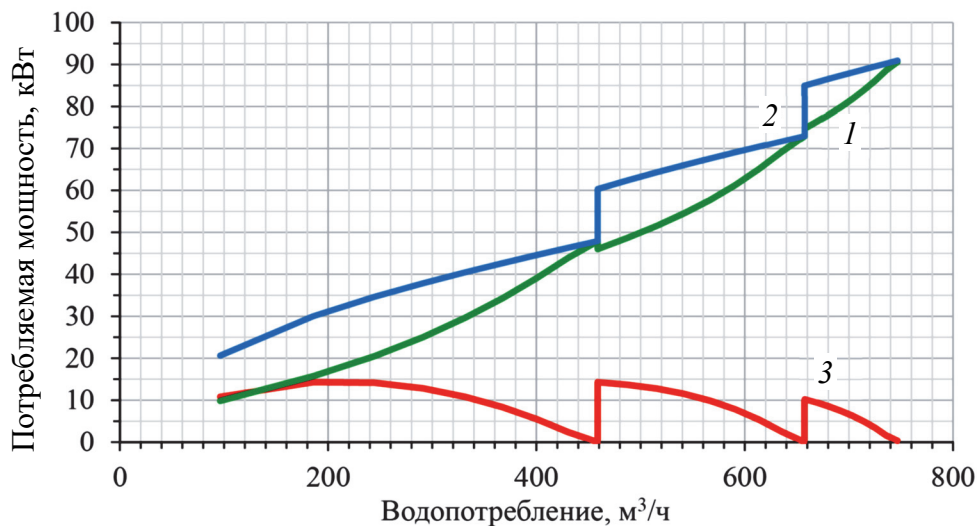
- подбор центробежных насосов с частотными преобразователями с учетом требований по обеспечению работы насосов в диапазоне высоких КПД в течение максимально продолжительного времени. При этом степень разнотипности выбираемых центробежных насосов должна гарантировать режимы работы в допустимых диапазонах;

– моделирование режимов работы центробежных насосов с частотными преобразователями и с нерегулируемым приводом во всем диапазоне расчетных подач от Q_{min} до Q_{max} (рисунки 4 и 5);



- 1 – характеристика Q – H системы распределения воды;
- 2 – характеристика Q – H регулируемого насоса Д125-400В;
- 3 – характеристика Q – H нерегулируемого насоса Д125-400В-а;
- A – минимальное расчетное водопотребление Q_{\min} ;
- B – рабочая точка работы одного регулируемого насоса Д125-400В при номинальной частоте вращения рабочего колеса;
- C – рабочая точка работы регулируемого насоса Д125-400В при номинальной частоте вращения рабочего колеса параллельно с одним нерегулируемым насосом Д125-400В-а;
- D – максимальное расчетное водопотребление Q_{\max}

Рисунок 4 – Режимные характеристики насосного оборудования



- 1 – график потребляемой мощности при регулировании;
- 2 – график потребляемой мощности при дросселировании;
- 3 – результирующая разница потребляемой мощности при дросселировании и регулировании

Рисунок 5 – Сравнение мгновенной потребляемой мощности насосной станцией при регулировании частоты вращения рабочего колеса и при дросселировании

– сравнительный анализ режимов работы насосной станции с использованием регулируемого насосного агрегата и с использованием дросселирования напорного трубопровода насосного агрегата;

– определение объемов потребляемой электроэнергии за расчетный период для насосных станций с использованием частотного регулирования и дросселирования. На конкретном примере показана разница в итоговом энергопотреблении для сравниваемых вариантов управления насосами: внедрение регулируемого привода на базе ПЧТ позволяет сэкономить 90 790,25 кВт·ч/год (расчетная экономия энергоресурсов 25%);

– сравнительный расчет экологических показателей для различных вариантов оснащения насосных станций. Обоснована возможность снижения степени антропогенной нагрузки на окружающую среду в результате внедрения энергоэффективных мероприятий вследствие уменьшения потребления условного топлива на 21,7 т у. т/год и снижения объемов выбросов парниковых газов в атмосферу в пересчете на CO₂-эквивалент на 30,8 т CO₂/год;

– расчет объемов потребляемой энергии по альтернативным методикам.

В результате сравнения результатов расчета показано, что применение разработанной методики обеспечивает расхождение с фактическими данными службы эксплуатации рассматриваемого объекта в 1,0%. Результаты расчета по альтернативной методике Б. С. Лезнова обеспечили расхождение в 8,5–8,7% с фактическими данными службы эксплуатации (таблица 1).

Таблица 1 – Сравнение результатов расчета

Показатель	Ед. измер.	Результаты расчета		
		по разработанной методике	по Б. С. Лезнову	
			по ф-ле (1.29)	по ф-ле (1.30)
Расчетное энергопотребление до внедрения регулируемого привода	кВт·ч/год	354 404	358 388	–
Расчетное энергопотребление после внедрения регулируемого привода		263 614	275 534	–
Расчетная экономия энергоресурсов		90 790	82 856	82 683
Фактическое энергопотребление до внедрения регулируемого привода *		357 155		
Фактическое энергопотребление после внедрения регулируемого привода *		267 287		
Фактическая экономия энергоресурсов		89 868		
Расхождение расчетных значений с фактическими	%	1,0	8,7	8,5

*Фактические данные получены в службе эксплуатации рассматриваемого объекта.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации

Проведенные исследования показали, что существующие методы и методики расчета и анализа режимов работы насосных станций ВКХ, оборудованных центробежными насосами, не решают ряд актуальных вопросов. Во-первых, существующие методики ориентированы на расчет и оценку насосной станции в целом без детального рассмотрения режимов работы отдельных насосов, входящих в ее состав. Как следствие, укрупненный подход к расчету не позволяет анализировать изменения в насосной системе в результате корректировки режимов работы отдельных насосов (например, порядка их включения или выключения). Во-вторых, не все методики позволяют учитывать в расчетах режимы работы центробежного насоса с частотным преобразователем рабочего колеса. В-третьих, упрощения и допущения, принимаемые в расчетах (например, КПД насоса принимается постоянным во всем диапазоне подач, количество насосов, работающих в параллельном режиме, учитывается поправочным коэффициентом и т. д.), влияют на точность полученных результатов. Решение выявленных проблемных вопросов возможно путем разработки методики моделирования режимов работы центробежных насосов с частотными преобразователями.

В результате разработки методики моделирования решен ряд поставленных задач и получены следующие результаты.

1. Для предварительного анализа на этапе подбора насосного оборудования разработана методика определения границ допустимого диапазона рабочих режимов центробежного насоса с частотным преобразователем с учетом эксплуатационных условий рассматриваемой системы. Для этого введено понятие режимной характеристики регулируемых насосов, позволяющей определять и анализировать режимы их работы как при одиночной работе, так и работе в параллельном режиме с одним или несколькими нерегулируемыми насосами. Совмещение режимной характеристики и допустимого диапазона рабочих режимов позволяет исключить из дальнейшего расчета неподходящие варианты. Введено понятие степени разнотипности, позволяющей разнотипные центробежные насосы, один из которых оборудован электроприводом с переменной частотой вращения, и работающие в параллельных режимах, проверять на совместную работу в пределах допустимого диапазона рабочих режимов [1, 4, 11, 22, 23].

2. Разработанная методика моделирования режимов работы центробежных насосов с частотными преобразователями позволяет определять значения основных характеристик в отдельности для каждого насосного агрегата, входящего в состав насосной станции, и работающих в параллельных режимах во всем диапазоне эксплуатационных подач. В расчетах учитываются расчетные или эксплуатационные режимы работы насосного оборудования при изменении частоты вращения рабочего колеса, изменение КПД насоса в зависимости от частоты вращения рабочего колеса, порядок включения и выключения насосов при параллельных режимах работы. Возможность определения основных

характеристик в отдельности для каждого из насосных агрегатов, работающих в параллельных режимах во всем диапазоне эксплуатационных подач, позволяет не только рассчитывать эффективность работы насосной станции в целом, но и производить анализ режимов работы каждого насосного агрегата в отдельности [1, 3, 7, 8, 9, 10, 12, 13, 14, 16, 19, 21].

3. Для общей оценки эффективности работы насосного оборудования, в частности и насосной станции в целом, разработана методика расчета потребляемой энергии центробежным насосом с частотным преобразователем за расчетный период. Получаемый результат – объем потребляемой энергии за расчетный период, учитывающий расчетные или эксплуатационные условия и индивидуальные характеристики каждого насоса, входящего в состав рассматриваемой насосной системы, в виде взаимосвязанных переменных. Это позволяет оценивать и анализировать изменение как внешних условий (требуемый напор в напорном коллекторе насосной станции, значение водопотребления), так и внутренних (порядок включения насосов в работу и их выключение, изменение КПД насоса в зависимости от подачи и частоты вращения рабочего колеса) [1, 2, 17, 19, 20, 21].

4. Для количественной оценки изменения воздействия на окружающую среду эксплуатируемых центробежных насосов после внедрения энергосберегающих мероприятий разработана методика сравнительной экологической оценки воздействия на окружающую среду работы насосов с частотными преобразователями. Основой анализа экологической эффективности работы оборудования принято средневзвешенное отклонение потребляемой насосом энергии ΔE , характеризующее экологический потенциал, удельное потребление условного топлива и выбросы парниковых газов в CO_2 -эквиваленте. Использование разработанного метода расчета позволяет производить оценку экологического эффекта от внедрения тех или иных мероприятий на насосных станциях систем ВКХ (замена насосного оборудования, внедрение новых элементов АСУ, изменение режимов работы и т. д.) [1, 5].

5. Приведен расчет насосной станции при различных вариантах аппаратного оснащения (с РН и без него). Разобран процесс расчета и анализа режимов работы насосного оборудования на примере одного из объектов внедрения. На конкретном примере показана разница в итоговом энергопотреблении для сравниваемых вариантов управления насосами – внедрение электропривода с переменной частотой вращения на базе ПЧТ позволяет сэкономить 90 790,2 кВт·ч/год, или 26%. Расчет годового объема потребляемой энергии произведен и по альтернативной методике, разработанной Б. С. Лезновым. В результате сравнения результатов расчета показано, что применение разработанной методики обеспечивает расхождение с фактическими данными службы эксплуатации рассматриваемого объекта в 1,0%. Результаты расчета по альтернативной методике Б. С. Лезнова показали расхождение в 8,5–8,7% с фактическими данными службы эксплуатации [1, 2, 17].

В результате сравнения полученных результатов можно сделать следующие выводы:

– на практике подтверждено, что использование электропривода с переменной частотой вращения на базе преобразователя частоты тока на насосных станциях ВКХ позволяет снизить затраты энергии в отдельных случаях до 30%;

– применение разработанной методики расчета режимов работы центробежных насосов и их энергопотребления позволяет повысить точность расчетов и увеличить количество анализируемых параметров.

Рекомендации по практическому использованию результатов

Разработанные методические основы расчета и анализа режимов работы частотно-регулируемого насосного оборудования могут применяться:

– при анализе эффективности работы существующих систем подачи воды с целью совершенствования технологического режима подачи воды и экономии электроэнергии;

– при разработке рекомендаций по реконструкции или переоборудованию объектов насосного хозяйства;

– при строительстве новых и реконструкции существующих элементов ВКХ на стадиях обоснования инвестиций и подбора оборудования для определения наиболее энергоэффективного варианта проектирования;

– при разработке автоматизированных систем управления насосных станций систем водоснабжения и водоотведения промышленных предприятий и населенных пунктов.

Результаты исследований апробированы в ряде производственных, проектных и инжиниринговых предприятий, занимающихся проектированием и анализом работы объектов водоснабжения и водоотведения населенных пунктов, промышленных и сельскохозяйственных предприятий: ООО «ЦВИ», г. Краснодар, Российская Федерация, ООО «Эководстрой», г. Смоленск, Российская Федерация, УП «Полимерконструкция», г. Витебск, Республика Беларусь, ООО «ЗападВодСтрой», г. Витебск, Республика Беларусь.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Монографии

1. Еловик В.Л., И.В. Войтов, Ю.П. Седлухо. Расчет и анализ режимов работы центробежных насосов с частотно-регулируемым электроприводом. – Минск: БГТУ, 2022. – 110 с.

Статьи в рецензируемых изданиях, включенных в Перечень ВАК Республика Беларусь

2. Еловик В.Л. Методика расчета и анализа режимов работы насосных агрегатов, оборудованных регулируемым электроприводом // Труды БГТУ. Сер. 2, Химические технологии, биотехнологии, геоэкология. – 2019. – № 2 (223). – С. 204–213.

3. Еловик В.Л. Особенности режимов работы насосных станций водозаборных сооружений подземных вод, систем канализации и комбинированных систем водоснабжения // Труды БГТУ. Сер. 2, Химические технологии, биотехнологии, геоэкология. – 2020. – № 1 (229). – С. 242–248.

4. Войтов И.В., Еловик В.Л. Критерии стабильной и эффективной работы насосного оборудования с частотно-регулируемым приводом // Труды БГТУ. Сер. 2, Химические технологии, биотехнологии, геоэкология. – 2021. – № 1 (241). – С. 197–204.

5. Еловик В.Л., Войтов И.В. Методические основы для оценки воздействия на окружающую среду от внедрения частотно-регулируемого электропривода на насосных станциях систем водоснабжения и канализации // Вестник Брестского государственного технического университета. Технические науки (строительство, машиностроение, геоэкология); экономические науки. – 2022. – № 2 (128). – С. 3–5.

6. Еловик В.Л., Войтов И.В. Современные методы расчета и анализа режимов работы центробежных насосов с регулируемым приводом в составе систем водоснабжения и водоотведения // Вестник Полоцкого государственного университета. Сер. F, Строительство. Прикладные науки. – 2022. – № 8 (32). – С. 2–9.

7. Еловик В.Л., Войтов И.В. Расчет и анализ режимов работы и энергопотребления центробежных насосов с частотно-регулируемым электроприводом в системах водоснабжения // Вестник Полоцкого государственного университета. Сер. F, Строительство. Прикладные науки. – 2022. – № 8 (32). – С. 10–25.

Статьи в других изданиях

8. Еловик В.Л. Эффективность применения частотно-регулируемого электропривода на водопроводно-канализационных насосных станциях // Труды молодых специалистов Полоцкого государственного университета. Вып. 3. Прикладные науки. – Новополоцк: ПТУ, 2004. – С. 78–80.

9. Еловик В.Л. Определение нагрузки на привод со стороны регулируемого насоса // Труды молодых специалистов Полоцкого государственного университета. Вып. 7. Прикладные науки. – Новополоцк: ПТУ, 2004. – С. 75–77.

10. Еловик В.Л. Применение центробежных насосов с частотно-регулируемым электроприводом на канализационной насосной станции // Труды молодых специалистов Полоцкого государственного университета. Вып. 7. Прикладные науки. – Новополоцк: ПГУ, 2004. – С. 78–81.

11. Еловик В.Л., Седлухо Ю.П. Анализ режимов работы однотипных насосов, оборудованных регулируемым приводом // Вода и экология: проблемы и решения. – 2006. – № 2 (27). – С. 68–75.

12. Еловик В.Л., Седлухо Ю.П. Методика прямого расчета потребляемой энергии частотно-регулируемым насосом за расчетный период // Вода: химия и экология. – 2010. – № 7. – С. 46–50.

13. Седлухо Ю.П., Еловик В.Л. Оптимизация систем водоснабжения малых населенных пунктов при использовании децентрализованных подземных источников // Водоочистка. Водоподготовка. Водоснабжение. – 2016. – № 12. – С. 60–61.

Материалы конференций

14. Еловик В.Л., Седлухо С.П. Режимные наблюдения за работой водозабора «Окунево» г. Новополоцка // 7-я Республиканская научная конференция студентов и аспирантов Беларуси (НИРС – 2002): сб. ст. / Витеб. гос. техн. ун-т. – Витебск, 2002. – С. 178–181.

15. Еловик В.Л. Систематические наблюдения за работой водозаборных скважин. Принцип и методика // Материалы XXXI студенческой научной конференции Полоцкого государственного университета / редкол.: Ф.И. Пантелеенко (гл. ред.) [и др.]. – Полоцк, 2002. – С. 266–268.

16. Еловик В.Л., Седлухо Ю.П. Анализ работы разнотипных насосных агрегатов с применением регулируемого привода // Culegere de articole III Intenacionala conferinta tehnico-stiintifica “Probleme Actuale ale urbanismulu si amenajarii teritoriului” / com. org.: N. Grozavu, ... – Chisinau, 2006. Vol. 2. – P. 149–153.

17. Еловик В.Л. Методика определения эффективности применения регулируемых приводов насосных агрегатов // Наука – образованию, производству, экономике: материалы третьей междунар. науч.-техн. конф. «Наука – образованию, производству, экономике». – Минск: БНТУ, 2006. Т. 1. – С. 105–107.

18. Еловик В.Л., Седлухо Ю.П. Анализ и оптимизация работы комбинированных систем водоснабжения малых и средних населенных пунктов // Водопользование: действительность проблемы и перспективы: сб. ст. и докл. III Междунар. конф. «СУ АРНАСЫ–2007». – Астана, 2007. – С. 59–62.

19. Седлухо Ю.П., Еловик В.Л. Методика расчета энергии насосных агрегатов с частотно-регулируемым приводом // Чистая вода: возвращение к человеку: спец. вып. секции I Форума Союзного государства вузов инженер.-технол. профиля. – Минск: БНТУ, 2012. – С. 92–96.

20. Еловик В.Л. Методика расчета потребляемой энергии частотно-регулируемым насосом за расчетный период // Современные тенденции в развитии водоснабжения и водоотведения: материалы Междунар. конф., посвящ. 145-летию УП «Минскводоканал»: в 2 ч. – Минск: БГТУ, 2019. – Ч. 2. – С. 57–63.

21. Войтов И.В., Еловик В. Л. Методика расчета режимов работы насосных агрегатов, оборудованных частотно-регулируемым электроприводом // Европейские инновационные технологии в инженерии окружающей среды. – Тбилиси: Изд. дом «Технический университет», 2022. – С. 169–183. – (Экология окружающей среды: сер. моногр.; т. II).

Тезисы докладов

22. Еловик В.Л., Седлухо Ю.П. Анализ работы регулируемого насоса параллельно с нерегулируемым // Проблемы и перспективы развития водного хозяйства малых городов: тез. докл. междунар. науч.-практ. конф. «Проблемы и перспективы развития водного хозяйства малых городов» / под общ. ред. Ю.П. Седлухо. – Витебск, 2006. – С. 57–60.

23. Еловик В.Л., Седлухо Ю.П. Применение регулируемого привода на однотипных насосах. Проблемы и решения // Проблемы и перспективы развития водного хозяйства малых городов: тез. докл. междунар. науч.-практ. конф. «Проблемы и перспективы развития водного хозяйства малых городов» / под общ. ред. Ю.П. Седлухо. – Витебск, 2006. – С. 61–63.



РЭЗІЮМЭ

Яловік Валерый Леанідавіч

Асновы мадэлявання рэжымаў работы цэнтрабежных помпаў з частотнымі пераўтваральнікамі, якія працуюць у складзе помпавых станцый сістэм водаправодна-каналізацыйнага гаспадаркі

Ключавыя словы: энергаэфектыўнасць, частотна-рэгулюемы электрапрывад, водаправодна-каналізацыйная гаспадарка, помпавы агрэгат, помпавая станцыя, вугляродны след, уздзеянне на навакольнае асяроддзе, камп'ютарнае мадэляванне.

Мэта даследавання: распрацоўка метадыкі разліку і камп'ютарнага мадэлявання рэжымаў работы цэнтрабежных помпаў з частотна-рэгулюемым электрапрывадам у складзе сістэм падачы і размеркавання вады і сістэм перапампоўвання сцёкавых вод населеных месцаў, прамысловых і сельскагаспадарчых прадпрыемстваў у мэтах павышэння энергаэфектыўнасці і зніжэння ўздзеяння на навакольнае асяроддзе.

Метады даследавання: камп'ютарнае мадэляванне, апрацоўка статыстычных даных, параўнальная ацэнка.

Атрыманыя вынікі і іх навізна:

– прааналізаваны існуючыя метады тэхналагічнага, энергетычнага разліку і мадэлявання рэжымаў работы цэнтрабежных помпаў помпавых станцый сістэм водазабеспячэння і водаадвядзення населеных месцаў, прамысловых і сельскагаспадарчых прадпрыемстваў;

– распрацавана метадыка аптымальнага падбору цэнтрабежных помпаў, абсталяваных частотна-рэгулюемым электрапрывадам па крытэрыі найменшых эксплуатацыйных затрат;

– распрацавана метадыка тэхналагічнага разліку і камп'ютарнага мадэлявання рэжымаў работы цэнтрабежных помпаў водагаспадарчых сістэм, абсталяваных частотна-рэгулюемым электрапрывадам;

– распрацаваны метады разліку спажыванай энергіі цэнтрабежнай помпай за разліковы перыяд з непасрэдным улікам рэжымаў яго работы;

– распрацаваны метады параўнальнага аналізу рэжымаў работы цэнтрабежных помпаў з частотна-рэгулюемым электрапрывадам помпавых станцый сістэм водазабеспячэння і водаадвядзення па ўздзеянні на навакольнае асяроддзе;

– апрабаваны распрацаваныя метадыкі і метады разліку на рэальным аб'екце.

Рэкамендацыі па выкарыстанні. Распрацаваныя метадычныя асновы разліку і аналізу рэжымаў работы частотна-рэгулюемага помпавага абсталявання могуць прымяняцца:

– пры аналізе эфектыўнасці работы існуючых сістэм падачы вады з мэтай удасканалення тэхналагічнага рэжыму падачы вады і эканоміі электраэнергіі;

– пры распрацоўцы рэкамендацый па рэканструкцыі або пераабсталяванні аб'ектаў помпавай гаспадаркі сістэм падачы і размеркавання вады і адвядзення сцёкаў;

– пры будаўніцтве новых і рэканструкцыі існуючых сістэм падачы і размеркавання вады на стадыях абгрунтавання інвестыцый і падбору абсталявання для вызначэння аптымальнага варыянта праектавання.

Вынікі даследаванняў апрабаваны ў шэрагу праектных і інжынірынговых прадпрыемстваў, якія займаюцца праектаваннем і аналізам работы аб'ектаў водаабеспячэння і водаадвядзення населеных пунктаў, прамысловых і сельскагаспадарчых прадпрыемстваў: ТАА «ЦВІ», г. Краснадар, Расійская Федэрацыя, ТАА «Эководстрой», г. Смаленск, Расійская Федэрацыя, УП «Палімерканструкцыя», г. Віцебск, Рэспубліка Беларусь, ТАА «ЗападВодСтрой», г. Віцебск, Рэспубліка Беларусь.

Перспектыўным напрамкам развіцця вынікаў дысертацыйнага даследавання з'яўляецца распрацоўка метадыкі комплекснага разліку камбінаваных сістэм падачы і размеркавання вады.

Галіна ўжывання: помпавыя станцыі сістэм водаправодна-каналізацыйнай гаспадаркі населеных пунктаў, прамысловых і сельскагаспадарчых прадпрыемстваў.

РЕЗЮМЕ

Еловик Валерий Леонидович

Основы моделирования режимов работы центробежных насосов с частотными преобразователями, работающих в составе насосных станций систем водопроводно-канализационного хозяйства

Ключевые слова: энергоэффективность, частотно-регулируемый электропривод, водопроводно-канализационное хозяйство, насосный агрегат, насосная станция, углеродный след, воздействие на окружающую среду, компьютерное моделирование.

Цель исследования: разработка методики расчета и компьютерного моделирования режимов работы центробежных насосов с частотно-регулируемым электроприводом в составе систем подачи и распределения воды и систем перекачки сточных вод населенных мест, промышленных и сельскохозяйственных предприятий в целях повышения энергоэффективности и снижения воздействия на окружающую среду.

Методы исследования: компьютерное моделирование, обработка статистических данных, сравнительная оценка.

Полученные результаты и их новизна:

– проанализированы существующие методы технологического, энергетического расчетов и моделирования режимов работы центробежных насосов насосных станций систем водоснабжения и водоотведения населенных мест, промышленных и сельскохозяйственных предприятий;

– разработана методика оптимального подбора центробежных насосов, оборудованных частотно-регулируемым электроприводом по критерию наименьших эксплуатационных затрат;

– разработана методика технологического расчета и компьютерного моделирования режимов работы центробежных насосов водохозяйственных систем, оборудованных частотно-регулируемым электроприводом;

– разработан метод расчета потребляемой энергии центробежным насосом за расчетный период с непосредственным учетом режимов его работы;

– разработан метод сравнительной оценки режимов работы центробежных насосов с частотно-регулируемым электроприводом насосных станций систем водоснабжения и водоотведения по воздействию на окружающую среду;

– апробированы разработанные методики и методы расчета на реальном объекте.

Рекомендации по использованию. Разработанные методические основы расчета и анализа режимов работы частотно-регулируемого насосного оборудования могут применяться:

– при анализе эффективности работы существующих систем подачи воды с целью совершенствования технологического режима подачи воды и экономии электроэнергии;

– разработке рекомендаций по реконструкции или переоборудованию объектов насосного хозяйства систем подачи и распределения воды (СПРВ) и отведения стоков;

– строительстве новых и реконструкции существующих СПРВ на стадиях обоснования инвестиций и подбора оборудования для определения оптимального варианта проектирования.

Результаты исследований апробированы в ряде проектных и инжиниринговых предприятий, занимающихся проектированием и анализом работы объектов водоснабжения и водоотведения населенных пунктов, промышленных и сельскохозяйственных предприятий: ООО «ЦВИ», г. Краснодар, Российская Федерация, ООО «Эководстрой», г. Смоленск, Российская Федерация, УП «Полимерконструкция», г. Витебск, Республика Беларусь, ООО «ЗападВодСтрой», г. Витебск, Республика Беларусь.

Перспективным направлением развития результатов диссертационного исследования является разработка методики комплексного расчета комбинированных СПРВ.

Область применения: насосные станции систем ВКХ населенных пунктов, промышленных и сельскохозяйственных предприятий.

SUMMARY

Yalovik Valery Leonidovich

Fundamentals of modeling the operating modes of centrifugal pumps with frequency converters operating as part of pumping stations of water supply and sewerage systems

Keywords: energy efficiency, frequency-controlled electric drive, water supply and sewerage, pumping unit, pumping station, carbon footprint, environmental impact, computer simulation.

The object of the research: to develop a methodology for calculating and computer modeling the operating modes of centrifugal pumps with a frequency-controlled electric drive as part of water supply and distribution systems and wastewater pumping systems in populated areas, industrial and agricultural enterprises in order to increase energy efficiency and reduce environmental impact.

The methods of the research and the facilities: computer modeling, statistical data processing, comparative evaluation.

The results obtained and their novelty:

– the existing methods of technological, energy calculation and modeling of the operating modes of centrifugal pumps of pumping stations of water supply and sanitation systems of populated areas, industrial and agricultural enterprises were analyzed;

– developed a methodology for the optimal selection of centrifugal pumps equipped with a frequency-controlled electric drive according to the criterion of the lowest operating costs;

– a methodology for technological calculation and computer simulation of the operating modes of centrifugal pumps of water management systems equipped with a frequency-controlled electric drive has been developed;

– a method has been developed for calculating the energy consumed by a centrifugal pump for the billing period with direct consideration of its operating modes;

– a method has been developed for comparative assessment of the operating modes of centrifugal pumps with a frequency-controlled electric drive of pumping stations of water supply and sanitation systems concerning effect on the environment;

– the developed methods and calculation methods were tested on a real object.

Recommendations for use. The developed methodological bases for calculating and analyzing the operating modes of frequency-controlled pumping equipment can be used:

– when analyzing the efficiency of the existing water supply systems in order to improve the technological regime of water supply and save electricity;

– when developing recommendations for the reconstruction or re-equipment of the pumping facilities of the water supply systems and disposal of wastewater;

– during the construction of new and reconstruction of existing water supply systems at the stages of justifying investments and selecting equipment to determine the best design option.

The results of the research were tested in a number of design and engineering enterprises involved in the design and analysis of the operation of water supply and sanitation facilities for settlements, industrial and agricultural enterprises: LLC «CVI», Krasnodar, RF, LLC «Ecovodstroy», Smolensk, RF, UE Polymerconstruction Vitebsk, Republic of Belarus, LLC «ZapadVodStroy» Vitebsk, Republic of Belarus.

A promising direction for the development of the results of the dissertation research is the development of a methodology for complex calculation of combined water supply systems.

Area of application: pumping stations of water supply systems of settlements, industrial and agricultural enterprises.

Научное издание

Еловик Валерий Леонидович

**ОСНОВЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ РЕЖИМОВ РАБОТЫ
ЦЕНТРОБЕЖНЫХ НАСОСОВ С ЧАСТОТНЫМИ
ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯМИ, РАБОТАЮЩИХ
В СОСТАВЕ НАСОСНЫХ СТАНЦИЙ СИСТЕМ
ВОДОПРОВОДНО-КАНАЛИЗАЦИОННОГО ХОЗЯЙСТВА**

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук по специальности

05.23.04 – водоснабжение, канализация, строительные системы охраны
водных ресурсов

Ответственный за выпуск *В. Л. Еловик*

Подписано в печать 02.08.2023. Формат 60×84¹/₁₆.

Бумага офсетная. Гарнитура Таймс. Печать ризографическая.

Усл. печ. л. 1,6. Уч.-изд. л. 1,0.

Тираж 60 экз. Заказ .

Издатель и полиграфическое исполнение:

УО «Белорусский государственный технологический университет».

Свидетельство о государственной регистрации издателя,

изготовителя, распространителя печатных изданий

№ 1/227 от 20.03.2014.

Ул. Свердлова, 13а, 220006, г. Минск.