

Короткоручко Дмитрий Юрьевич

**ОБОСНОВАНИЕ СОВМЕСТНОГО ПРИМЕНЕНИЯ ПНЕВМАТИЧЕСКИХ
БАКОВ И НАСОСОВ С РЕГУЛИРУЕМЫМ ПРИВОДОМ В СИСТЕМАХ
ВОДОПОДАЧИ**

2.1.6 – Гидротехническое строительство,
гидравлика и инженерная гидрология

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Москва – 2025

Работа выполнена на кафедре сельскохозяйственного водоснабжения, водоотведения, насосов и насосных станций федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Российский государственный аграрный университет–МСХА имени К.А. Тимирязева»

Научный руководитель: **Али Мунзер Сулейман**, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой сельскохозяйственного водоснабжения, водоотведения, насосов и насосных станций ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет–МСХА имени К.А. Тимирязева»

Официальные оппоненты: **Тарасьянц Сергей Андреевич**, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры водоснабжения и использования водных ресурсов Новочеркасского инженерно-мелиоративного института имени А.К. Кортунова – филиал ФГБОУ ВО «Донской государственный аграрный университет»
Голубев Андрей Вячеславович, кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры гидравлики и гидротехнического строительства НИУ МГСУ

Ведущая организация: Всероссийский научно-исследовательский институт систем орошения и сельскохозяйственного водоснабжения «Радуга» (ФГБНУ ВНИИ «Радуга»)

Защита диссертации состоится «23» декабря 2025 г. в 10.00 часов на заседании диссертационного совета 35.2.030.07, созданного на базе ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет–МСХА имени К.А. Тимирязева», по адресу: 127434, г. Москва, ул. Прянишникова, д.19, учебный корпус №28, аудитория 201, тел.: 8 (499) 976-17-14.

Юридический адрес для отправки почтовой корреспонденции (отзывов): 127434, г. Москва, ул. Тимирязевская, д. 49.

С диссертацией можно ознакомиться в Центральной научной библиотеке имени Н.И. Железнова ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева» и на сайте Университета <http://www.timacad.ru>.

Автореферат разослан «___» _____ 20__ г.

Ученый секретарь
диссертационного совета 35.2.030.07
кандидат технических наук, доцент

Н.Б. Мартынова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Обеспечение бесперебойной централизованной подачи воды, надлежащего качества и в необходимом объеме, является одним из основных условий создания комфортной среды обитания в населенных пунктах и локальных объектах социальной инфраструктуры – санаториях, домах отдыха, спортивных базах.

Применяемые в настоящее время в системах водоподачи водонапорные башни обладают рядом недостатков, связанных, прежде всего, со сложностью и высокой стоимостью строительства и эксплуатации, особенно в зимних условиях, а также повышенной аварийностью. При этом существующие безбашенные системы водоподачи с использованием пневматических баков позволяют обеспечить рабочее давление в трубопроводах, уменьшить вероятность возникновения гидравлического удара и снизить стоимость строительства систем водоподачи. Однако, режим совместной работы пневматических баков и насосно-силового оборудования, в том числе и с частотно-регулируемым приводом, изучен недостаточно, а проблема оптимизации энергетических параметров работы систем водоподачи, включая совместную работу пневмобаков и частотных преобразователей, является актуальной.

Степень разработанности проблемы. Весомый вклад в научную разработку тематики в области исследования безбашенных систем водоподачи и насосов с частотно-регулируемым приводом (ЧРП) внесли российские ученые М.С. Али, М.Л. Барбул, С.Н. Карамбиров, Б.С. Лезнов, В.Н. Фисенко, И.В. Николенко, В.Г. Николаев, О.А. Штейнмиллер, а также зарубежные ученые V.K. Arun Shankar, P.D. Dai, J. Delgado, T. Luna, J. Ribau, D. Figueiredo, R. Alves, Tom Neuberger, Steven B. Weston, Z. Zuo, L. Tan, W. Shi, C. Chen, J. Ye, E.M Francis.

Проведенный аналитический обзор показал, что существующие методы регулирования работы учитывают применение пневматических баков и частотных преобразователей только по отдельности, причем исследования по эффективному использованию и расчетам пневмобаков практически отсутствуют, и не рассматривают потенциал их совместного применения для повышения энергоэффективности и снижения энергоемкости водоподачи. При этом степень разработанности проблемы, связанной с работы насосов с частотно-регулируемым приводом, очень высока.

Работа выполнена в соответствии с паспортом научной специальности 2.1.6 «Гидротехническое строительство, гидравлика и инженерная гидрология»: п. 6 Водозаборные сооружения и насосные станции различного назначения.

Рыбопропускные и рыбозащитные сооружения. Экологическая реабилитация водных объектов; п. 13 Равновесие, движение и взаимодействие жидкостей и газов, закономерности движения обычных, взвесенесущих, аэрированных и стратифицированных потоков; п. 14 Стационарные и нестационарные течения жидкости в трубах, естественных и искусственных руслах, гидротехнических сооружениях различного назначения. Взаимодействие потоков с поверхностями, телами и сооружениями. Гидравлические сопротивления.

Цель диссертационной работы: Исследования по оценке и оптимизации параметров совместной работы пневматических баков с регулируемыми насосами в системах водоподачи для обеспечения энергосбережения при требуемых гидравлических показателях.

В процессе выполнения работы решались следующие **задачи**:

- проведен анализ и оценка работы современных башенных и безбашенных, с пневмобаками, систем водоподачи и возможности эффективного управления для достижения энергосбережения;
- сделано теоретическое обоснование совместного применения пневмобаков и насосов с частотно-регулируемым приводом;
- выполнены лабораторные гидравлические исследования систем водоподачи с пневматическими баками и регулируемыми насосами по оценке энергоэффективности и защиты от гидравлического удара напорных водоводов водохозяйственных систем;
- проведена оптимизация компоновки и совместной работы водохозяйственного комплекса в составе пневматического бака с регулируемым насосом;
- проведена технико-экономическая оценка эффективности применения пневмобаков и частотных преобразователей для достижения наибольшего энергосбережения.

Научная новизна работы: Проведен анализ исследований технологий использования безбашенных систем водоподачи и оценка проблемы энергосбережения, что позволило предложить концепцию системы пневмобаков и насосов с частотно-регулируемым приводом, теоретически обосновать эффективность системы и получить математическую модель прогнозирования характеристик и их трансформации при изменении параметров работы насосов. Получены результаты лабораторных гидравлических исследований и компьютерного моделирования, которые позволили оптимизировать размеры пневмобака и параметры работы насосов при требуемых гидравлических показателях системы. Получены результаты оценки эффективности применения пневмобаков и частотных

преобразователей.

Теоретическая и практическая значимость работы заключается в разработке концепции обеспечения энергосбережения при применении системы пневмобаков и насосов с частотно-регулируемым приводом и, полученной по результатам экспериментов, возможности прогнозирования характеристик и их трансформации при изменении параметров работы насосов. Практическая значимость заключается в разработке системы водоподачи и получении эффекта энергосбережения.

Методология и методы исследований. При проведении исследований использовались методы теоретического анализа и лабораторного эксперимента. Теоретические исследования базировались на использовании классических законов движения и взаимодействия жидкостей и газов. Лабораторные гидравлические эксперименты выполнялись с применением современных методик и стандартного оборудования. Обработка результатов осуществлялась методами математической статистики с применением компьютерной программы Microsoft Excel.

Положения, выносимые на защиту:

- результаты аналитических исследований технологий использования безбашенных систем водоснабжения и оценка проблемы энергосбережения;
- теоретический расчет по определению гидравлических характеристик системы пневмобаков и насосов с частотно-регулируемым приводом;
- математическая модель анализа гидравлических показателей системы и их трансформации при изменении параметров работы насосов;
- результаты лабораторных исследований и компьютерного моделирования по оптимизации размеров пневмобака и параметров работы насосов;
- оценка эффективности применения пневмобаков и частотных преобразователей.

Степень достоверности и апробация результатов. Достоверность результатов исследований подтверждается высоким уровнем корреляции теоретических и экспериментальных данных исследований, применением современных сертифицированных измерительных приборов и стандартных методик. Основные результаты работы докладывались и обсуждались на Международной научной конференции молодых учёных и специалистов, посвящённой 150-летию со дня рождения А.Я. Миловича, Москва, 2024; Международной научной конференции «Актуальные вопросы гидрометеорологии и мониторинга окружающей среды в изменяющемся климате: адаптация, устойчивость и производственный процесс», г. Ереван,

Республика Армения, 2025; Молодежной научно-практической конференции «Актуальные вопросы экологии и безопасности», IX Всероссийском водном конгрессе, Москва, ЦВК «Экспоцентр», 2025; Международной научной конференции молодых учёных и специалистов, посвящённой 160-летию Тимирязевской академии, 2025. Результаты работы внедрены на предприятии АО «АТТРАКЦИОН-ЭКСПО».

Личный вклад автора заключается в анализе и обобщении исследований отечественных и зарубежных ученых и специалистов по проблеме, постановке задач и выборе методов исследований, в выполнении теоретических исследований, в проведении лабораторных гидравлических исследований, обработке и анализе результатов, формулировке заключения и написании текста диссертации.

Публикации. Основные положения диссертационной работы опубликованы в 7 печатных работах, в том числе 3 статьи в изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ. Общий объём опубликованных работ 3,59 п.л., из них 2,84 п.л. принадлежит автору.

Структура и объём диссертации. Диссертация включает введение, 4 главы, заключение, список литературы и приложения. Объём диссертационной работы 139 страниц, включая 26 таблиц, 36 рисунков, 3 приложения. Список литературы составляет 183 источника, в том числе 34 на иностранном языке.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

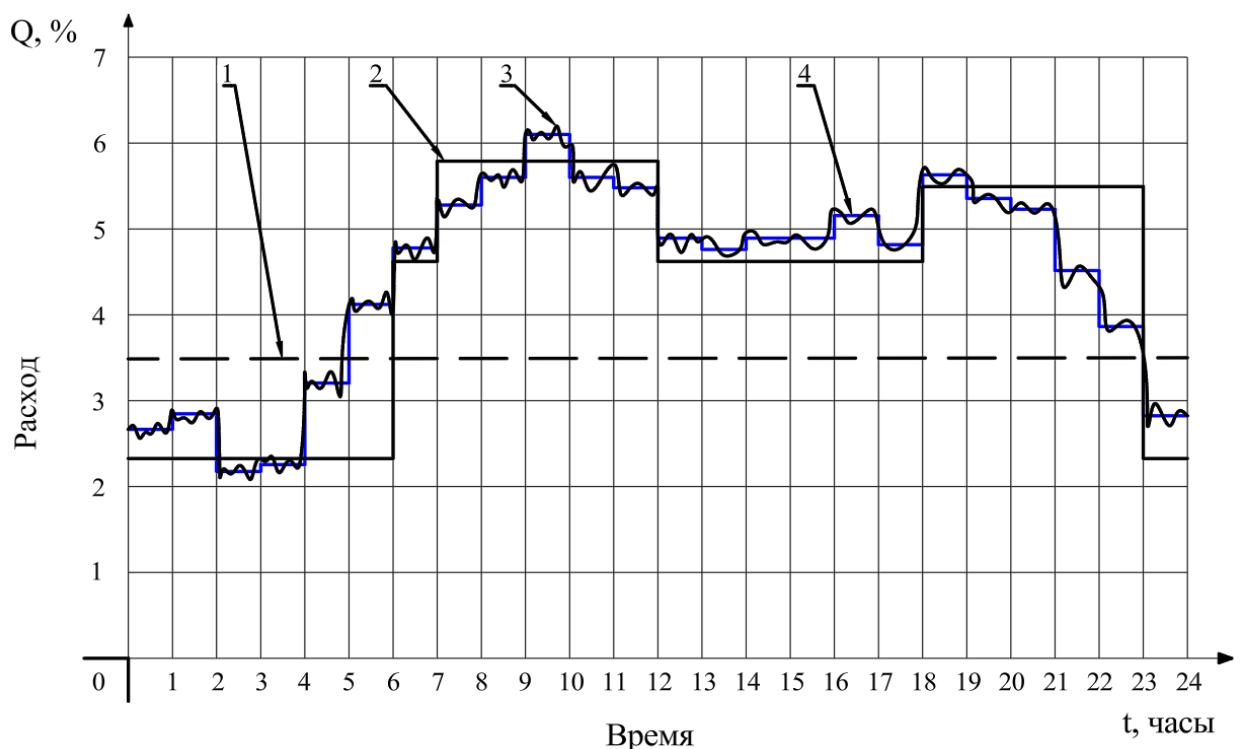
Во введении приведена общая характеристика работы включая: актуальность темы исследования, степень ее разработанности, определены цели и задачи работы, сформулированы научная новизна и положения, выносимые на защиту, а также теоретическая и практическая значимость, сведения об апробации результатов, публикациях и структуре диссертации.

В первой главе приведен обзор современного состояния башенных и безбашенных систем водоподачи, отмечено, что, несмотря на широкое распространение водонапорных башен, они имеют ряд недостатков, конструктивные особенности которых влияют на гидравлическую и энергетическую эффективности и, в конечном итоге, на эксплуатационные характеристики всей системы. Безбашенные системы, с использованием пневматического бака, позволяют повышать устойчивость работы системы при больших объемах, при этом разнообразие конструктивно-компоновочных решений позволяют обеспечить устойчивую водоподачу с учетом конкретных условий насосной станции. Преимуществами использования пневматических баков в системе водоподачи также являются энергоэффективность, за счет

сокращения продолжительности работы насоса, надежности и долговечности, в том числе в суровых климатических условиях, при снижении капитальных затрат, стоимости обслуживания и эксплуатации. Однако наиболее перспективным методом управления системой водоподачи является применение пневматических баков с частотно-регулируемым приводом, что может увеличить энергоэффективность систем водоподачи. Вместе с тем вопросы стабильности работы такой системы, а также работоспособности пневматического бака и эффективности работы насоса с частотно-регулируемым приводом при подаче воды в пневматический бак, требуют отдельного исследования.

Вторая глава посвящена теоретическому обоснованию эффективности совместного применения пневматических баков и насосов с ЧРП. Проведен анализ неравномерности водопотребления в течение суток в малых населенных пунктах. Обосновано применение предложенной модели для сглаживания неравномерности и снижения энергопотребления.

В системах водоснабжения, как правило, вода подается неравномерно в течение суток, что напрямую связано с активностью потребления – максимальной в утренние и вечерние часы, когда активность потребителей максимальная, и минимальной в ночное время (рисунок 1).



1 – подачи воды насосной станцией первого подъема; 2 – подачи воды насосной станцией второго подъема; 3 – водопотребления фактический;
4 – водопотребления расчетный ступенчатый

Рисунок 1 – График водопотребления домом в населенном пункте:

Эта неравномерность напрямую влияет на работу систем водоподачи, поскольку оборудование должно обеспечивать эффективную работу, как в пиковую нагрузку, так и при низких расходах. В тоже время применение пневматических баков позволяет снизить энергопотребление за счет наличия противодавления в системе – воздух, закаченный перед запуском системы, позволяет достигать определенного давления, выключая насос, расчет объема бака и необходимого давления воздуха в нем напрямую влияет на выработку своего ресурса насосами.

Для определения объема пневматического бака предложена формула:

$$V_{\text{бак}} = \frac{Q \cdot f \cdot 1000 \cdot (1 + P_{\text{вкл}} + \Delta P)}{4 \cdot n_{\text{max}} \cdot \Delta P \cdot K}, \quad (1)$$

где $V_{\text{бак}}$ – объём мембранного бака для системы водоснабжения;

Q – среднее значение расхода, м³/ч;

ΔP – разность давления между заданными значениями включения и выключения насоса, кПа;

$P_{\text{вкл}}$ – давление при включении насоса, кПа;

n_{max} – максимальное количество включений насоса в час, (среднее значение 30);

K – коэффициент подпора мембранного бака, при управлении насосом от реле давления – 0,9, от датчика давления – 0,7.

f – относительная частота вращения насоса ($f = 1$ – частота вращения 100%, 0,9 – частота вращения 90% и т.д.).

При этом работа пневматического бака напрямую зависит от соблюдения закона Бойля-Мариотта, согласно которому, при постоянной температуре и массе воздуха произведение объема и давления воздуха в начале сжатия равны произведению объема и давления воздуха в конце сжатия. Причем, если сжатие происходит медленно, и температура воздуха в баке успевает сравняться с окружающей средой, то это изотермический процесс, для которого будет справедлива следующая формула:

$$V_{\text{бак}} = \frac{V_{\text{воды}}}{1 - \frac{P_{\text{вкл}}}{P_{\text{выкл}}}}, \quad (2)$$

где $V_{\text{воды}}$ – объем воды, поступающей в бак, м³.

Если же процесс быстрый, то есть адиабатический, тогда:

$$V_{\text{бак}} = V_{\text{воды}} \cdot \left(\frac{P_{\text{выкл}}}{P_{\text{вкл}}} \right)^{\frac{1}{\gamma}}, \quad (3)$$

где γ – показатель адиабаты (для воздуха $\gamma \approx 1,4$).

Учитывая зависимости (1) – (3) получаем функциональную связь:

$$V_{\text{бак}} = \max \left(\frac{Q \cdot f \cdot 1000 \cdot (1 + P_{\text{вкл}} + \Delta P)}{4 \cdot N_{\text{max}} \cdot \Delta P \cdot K}, \frac{V_{\text{воды}}}{1 - \frac{P_{\text{вкл}}}{P_{\text{выкл}}}}, V_{\text{воды}} \cdot \left(\frac{P_{\text{выкл}}}{P_{\text{вкл}}} \right)^{\frac{1}{\gamma}} \right). \quad (4)$$

Зависимость (4) учитывает особенности работы системы, и позволяет выбрать максимальное значение, которое и будет наиболее подходящим.

В работе проведен анализ параметров системы в зависимости от работы насоса и трубопровода, а также наличия или отсутствия мембраны в пневматическом баке.

В безмембранных баках закон Бойля-Мариотта выполняется без изменений. Что же касается мембранных баков, то в них закон Бойля-Мариотта выполняется, но с учетом влияния коэффициента упругости мембраны и закона Гука.

Для анализа динамического изменения давления получено дифференциальное уравнение:

$$\frac{dP}{dt} = -\gamma \cdot \frac{dV}{dt} + \frac{E \cdot h}{R_m \cdot V_0} \cdot \frac{dV}{dt}, \quad (5)$$

где γ – показатель адиабаты воздуха (для быстрых процессов $\gamma = 1,4$, для медленных $\gamma = 1,0$);

dP/dt – скорость изменения давления воздуха;

dV/dt – скорость изменения объёма воздуха.

Уравнение (5) показывает, что давление изменяется не только из-за сжатия воздуха, но и из-за сопротивления мембраны, что оказывает дополнительное влияние на работу всей системы. Результаты анализа позволили установить закономерности изменения энергетических затрат при использовании ЧРП в работе системы с пневматическим баком (рисунок 2).

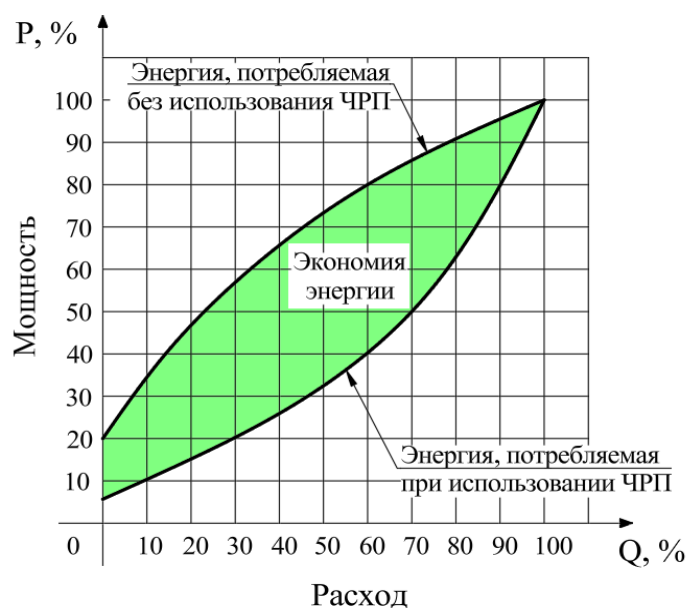


Рисунок 2 – Закономерность изменения энергетических затрат при использовании ЧРП

Анализ факторов, влияющих на энергопотребление системы, показал, что решающими параметрами являются:

- время наполнения $t_{\text{напол}}$ – с уменьшением, система экономичнее;
- давление в системе $P_{\text{сист}}$ – в трубопроводах перед пневматическим баком;
- мощность насоса $N_{\text{нас}}$ – ключевой параметр, который зависит от частоты вращения насоса f .

Разработана математическая модель, описывающая зависимости между временем наполнения, давлением в системе и мощностью насоса, в основе которой принят метод кригинга – гауссовский процесс регрессии (GP).

В дальнейшем для визуализации и наглядности анализа результатов расчетов использовались 3D-графики на основании полученных данных при помощи кроссплатформенной интегрированной среды разработки PyCharm и языка программирования высокого уровня Python.

Третья глава посвящена проведению экспериментальных стендовых исследований для вычисления ключевых параметров работы системы. Экспериментальные исследования проводились на базе лаборатории насосов и насосных станций кафедры сельскохозяйственного водоснабжения и водоотведения, насосов и насосных станций института мелиорации, водного хозяйства и строительства имени А.Н. Костякова, ФГБОУ ВО Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева.

Целью лабораторных исследований являлась оценка закономерностей между параметрами в процессе работы системы водоподачи, включая время наполнения, давление в системе и мощность насоса.

Для достижения указанной цели экспериментальная установка оснащалась системой контрольно-измерительных приборов и оборудования, включая: датчики давления типа ОБЕН ПД100; датчик расхода ПУЛЬСАР Ду20; тахометр СЕМ АТ-6; ваттметр TDM ELECTRIC; преобразователь частоты ТРМ200 и модуль управления SD751T2D. Все приборы и оборудование заводского изготовления, сертифицированы и имели технические паспорта. В главе дана оценка погрешностей измерений исследуемых параметров системы, использованных в экспериментальных исследованиях.

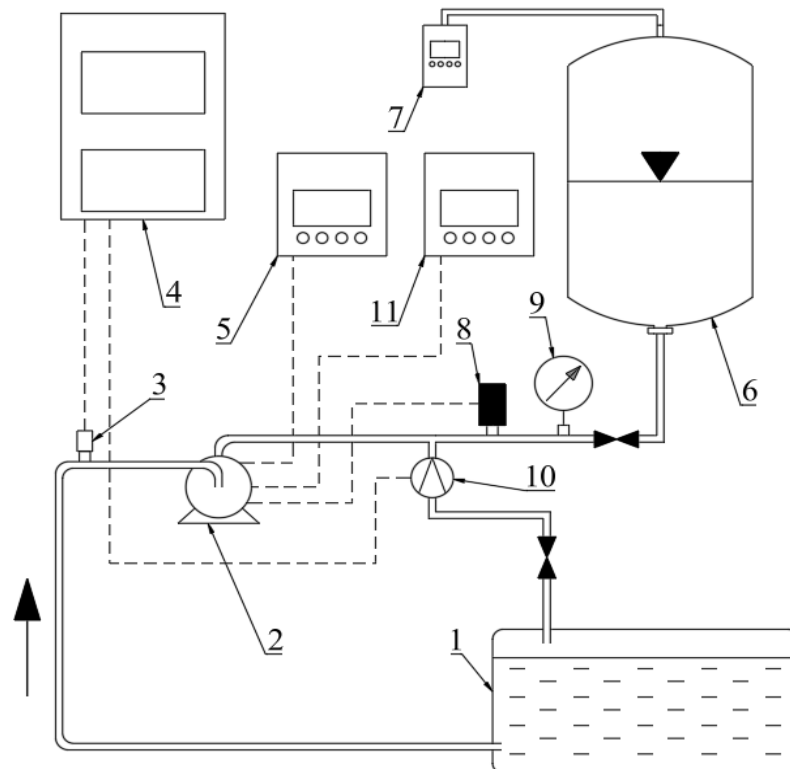
Исследования проводились в период с декабря 2023 года по июнь 2024 года, всего было выполнено 352 опыта, при значениях основных параметров установки: расхода на модели – 1,5; 2,7; 5,4; и 10,8 л/мин.; давления в системе – 50–200 кПа; частоте вращения рабочего колеса в диапазоне от 25 до 50 Гц.

Общий вид и принципиальная схема экспериментальной установки приведены на рисунке 3.

а)



б)



а) общий вид; б) схема;

1 – бак с водой; 2 – насос; 3 – датчик давления на всасывающем трубопроводе; 4 – модуль управления и индикации; 5 – преобразователь частоты вращения; 6 – пневматический бак; 7 – компрессор воздуха; 8 – реле давления; 9 – цифровой манометр; 10 – датчик расхода; 11 – ваттметр

Рисунок 3 – Экспериментальная установка:

Исследования включали следующие этапы:

1. Определение рабочих характеристик насосного оборудования.

Для определения напора насоса значения давления пересчитываются по следующей формуле, чтобы получить напор:

$$H_{\text{раб}} = \frac{P_{\text{раб}}}{g}, \quad (6)$$

где g – ускорение свободного падения.

2. Определение рабочих характеристик насосного оборудования при различных частотах вращения (рисунок 3).

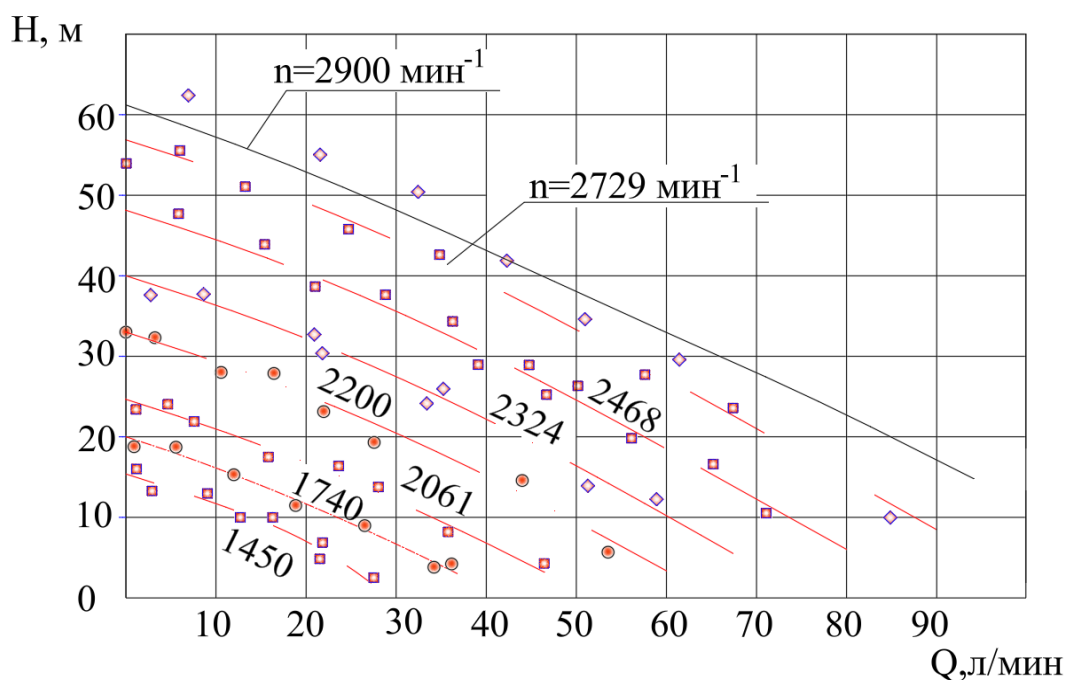


Рисунок 3 – Результаты испытаний насоса Asquaer RGJ-602P при различных частотах вращения рабочего колеса

Частота вращения снижалась со 100% до 50% (с 50 до 25 Гц) с шагом в 5%. В каждом опыте фиксировались значения расхода и давления (напора).

Результаты показывают, что паспортные характеристики насоса в целом соответствуют рабочим значениям ($Q = 50$ л/мин, $H = 35$ м). Максимальный расход для проведения дальнейших экспериментов был принят $Q_{\text{max}} = 30$ л/мин, а максимальный напор $H_{\text{max}} = 25$ м.

3. Подключение к системе пневматического бака и определение значений ключевых параметров без использования частотного преобразователя, далее к системе подключался пневматический бак, с помощью компрессора регулировалось значение давления воздуха в баке.

В ходе экспериментов диапазон значений давления воздуха принимался

от 200 кПа до 50 кПа с замерами ключевых параметров при значениях 200, 150, 100, 75 и 50 кПа. Для точной фиксации замеров значений ключевых параметров времени наполнения $t_{\text{наполн}}$, давления в системе $P_{\text{сист}}$ и мощности насоса $N_{\text{нас}}$ использовалась видеокамера. Максимальное значение давление воздуха составило 200 кПа. Значения расхода принимались 2,7, 5,4 и 10,8 л/мин.

4. Определение значений ключевых параметров с использованием частотного преобразователя.

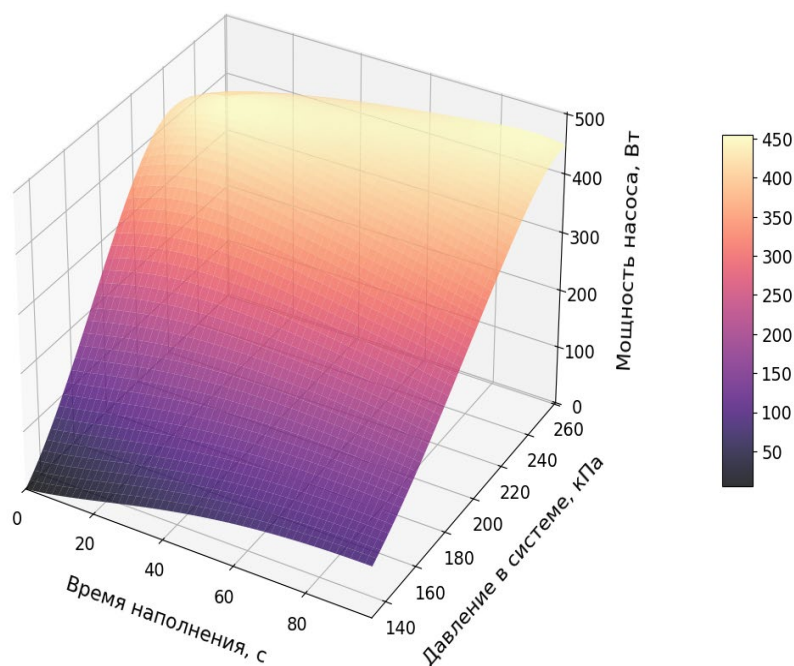
Частота вращения снижалась со 100% до 50% (с 50 до 25 Гц) с шагом в 10%. При каждом значении частоты вращения проверялось каждое давление воздуха в баке из диапазона 230-50 кПа и каждое значение расхода 2,7; 5,4 и 10,8 л/мин. На низких частотах (60-70%) было добавлено контрольное значение расхода 1,5 л/мин. Расход в каждом опыте регулировался методом дросселирования. При изменении параметров частоты вращения от 100 до 50% и давления воздуха в баке от 230 до 50 кПа определялись значения времени наполнения $t_{\text{наполн}}$, давления в системе $P_{\text{сист}}$ и мощности насоса $N_{\text{нас}}$. Диапазон работы реле давления выбирался, исходя из максимального напора насоса в том или ином случае. Разница между давлением включения $P_{\text{вкл}}$ и давлением выключения $P_{\text{выкл}}$ составляло в среднем 100-130 кПа.

Четвертая глава посвящена анализу полученных экспериментальных данных, определению энергетической и экономической эффективности совместного применения пневматических баков и насосов с ЧРП.

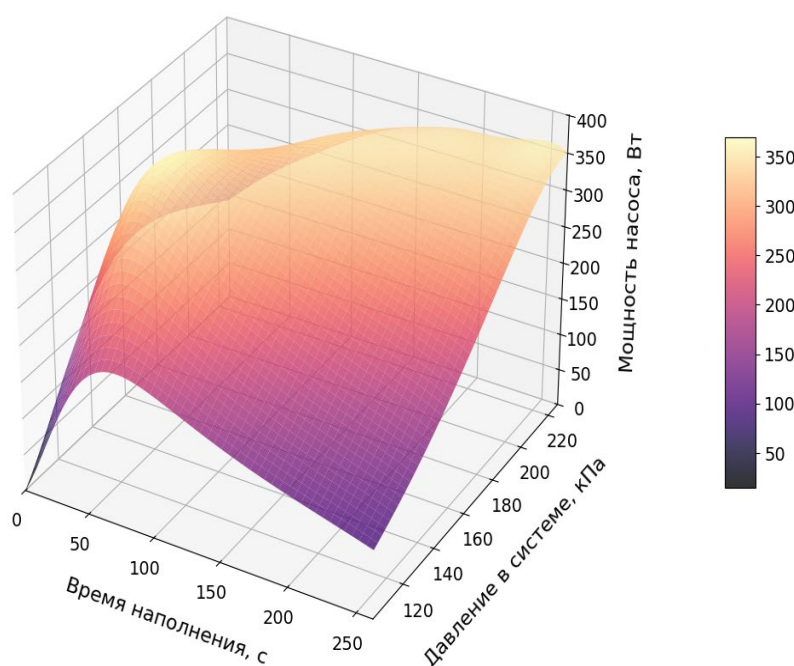
В качестве примера на рисунке 5 представлены 3D-графики зависимости мощности насоса от времени наполнения бака и давления при двух режимах работы системы. Как показывает анализ, что при давлении воздуха в баке 200 кПа (рисунок 5,а) мощность насоса $N_{\text{нас}}$ растёт в первые 10–20 секунд и далее не изменяется вплоть до конца наполнения. При увеличении давления в системе $P_{\text{сист}}$ мощность монотонно возрастает, верхняя граница близка к паспортной (450–600 Вт), таким образом при частоте вращения $f = 100 \%$, напор насоса существенно превосходит требуемый, расход близок к постоянному, а мощность растёт пропорционально росту давления в баке ($N \propto P_{\text{сист}}$), вследствие чего происходит быстрый выход мощности насоса $N_{\text{нас}}$ на максимум и ее удержание до конца наполнения. При снижении давления воздуха в баке до 100 кПа поверхность имеет характерную выпуклость (рисунок 5,б), т.е. по мере роста времени наполнения $t_{\text{наполн}}$ мощность насоса $N_{\text{нас}}$ сначала увеличивается до максимума (350–380 Вт) и снижается к концу цикла. Вдоль оси времени диапазон мощности существенно больше (100-350 Вт), это означает, что при $f = 90 \%$ напор $H_{\text{нас}}$ пропорционален частоте вращения и становится сопоставим с возрастающей мощностью насоса. По мере приближения к концу наполнения

рабочая точка уходит по насосной характеристике влево: расход падает быстрее, чем растёт напор, поэтому $N_{\text{нас}}$ начинает снижаться. Снижение частоты до 90% уменьшает пик мощности на 73% ($N \propto f^3$), что согласуется с масштабом цветовой шкалы. Понижение давления воздуха в баке увеличивает длительность цикла и рабочий интервал давлений.

а)



б)



- а) при давлении воздуха в баке 200 кПа, расходе 2,7 л/мин и частоте вращения 100%;
 б) при давлении воздуха в баке 100 кПа, расходе 2,7 л/мин и частоте вращения 90%

Рисунок 5 – 3D-графики зависимости мощности насоса от времени наполнения бака и давления в системе:

Давление воздуха в баке (рисунок 5,а) даёт высокую и почти постоянную мощность насоса $P_{\text{сист}}$, что приводит к кратковременным, но энергозатратным циклам работы насоса. Как видно из рисунка 5,б меньшая мощность насоса $N_{\text{нас}}$ с нисходящим профилем свидетельствует о плавной работе насоса, низкой нагрузки на сеть и привод. При снижении частоты снижаются и пик мощности, и средняя мощность, цикл работы насоса увеличивается, но при меньшем давлении воздуха в баке; объем воды в баке за цикл становится больше из-за высокой степени сжатия воздуха. Характер поверхности на рисунке 5,б указывает, что при правильно выбранном давлении отключения насоса удельные затраты ниже, что согласуется с предыдущими наблюдениями об экономии при снижении частоты.

На основе анализа представленных графиков выявлены закономерности работы пневматического бака при различных режимах работы насоса и расходах воды. Так, по мере снижения частоты вращения насоса возрастает длительность цикла наполнения пневматического бака. Эта тенденция обусловлена двумя основными факторами.

Во-первых, при снижении частоты вращения изменяется рабочая характеристика насоса – снижается напор, который насос способен развивать при заданной производительности. Это уменьшает разницу между давлением в трубопроводе и давлением воздуха в баке, вследствие чего уменьшается скорость поступления воды в бак. Поскольку пневматический бак представляет собой замкнутый сосуд, заполненный частично сжимаемым воздухом, подача воды требует постоянного преодоления противодействующего давления воздуха. Чем меньше напор со стороны насоса, тем медленнее проходит наполнение, особенно в конечной фазе, когда давление воды приближается к давлению воздуха в баке.

Во-вторых, с уменьшением частоты возрастает время, необходимое на восстановление давления в системе после включения насоса. Это особенно заметно при начальной фазе работы, когда насос должен заполнить опорожнённый участок трубопровода перед тем, как начнётся фактическое накопление воды в баке. Такие переходные процессы говорят о том, что динамика запуска насосной установки значительно влияет на общее время цикла, особенно при частотном регулировании.

Анализ графиков при различных расходах выявил, что:

– при расходе 2,7 л/мин время наполнения остаётся стабильным даже при снижении частоты до 70% и 60%. Это говорит о высокой энергоэффективности и устойчивости системы при низких нагрузках, а насос работает в режиме, близком к оптимальному, создавая достаточный напор при минимальной

мощности. Таким образом, бак наполняется за короткое время (5-8 минут) даже при существенно сниженной потребляемой энергии;

- при увеличении расхода до 10,8 л/мин и снижении частоты вращения до 90% и 80%, наблюдается резкое увеличение времени наполнения. Это связано с тем, что насос при этих условиях не в состоянии развить достаточный напор, чтобы преодолеть давление воздуха в баке и обеспечить требуемый расход. Вследствие этого система начинает работать на грани стабильности, особенно в моменты, когда давление воды становится недостаточным для эффективного наполнения. Это подтверждает важность точного подбора как пневматического бака, так и режима работы насоса.

Таким образом, при проектировании систем водоподачи с частотно-регулируемым приводом и пневматическим баком необходимо учитывать взаимосвязь между частотой вращения, расходом и временем наполнения бака. Недостаточная точность в выборе объёма бака или несоответствие давления воздуха заданным гидравлическим характеристикам может привести к потере эффективности, чрезмерному числу включений насоса и даже к отказу системы в обеспечении требуемого напора.

Для определения энергетической эффективности рассматриваются два ключевых параметра:

- снижение потребляемой мощности насоса при частотном регулировании. При снижении частоты на 20-30% мощность насоса снижалась на 50% (от 450 Вт до 200 Вт);

- чередование работы насоса и опорожнения бака, так как насос не работает за счёт увеличенного времени опорожнения.

Для расчета средней мощности было выведено следующее уравнение:

$$P_{\text{сред}} = \frac{P_{\text{насоса}} \cdot t_{\text{наполн}}}{t_{\text{наполн}} + t_{\text{опорож}}}, \quad (7)$$

где $P_{\text{сред}}$ – средняя мощность насоса во время одного цикла работы, Вт;

$P_{\text{насоса}}$ – мощность насоса согласно показаниям ваттметра, Вт;

$t_{\text{наполн}}$ – время наполнения пневматического бака, с;

$t_{\text{опорож}}$ – время опорожнения пневматического бака, с.

На основании проведенных расчетов мощности можно определить, сколько электроэнергии и денежных средств экономится при совместном использовании пневматического бака и насоса с ЧРП, а также сравнить с другими методами регулирования (такими как «бак + насос без ЧРП», «насос с ЧРП без бака» и «насос без ЧРП и без бака»).

Для начала определяется длительность цикла работы насоса. Затем рассчитывается количество циклов насоса $n_{\text{циклов}}$ за один час:

$$n_{\text{циклов}} = \frac{1}{t_{\text{цикл}}}, \quad (8)$$

где $t_{\text{цикл}}$ – длительность цикла работы бака и насоса (суммарное время наполнения и опорожнения), ч.

Так как насос включается и выключается по одному разу за цикл, то максимальное количество включений насоса равняется количеству циклов, то есть:

$$n_{\text{max}} = n_{\text{циклов}}. \quad (9)$$

На основании этого определяется суммарное время наполнения, а значит и работы насоса, в течение часа:

$$t_{\text{сумм.раб.нас.}} = n_{\text{max}} \cdot t_{\text{наполн.}} \quad (10)$$

Для расчета экономической эффективности брались значения включения насоса, для которых выполняется условие:

$$n_{\text{max}} \leq 30. \quad (11)$$

Для расчета потребляемой электроэнергии используется следующая формула:

$$E_{\text{потр}} = \frac{P_{\text{сред}}}{1000} \cdot t_{\text{сумм.раб.нас.}}, \quad (12)$$

где $E_{\text{потр}}$ – потребляемая электроэнергия, кВт·ч;

$P_{\text{сред}}$ – мощность насоса, Вт (7);

$t_{\text{сумм.раб.нас.}}$ – суммарное время работы насоса в течение часа, ч.

Определив потребляемую электроэнергию, можно рассчитать ее стоимость:

$$C = E_{\text{потр}} \cdot A_{\text{ср}}, \quad (13)$$

где C – стоимость потребляемой за час электроэнергии, руб;

$A_{\text{ср}}$ – средняя стоимость 1-го кВт·ч, руб.

Для окончательного анализа необходимо сравнить стоимость затрат электроэнергии системы «бак + насос с ЧРП» с системами «бак + насос без ЧРП», «насос с ЧРП без бака» и «насос без ЧРП и без бака». Для систем, где не используется пневматический бак, средняя мощность насоса будет равняться его фактической паспортной мощности. Использование системы «бак + насос с ЧРП» позволяет значительно экономить электроэнергию и денежные средства. Так, по сравнению с работой системы «бак + насос без ЧРП» средняя экономия средств составляет 26%, с работой системы «насос с ЧРП без бака» 72%, а с работой системы «насос без ЧРП и без бака» – 79%.

Предложенная система водоподачи позволяет значительно повысить экономическую эффективность работы систем водоснабжения сферы ЖКХ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Анализ современного состояния инженерных сооружений водохозяйственного комплекса страны, условий использования башенных и безбашенных систем водоподачи, а также современных методов регулирования режимов работы насосно-силового оборудования показал, что использование пневматически баков даёт ряд преимуществ по сравнению с водонапорными башнями, их работа зависит от расчетного давления и растворенного воздуха, а наиболее перспективным методом управления является применение частотно-регулируемого привода, оценка эффективности работы которой требует дальнейшего исследования.

2. По результатам теоретического анализа методов регулирования расхода жидкости в насосных системах, гидравлических особенностей работы пневматических баков и насосов с частотно-регулируемым приводом, установлены закономерности между давлением воздуха в баке и воды в системе, мощностью насоса и частотой вращения, определены ключевые параметры работы системы, которые позволяют определить фактическую энергоэффективность совместного применения пневматических баков и насосов с частотно-регулируемым приводом.

3. Разработана математическая модель функционирования системы водоподачи в составе пневматических баков и насосов с частотно-регулируемым приводом для прогноза энергоэффективности совместного применения пневматических баков и насосов с частотно-регулируемым приводом при заданных гидравлических характеристиках исходных условий.

4. Разработка экспериментальной установки в виде фрагмента системы водоподачи с пневматическим баком и регулируемым насосом, проведение и обработка результатов исследований позволили оценить взаимосвязь гидравлических и технических параметров, основными из которых являются наполняемость и давление в системе, а также характеристики насосно-силового оборудования. По результатам экспериментов определены рабочие характеристики насосно-силового оборудования системы водоподачи, как функции частоты вращения рабочего колеса, а также значения ключевых параметров работы системы – время наполнения, давления в системе и мощность насоса.

5. Установлены закономерности взаимодействия гидравлической и воздушной составляющих исследуемой системы, в частности, снижение частоты вращения насоса и увеличение длительности цикла наполнения пневматического бака, что обуславливается изменением характеристики насоса

и увеличением влияния переходных процессов на наполнения трубопроводов и пневматического бака. По результатам оптимизации системы водоподачи в составе пневматического бака с регулируемым насосом, обоснован выбор диапазона давления, при котором обеспечивается достаточный запас давления для работы насоса при высоких значениях КПД с частотно-регулируемым приводом и достаточное время опорожнения бака, с отношением 2:1 ко времени опорожнения.

6. Дана технико-экономическая оценка работы исследуемой модели водоподачи с частотно-регулируемым приводом, которая свидетельствует о снижении мощности насосно-силового оборудования при обеспечении требуемых гидравлических показателей и повышение энергоэффективности работы оборудования до 60 % по сравнению с существующими системами водоподачи.

ПЕРСПЕКТИВЫ ДАЛЬНЕЙШЕЙ РАЗРАБОТКИ ТЕМЫ

Перспективы дальнейших исследования по теме диссертации связаны с необходимостью изучения гидрогазодинамики системы водоподачи с целью оптимизации конструкции мембраны как наиболее уязвимой части пневматических баков, а также для сокращения затрат на обслуживание систем водоподачи и экономии электроэнергии.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях, включенных в Перечень рецензируемых научных изданий ВАК:

1. Короткоручко, Д.Ю. Определение мощностных и энергетических характеристик насосов с регулируемой частотой вращения в системах водоподачи с гидравлическими мембранными баками / Д. Ю. Короткоручко, М. С. Али // Природообустройство. – 2025. – № 1. – С. 104-110. – DOI 10.26897/1997-6011-2025-1-104-110.
2. Короткоручко, Д.Ю. Экспериментальное исследование влияния гидравлических мембранных баков на работу центробежных насосов с регулируемой частотой вращения в локальных системах водоснабжения / Д. Ю. Короткоручко // Гидротехника. – 2025. – № 1. – С. 46–55.
3. Короткоручко Д.Ю. Исследование влияния наличия и отсутствия мембраны на работу пневматических баков в системах водоподачи с точки зрения энергоэффективности / Д. Ю. Короткоручко, М. С. Али //

Природообустройство. – 2025. – № 4. – С. 118-124 – DOI 10.26897/1997-6011-2025-4-118-124

Публикации в других научных изданиях:

4. Короткоручко, Д.Ю. Исследование режима работы гидравлических аккумуляторов в системах водоподачи / М.С. Али, Д.С. Бегляров, Е.А. Лентяева, В.В. Демидочкин // Естественные и технические науки. – 2024 г. – № 5 (192). – С. 196-203.

5. Короткоручко, Д.Ю. Изучение работы гидравлических аккумуляторов в системах водоснабжения с целью повышения ее энергоэффективности / Д. Ю. Короткоручко // Материалы Международной научной конференции молодых учёных и специалистов, посвящённой 150-летию со дня рождения А.Я. Миловича : Сборник статей, Москва, 03–05 июня 2024 года. – Москва: Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева, 2024. – С. 71-76.

6. Короткоручко, Д. Ю. Повышение энергоэффективности в локальных системах водоподачи с применением пневматических баков и насосов с частотно-регулируемым приводом / Д. Ю. Короткоручко // Наилучшие доступные технологии водоснабжения и водоотведения. – 2025. – № S1. – С. 56-62.

7. Korotkoruchko Dmitrii Yu. Improving energy efficiency in local water supply systems using pneumatic tanks and pumps with variable frequency drive / Dmitrii Yu. Korotkoruchko // Proceedings of the YSU C: Geological and Geographical Sciences. – 2025. – 59 (2 (266)). – 319-328. DOI 10.46991/PYSUC.2025.59.2.319