

На правах рукописи



Барбул Михаил Леонидович

**ОПТИМИЗАЦИЯ РАБОТЫ
МНОГОНАСОСНЫХ СТАНЦИЙ
ПОВЫШЕНИЯ ДАВЛЕНИЯ
СИСТЕМ ВОДОСНАБЖЕНИЯ
С УЧЕТОМ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ
ВОДОПОТРЕБЛЕНИЯ В РЕЖИМЕ
РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ**

Специальность 2.1.4. – Водоснабжение, канализация,
строительные системы охраны водных ресурсов

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2021

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет».

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Васильев Виктор Михайлович.

Официальные оппоненты: **Щербаков Владимир Иванович,**
доктор технических наук, ФГБОУ ВО
«Воронежский государственный технический
университет», кафедра «Гидравлика,
водоснабжение и водоотведение», профессор;

Али Мунзер Сулейман,
кандидат технических наук, ФГБОУ ВО
«Российский государственный аграрный
университет – МСХА имени К.А. Тимирязева»,
г. Москва, кафедра «Сельскохозяйственное
водоснабжение, водоотведение, насосы
и насосные станции», заведующий кафедрой.

Ведущая организация: ФГАОУ ВО «Крымский федеральный
университет имени В. И. Вернадского».

Защита диссертации состоится «09» декабря 2021 г. в 14:00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.380.03 при ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет» по адресу: 190005, Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., д. 4, аудитория 220, тел./факс (812) 316-58-73; E-mail: rector@spbgasu.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет» и на сайте <http://dis.spbgasu.ru/specialtys/personal/barbul-mihail-leonidovich-0>

Автореферат разослан «20» октября 2021 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета



В. А. Пухкал

I. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность выбранной темы. Система водоснабжения – это комплекс взаимосвязанных сооружений, обеспечивающих потребителей водой в требуемом количестве и заданного качества. Одними из основных элементов системы водоснабжения являются многонасосные станции повышения давления (МНСПД), предназначенные для передачи требуемого количества (объема) воды с необходимым напором (давлением) потребителю.

Современный метод управления многонасосными станциями повышения давления базируется на поддержании постоянного давления на выходе МНСПД при изменении водопотребления. Постоянство давления на выходе МНСПД в настоящее время обеспечивается, в основном, применением частотного электропривода на двигателях насосного агрегата. Данный метод управления не учитывает изменение водопотребления в течении дня, недели и т.д., что напрямую влияет не только на режим работы МНСПД, но и на коэффициент полезного действия (КПД) МНСПД.

Необходимость совершенствования существующих алгоритмов управления многонасосных станций повышения давления (в реальных условиях эксплуатации) для увеличения ее КПД определяет актуальность данной работы.

Степень разработанности темы исследования. К настоящему времени имеется достаточное количество работ российских и зарубежных авторов, в которых излагаются методы управления современными МНСПД: Васильева В.М., Журбы М.Г., Али М.С., Соколова Л.И., Лезнова Б.С., Николенко И.В., Воробьева С.В., Гильманова А.Г., Пинчука С.В., Чебанова В.Б., Фащенко В.Н., Штейнмиллера О.А., Щербакова В.И., С.F. LeónCeli, P.L.Iglesias-Rey, F.J. Martínez Solano и др.

В работах Б.С. Лезнова, В.Н. Фащенко показано, что превышение напора на выходе МНСПД является одной из причин возникновения излишних затрат на электроэнергию в насосных станциях. Поэтому целесообразно поддерживать такую частоту вращения насосного агрегата, при которой обеспечивается поддержание минимально допустимого значения напора на выходе МНСПД во всем диапазоне изменения его подачи. Проведенный аналитический обзор показал, что современные методы управления в своих алгоритмах управления учитывают только значение текущего давления на выходе МНСПД и текущую частоту вращения насосного агрегата. Но, не принимая во внимание дальнейшее водопотребление, невозможно определить рабочую точку насосной станции в последующие моменты времени, и заранее вывести на эффективный режим работы с более высоким КПД.

Целью исследования является разработка способа прогнозирования текущего водопотребления за счет статистической обработки накопленных данных водопотребления за прошлый период времени, а также разработка оптимизированного алгоритма управления многонасосными

станциями повышения давления с учетом спрогнозированного водопотребления с уменьшенным энергопотреблением по сравнению с существующими методами управления.

Задачи исследования:

– разработать математическую модель функции водопотребления на основе анализа статистических данных водопотребления, полученных в результате экспериментов;

– определить параметры работы группы МНСПД, при которых обеспечивается снижение энергопотребления МНСПД;

– разработать адаптивный алгоритм управления многонасосными станциями повышения давления, позволяющий снизить энергопотребление МНСПД.

Объект исследования – многонасосные станции повышения давления (МНСПД).

Предмет исследования – алгоритмы управления многонасосными станциями повышения давления.

Научная новизна результатов диссертационного исследования, полученных лично автором, заключается в следующем:

– разработан способ прогнозирования водопотребления на последующие промежутки времени, основанный на анализе статистических данных водопотребления с помощью регрессионной математической модели прогнозирования;

– предложен адаптивный способ прогнозирования изменения водопотребления, учитывающий, на основе обрабатываемых в режиме реального времени данных, изменение параметров гидравлической сети, времени года и т.д.;

– определены оптимальные величины давлений на выходе МНСПД (нескольких МНСПД, работающих в одной общей сети), при которых обеспечивается минимум энергетических затрат;

– разработан оптимизированный алгоритм управления МНСПД, который на основе спрогнозированного водопотребления позволяет вывести МНСПД на режим работы с более высоким КПД.

Теоретическая значимость работы заключается в разработке способа прогнозирования водопотребления в режиме реального времени на основе статистической обработки накопленных данных за прошедший промежуток времени. Получены уравнения, математически описывающие водопотребление жилых домов, районов и т.д. за конкретный промежуток времени.

Практическая значимость состоит в следующем:

– полученные результаты могут использоваться при разработке и совершенствовании существующих алгоритмов управления МНСПД с целью увеличения КПД МНСПД;

– на основании спрогнозированного водопотребления всех жилых домов, входящих в систему водоснабжения города (района), появляется

возможность (с помощью программных средств расчета систем водоснабжения) прогнозирования поведения данной системы водоснабжения в конкретный промежуток времени.

Внедрение результатов. Разработанные алгоритмы внедрены на предприятиях: ОАО «Водоканал-Мытищи», г. Мытищи; ООО «Водоканал», г. Королёв; РЭП «Голицыно», г. Голицыно; ООО «Тепловые сети Балашихи», г. Балашиха и др.

Методология и методы исследования. В диссертации использованы теоретические и экспериментальные методы исследований. Теоретические исследования базируются на применении методов решения линейных систем уравнений, методов вычислительной математики и математического программирования, а также методов анализа и синтеза известных и полученных данных во время написания диссертационной работы. При экспериментальных исследованиях на реальных объектах проводилась проверка результатов теоретических исследований.

Положения, выносимые на защиту:

– способ прогнозирования водопотребления на последующие промежутки времени на основе регрессионной математической модели прогнозирования;

– адаптивный способ прогнозирования изменения водопотребления с учетом изменения параметров гидравлической сети, времени года и т.д.;

– алгоритм определения оптимальных величин давлений на выходе МНСПД (групп МНСПД, работающих в одной общей сети), при которых обеспечивается минимум энергетических затрат;

– оптимизированный алгоритм управления МНСПД, который позволяет вывести МНСПД на режим работы с более высоким КПД.

Область исследования соответствует паспорту научной специальности 2.1.4 «Водоснабжение, канализация, строительные системы охраны водных ресурсов», а именно п. 1 «Создание научных основ и математическое моделирование систем водоснабжения и водоотведения населенных пунктов, промышленных предприятий, объектов энергетики и сельского хозяйства с разработкой и реализацией методов оптимизации систем по экономическим, технологическим и экологическим критериям оптимальности» и п. 15 «Использование средств автоматического контроля и управления для повышения эффективности работы сооружений и устройств систем водного хозяйства».

Степень достоверности и обоснованности полученных результатов обоснована применением классических положений анализа, моделированием изучаемых процессов. При постановке экспериментов применялись отработанные методики в составе насосных станций, на которых проводились эксперименты, использовались сертифицированные и прошедшие аттестацию приборы и оборудование. Полученные в работе теоретические положения обоснованы строгостью исходных посылок и корректным использованием математического аппарата при выводе аналитических выражений.

Апробация результатов. Основные результаты работы были доложены и обсуждались на следующих научно-технических конференциях и семинарах: Научно-техническая конференция профессорско-преподавательского состава и аспирантов МГУ Леса по итогам научно-исследовательских работ за 2012-2016 годы; Годовая конференция аспирантов и молодых ученых «Круглый стол», г. Мытищи, МГУ Леса, май 2013-2015 гг.; Международная научно-техническая конференция «Энергетические системы», 2017 г., г. Белгород, БГТУ им. В.Г. Шухова.

Публикации. Основные научные результаты по теме диссертации опубликованы в 11 научных работах, автор имеет 8 научных трудов в изданиях, выпускаемых в РФ и рекомендуемых ВАК для публикации основных результатов диссертации.

Структура и объем диссертационной работы. Диссертация содержит введение, 4 главы, заключение, акты об использовании результатов работы, изложенные на 121 стр. В работу включены 40 рисунков, список литературы из 103 наименований.

Во введении обоснована актуальность темы, определены цель и задачи исследований, сформулирована научная новизна и практическая значимость работы, а также отражены основные положения диссертации, вынесенные на защиту.

В первой главе проведен анализ алгоритмов работы существующих многонасосных станций повышения давления. Рассмотрены основные методы управления многонасосными станциями, указаны достоинства и недостатки каждого из них. На основании проведенного анализа сделан вывод, что существующие алгоритмы не учитывают всего многообразия возможных вариантов работы насосной станции в реальном времени, что существенно сказывается на КПД насосной станции, и поэтому требует проведения исследований по поиску новых алгоритмов управления многонасосными станциями с целью уменьшения энергопотребления. В заключении главы поставлены задачи исследования.

Во второй главе рассмотрен способ описания процесса водопотребления в течение суток. На основе анализа существующих математических моделей прогнозирования и методов анализа данных разработан адаптивный способ прогнозирования изменения дневного водопотребления, основанный на применении регрессионной математической модели прогнозирования.

В третьей главе предложен алгоритм определения текущего расхода воды на насосном агрегате, необходимый для вычисления спрогнозированного водопотребления всей МНСПД. Разработан адаптивный алгоритм управления МНСПД, который позволяет оптимизировать работу МНСПД за счёт работы насосных агрегатов в зоне с более высоким КПД. Указаны принципиальные отличия известных алгоритмов управления насосными агрегатами по сравнению с разработанным.

Четвёртая глава посвящена экспериментальному исследованию разработанного алгоритма управления МНСПД. Проверена адекватность модели

прогнозирования водопотребления с экспериментальными значениями. Проведено сравнение энергопотребления МНСПД, работающей по известным алгоритмам и разработанному. В результате энергопотребление станции управления с разработанным алгоритмом оказалось меньше на 7%. Представлено описание проведения экспериментального исследования и методики обработки результатов.

В заключении работы приведены основные выводы по результатам диссертации.

II. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ И РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИОННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ, ВЫНОСИМЫЕ НА ЗАЩИТУ

1. Способ прогнозирования водопотребления на последующие промежутки времени на основе регрессионной математической модели прогнозирования

При проектировании (подборе) насосных станций жилых домов согласно СП 30.13330.2020 «Внутренний водопровод и канализация зданий» производительность хозяйственно-питьевых и производственных насосных установок при отсутствии регулирующей емкости следует принимать не менее максимального секундного расхода воды и вычислять по формуле:

$$q = 5 \cdot q_0 \cdot \alpha, \quad (1)$$

где q_0 – расход воды санитарно-техническим прибором (арматурой), л/с; α – коэффициент, зависящий от общего числа приборов N на расчетном участке сети и вероятности их действия P .

Расход воды q_0 различных санитарно-технических приборов для одинаковых водопотребителей на участке тупиковой сети определяется по соответствующим таблицам и является величиной постоянной.

Таким образом при подборе насосных станций для жилых домов не учитывается изменение водопотребления в течении дня, что непосредственно влияет на режим работы МНСПД.

Проведенные исследования и наблюдения водопотребления новостройки г. Мытищи на проспекте Астрахова д. 10 показали (в зависимости от дня недели и времени суток) значительные колебания часового водопотребления в течение дня (см. рисунки 1, 2 и 3).

При проведении наблюдений и измерений в конкретный период времени в домах городов Московской области, таких как Пушкино, Мытищи, Королев и др. было выявлено, что ситуация изменения водопотребления в течении дня за рассматриваемый промежуток времени повторяет вид графиков, указанных на рисунках 1, 2 и 3.

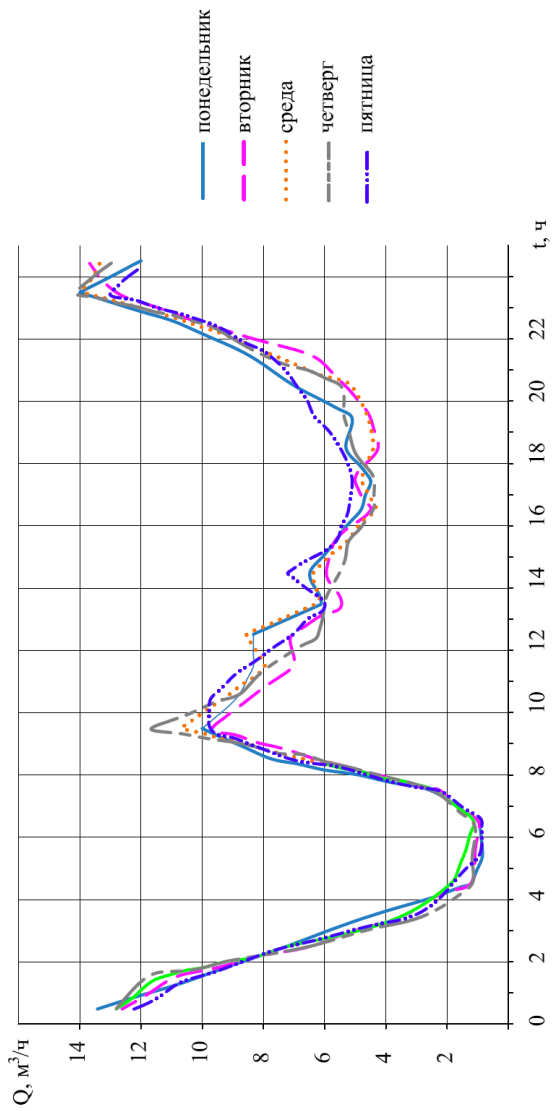


Рисунок 1 – График изменения расхода жилого дома г. Мытищи на проспекте Астрахова д. 10 в течении рабочей недели июля 2017

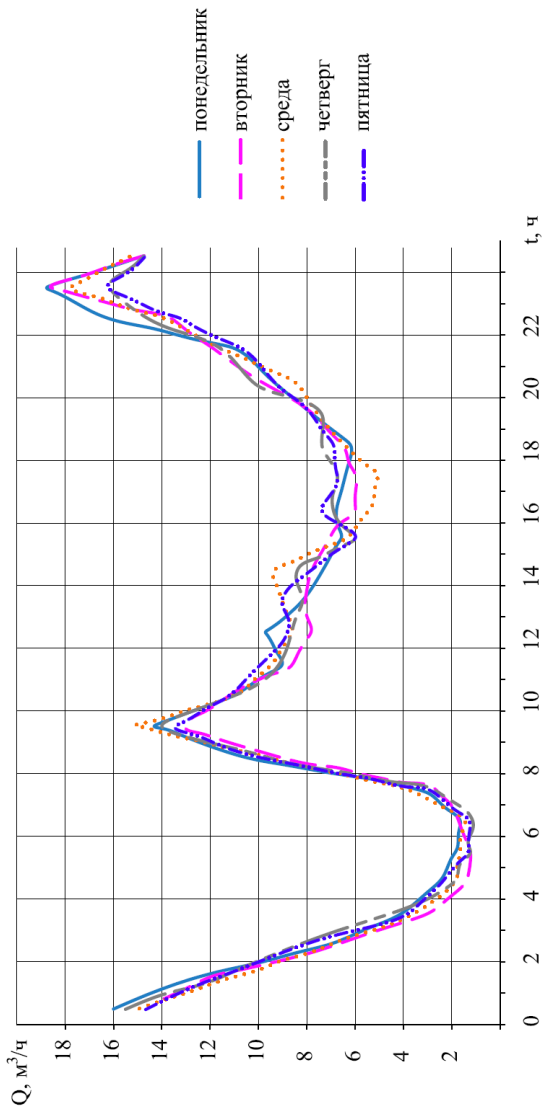


Рисунок 2 – График изменения расхода жилого дома г. Мытищи на проспекте Астрахова д. 10 в течении рабочей недели октября 2017

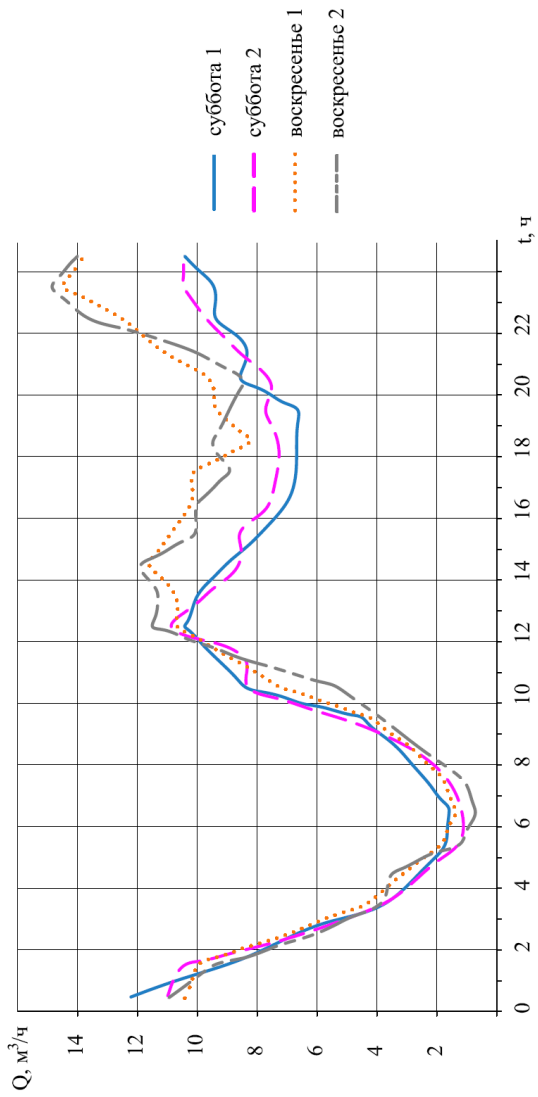


Рисунок 3 – График изменения расхода жилого дома г. Мытищи на проспекте Астрахова д. 10 в течении выходных дней июля 2017 года

На основании анализа графиков водопотребления за конкретный промежуток времени сделаны следующие выводы:

- форма графика суточного водопотребления изменяется циклично, т.е. водопотребление одного дня недели повторяет водопотребление другого дня недели. Особенно это характерно для рабочих дней;

- форма графика суточного водопотребления выходных дней также циклична, но отличается от формы поведения водопотребления будних дней недели;

- для рабочих дней недели пики минимального и максимального водопотребления приходятся на одно и то же время;

- отличительной чертой выходных дней недели, относительно рабочих дней, является сдвиг по времени момента возникновения пиков максимального и минимального водопотребления.

Поскольку картина водопотребления одного дня недели повторяет водопотребление другого дня недели, то в этом случае возможно произвести прогнозирование водопотребления на последующий, как рабочий день недели, так и выходной день недели.

В работе применяется метод формализованного прогнозирования. Данный метод строится на основании математической модели, которая, улавливая закономерности процесса, на своем выходе имеет будущие значения исследуемого процесса. В настоящее время насчитывается свыше 100 моделей прогнозирования. К основным можно отнести следующие:

- регрессионные модели (regression model);

- авторегрессионные модели (auto regressive model, AR);

- нейросетевые модели (artificial neural network, ANN);

- модели на базе цепей Маркова (Markov chain);

- модели экспоненциального сглаживания (exponential smoothing, ES);

- классификационно-регрессионные деревья (classification and regression trees, CART);

- и др.

Модели на базе нейронных сетей являются наиболее популярными и достаточно изучены в литературе, но сложны в выборе архитектуры построения и требуют ресурсоемкости при процессе их обучения.

Начиная с модели экспоненциального сглаживания и далее прогнозирование осуществляется на долгосрочный период, что в нашем случае является нецелесообразным, поэтому они далее не рассматриваются.

Модели на базе цепей Маркова и регрессионные модели предполагают, что будущее состояние процесса зависит только от его текущего состояния процесса и не зависит от предыдущих, что также не подходит.

В основу авторегрессионных моделей заложено предположение о том, что значение процесса $Z(t)$ линейно зависит от предыдущих значений того же процесса $Z(t-1)$, ..., $Z(t-p)$. В работе была выбрана модель прогнозирования на основе авторегрессионных моделей с использованием модели скользящего среднего порядка q

$$Z(t) = \varphi_0 + \varphi_1 Z(t-1) + \varphi_2 Z(t-2) + \dots + \varphi_p Z(t-p) + \frac{1}{q} (Z(t-1) + Z(t-2) + \dots + Z(t-q)) + \varepsilon_t, \quad (2)$$

где $Z(t)$ – прогнозируемый процесс; φ_p – коэффициенты регрессии; $Z(t-p)$ – предыдущие значения процесса; ε_t – ошибка прогнозирования; p – порядок авторегрессии; q – порядок скользящего среднего.

Для определения коэффициентов φ_p используется метод наименьших квадратов.

В нашем случае для задачи прогнозирования водопотребления принят временной ряд водопотребления $Q(t)$. Для времени $(t+1)$, согласно модели авторегрессии (2), запишем следующее уравнение прогнозирования

$$Q(t+1) = \varphi_0 + \varphi_1 Q(t-1) + \varphi_2 Q(t-2) + \dots + \varphi_p Q(t+1-p), \quad (3)$$

где $Q(t+1)$ – прогнозируемое водопотребление; φ_p – коэффициенты регрессии; p – порядок авторегрессии; $Q(t-p)$ – предыдущие значения водопотребления.

Если для $Q(t+1)$ применима зависимость (3), значит, она применима и для предыдущих точек, т.е. получим следующую систему уравнений

$$\begin{cases} Q(t+1) = \varphi_0 + \varphi_1 Q(t) + \varphi_2 Q(t-1) + \dots + \varphi_p Q(t-p+1); \\ Q(t) = \varphi_0 + \varphi_1 Q(t-1) + \varphi_2 Q(t-2) + \dots + \varphi_p Q(t-p); \\ Q(t-1) = \varphi_0 + \varphi_1 Q(t-1) + \varphi_2 Q(t-2) + \dots + \varphi_p Q(t-1-p); \\ \dots \\ Q(t-k) = \varphi_0 + \varphi_1 Q(t-1) + \varphi_2 Q(t-2) + \dots + \varphi_p Q(t-k-p). \end{cases} \quad (4)$$

Для этой системы уравнений известны все значения водопотребления $Q(t)$, поэтому, используя метод наименьших квадратов и определив коэффициенты φ_p , находится прогнозируемое водопотребление $Q(t+1)$.

Для использования модели авторегрессии необходимо определить следующие два параметра:

- определить порядок авторегрессии \mathbf{p} ;
- определить необходимое число уравнений \mathbf{k} в системе уравнений (4).

На текущий момент однозначного ответа по определению данных параметров нет, и они определяются эмпирическим путем. Поэтому задача прогнозирования водопотребления сводится к определению параметров \mathbf{p} и \mathbf{k} , при которых ошибка аппроксимации была бы не больше допустимой.

На основании проведенных вычислений было выявлено, что оптимальное значение порядка авторегрессии $\mathbf{p} = 72$ и необходимое число уравнений в системе уравнений (4) $\mathbf{k} = 12$. Дополнительно для сглаживания пиков водопотребления, которые спрогнозировать достаточно сложно, дополняем нашу модель авторегрессии в моменты пиков моделью скользящего среднего порядка $\mathbf{q} = 2$. В итоге ошибка прогнозирования суточного водопотребления в установившихся режимах водопотребления не превышает 8%.

2. Адаптивный способ прогнозирования изменения водопотребления с учетом изменения параметров гидравлической сети, времени года и т.д.

Эффективность работы предложенного способа прогнозирования водопотребления на основе авторегрессионной модели с использованием модели скользящего среднего зависит от того, насколько полученная функция водопотребления, выражающая неоднозначность значений, согласуется с реальной жизненной ситуацией. Более того, эта ситуация постоянно изменяется при смене времени года, при появлении новых потребителей и т.д. Поэтому данная система должна быть наделена способностью адаптации.

На основе статистических данных в системе управления накапливаются данные от датчиков за несколько последних дней. Ежедневно данные извлекаются и из них удаляются недостоверные данные, а именно:

а) рабочий день недели соответствует выходному дню и, наоборот, выходной день недели соответствует рабочему дню. Определяется по времени возникновения пика максимального водоразбора (в выходные дни время наступления максимального водоразбора позже, чем в рабочие дни (см. рисунок 3);

б) при остановке станции управления насосными агрегатами;

в) случайные величины (на основании практического опыта было установлено, что значения, отличающиеся от текущего среднего значения более 30% принимаются случайными).

Прогнозирование будних дней недели строится на основании значений водопотребления последних трех будних дней недели с помощью авторегрессионной модели прогнозирования с использованием модели скользящего среднего. В случае отклонения среднеквадратичного отклонения реального значения от спрогнозированного более чем на 7% – для дальнейшего прогнозирования выбирается спрогнозированное значение (реальное значение считается ошибочным и эти данные исключаются). При повторении ситуации в следующие дни недели – в расчет берутся реальные значения (идёт смена режима водопотребления, происходит процесс адаптации).

Для выходных и праздничных дней прогнозирование водопотребления ведётся аналогично будним дням недели с учетом того, что в первый выходной день в максимальное время водоразбора значение водопотребления принимается, как среднее значение максимальных водопотреблений в первой половине дня предыдущих трех дней недели. Прогнозирование последующих выходных дней ведётся на основании фактических данных предыдущих выходных дней.

Использование спрогнозированных или полученных экспериментальным способом значений водопотребления предпочтительно в какой-либо функциональной зависимости. Поскольку график водопотребления напоминает вид парабол со впадинами в промежутках времени с минимальным водопотреблением, то для аппроксимации значений водопотребления и дальнейших

исследований используется многочлен минимум второго порядка, коэффициенты которого определяются методом наименьших квадратов.

Количество участков, на которые разбивается график водопотребления, равно количеству точек с максимальным водоразбором (как правило (см. рисунки 1, 2 и 3) это количество не превышает двух). На рисунке 4 показан пример функции водопотребления для одного дня недели. Как видно из рисунка, график водопотребления разбит на два участка. Левая часть графика водопотребления (с 0 часов ночи до 11 часов дня) описывается многочленом третьего порядка, правая часть графика водопотребления (после 11 часов дня) описывается многочленом четвертого порядка. При этом погрешность аппроксимации не превышает 5 %.



Рисунок 4 – Функциональная зависимость водопотребления

3. Алгоритм определения оптимальных величин давлений на выходе многонасосных станций повышения давления (групп МНСПД, работающих в одной общей сети), при которых обеспечивается минимум энергетических затрат

Насосные агрегаты (НА), работающие в одной общей сети, могут быть расположены на значительном расстоянии друг от друга (рисунок 5).

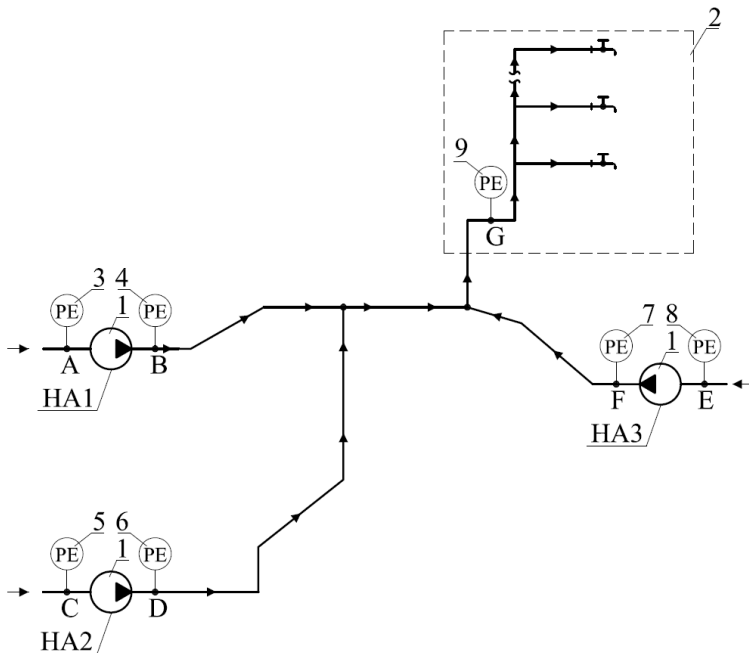


Рисунок 5 – Схема МНСПД с тремя удаленно расположенными насосными агрегатами. 1 – насосные агрегаты подачи воды потребителям (НА1, НА2 и НА3); 2 – конечный потребитель; 4, 6, 8 – аналоговые датчики давления, установленные перед насосными агрегатами поз. 1; 5, 7, 9 – аналоговые датчики давления, установленные после насосных агрегатов поз. 1; 9 – аналоговый датчик давления, установленный в диктующей точке G

Группа насосных агрегатов НА1, НА2 и НА3 (поз. 1) подает воду потребителям, расположенным в одной общей сети. Предположим, что для данного примера диктующей точкой является точка G, в которой установлен датчик давления (поз. 9).

Для данной сети водоснабжения можно записать следующую систему уравнений

$$\begin{cases} p_{HA1} = p_G - p_A + \rho \cdot g \cdot (h_G - h_A) + f(Q_1); \\ p_{HA2} = p_G - p_C + \rho \cdot g \cdot (h_G - h_C) + f(Q_2); \\ p_{HA3} = p_G - p_E + \rho \cdot g \cdot (h_G - h_E) + f(Q_3). \end{cases} \quad (5)$$

где p_{HA1} – перепад давления (напор), который создаёт НА №1; p_{HA2} – перепад давления, который создаёт НА №2; p_{HA3} – перепад давления, который

создаёт НА №3; p_A, p_C, p_E и p_G – давление воды в точках А, С, Е и G, соответственно; h_A, h_C, h_E и h_G – высота над уровнем моря в точке А, С, Е и G, соответственно; $f(Q_1)$ – гидравлические потери на участке от точки А до точки G; $f(Q_2)$ – гидравлические потери на участке от точки С до точки G; $f(Q_3)$ – гидравлические потери на участке от точки Е до точки G; Q_1 – водопотребление в определённый момент времени на участке А-В-G; Q_2 – водопотребление в определённый момент времени на участке С-D-G; Q_3 – водопотребление в определённый момент времени на участке Е-F-G.

Суммарную полезную мощность НА данной системы запишем в следующем виде

$$\begin{aligned}
 N_{\Sigma} &= N_1 + N_2 + N_3 = p_{HA1} \cdot Q_1 + p_{HA2} \cdot Q_2 + p_{HA3} \cdot Q_3 = \\
 &= (p_G - p_A + \rho \cdot g \cdot (h_G - h_A)) \cdot Q_1 + f(Q_1) \cdot Q_1 + \\
 &+ (p_G - p_C + \rho \cdot g \cdot (h_G - h_C)) \cdot Q_2 + f(Q_2) \cdot Q_2 + \\
 &+ (p_G - p_E + \rho \cdot g \cdot (h_G - h_E)) \cdot Q_3 + f(Q_3) \cdot Q_3
 \end{aligned} \tag{6}$$

где N_{Σ} – суммарная полезная мощность НА; N_1, N_2 , и N_3 – полезная мощность НА №1, №2 и №3, соответственно.

Для определения минимума энергетических затрат определим условие минимума полезной мощности насосных агрегатов. Для этого найдем частные производные суммарной мощности от расходов в каждой ветви и приравняем нулю. После преобразований и предположения, что функция гидравлического сопротивления имеет квадратичный характер, получим следующую систему уравнений

$$\begin{cases} p_{HA1} = \frac{2}{3} [p_G - p_A + \rho \cdot g \cdot (h_G - h_A)], \\ p_{HA2} = p_{HA1} + \frac{2}{3} [p_A - p_C + \rho \cdot g \cdot (h_A - h_C)], \\ p_{HA3} = p_{HA1} + \frac{2}{3} [p_A - p_E + \rho \cdot g \cdot (h_A - h_E)]. \end{cases} \tag{7}$$

Решение системы уравнений (7) определяет оптимальные величины давлений, которые должны создавать МНСПД (или НА, как в нашем примере), при которых общая полезная мощность насосных агрегатов, а соответственно, и потребляемая электрическая мощность, будут минимальны.

Для нашего примера было предположено, что насосный агрегат НА1 является ведущим – он поддерживает давление в диктующей точке G, а остальные станции «подстраиваются» под давление на выходе насосного агрегата НА1, т.е. насосные агрегаты НА2 и НА3 являются ведомыми – давление на выходе насосных станций зависит от давления в точке В p_B , создаваемого насосным агрегатом НА1.

Аналогичные уравнения получены для систем с большим количеством МНСПД (НА), установленных в гидравлической сети, и в которых ведущий насосный агрегат отличен от первого.

Для МНСПД, у которой все НА расположены на одном уровне (на одной раме), а также давление на входе всех НА одинаково (все НА объединены общим коллектором), в соответствии с системой уравнений (7), получим следующую систему уравнений для определения оптимальных величин давлений, которые должны создавать НА

$$\begin{cases} p_{НАi} = \frac{2}{3}[p_G - p_A], \\ p_{НАi} = p_{НАi}. \end{cases} \quad (8)$$

где $p_{НАi}$ – перепад давления, который создаёт ведущий НА; p_G – давление воды в диктующей точке; p_A – давление воды перед ведущим НА; $p_{НАi}$ – перепад давлений, который создают ведомые НА.

Из уравнения (8) следует, что минимум энергетических затрат НА, расположенных на одной раме с общим входным коллектором, будет достигнут при условии равенства перепадов давлений, создаваемых НА.

4. Оптимизированный алгоритм управления многонасосными станциями повышения давления, который позволяет вывести МНСПД на режим работы с более высоким КПД

Процесс нахождения оптимального режима работы насосной станции включает следующие этапы:

- определение текущего расхода;
- прогнозирование водопотребления. На данном этапе система управления МНСПД проходит «обучение». Под «обучением» понимается процесс накопления в режиме реального времени данных водопотребления, на основе анализа которых, с помощью разработанного адаптивного способа прогнозирования водопотребления системой управления МНСПД определяется водопотребление на следующие промежутки времени;
 - определение рабочей точки МНСПД (расход Q и необходимый перепад H , который должен создать каждый НА, входящий в состав МНСПД, на всех режимах работы), а также частоты вращения каждого НА, при которой данные значения будут достигнуты;
 - определение КПД МНСПД для каждого режима работы;
 - выбор наиболее экономичного режима работы.

Разработанный оптимизированный алгоритм управления многонасосной станцией повышения давления включает в себя следующие действия:

а) ввод основных параметров насосной станции в систему управления МНСПД (параметры вводятся перед запуском насосной станции):

1) ввод основных параметров насосного агрегата: номинальная мощность двигателя $N_{НОМ}$, номинальный ток электродвигателя $I_{НОМ}$, коэффициент мощности $\cos \varphi$, номинальный КПД электродвигателя $\eta_{ДВ.НОМ}$, номинальная подача насосного агрегата $Q_{НОМ}$, номинальный напор насосного агрегата $H_{НОМ}$, максимальный напор насосного агрегата на закрытую задвижку (фиктивный напор) $H_{Ф}$, номинальный КПД насосного агрегата $\eta_{НА.НОМ}$;

2) ввод напорно-расходной характеристики насосного агрегата при номинальной частоте вращения;

3) ввод графика КПД насоса при номинальной частоте вращения;

4) ввод семейств графиков КПД электродвигателя насоса или параметров схемы замещения электродвигателя R_x, X_x, R_1, X_1, R'_2 и X'_2 ;

5) определение ведущего насосного агрегата.

Для комплектных насосных станций, выполненных на одной станине (несущей раме) с общим коллектором, ведущим насосным агрегатом может быть любой насосный агрегат;

б) запуск процесса «обучения» системы управления насосной станцией;

в) процесс «обучения» НЕ пройден:

1) ведущий насосный агрегат поддерживает необходимое давление в диктующей точке.

Давление поддерживается с помощью ПИД-регулятора, встроенного в систему управления МНСПД. При этом величина требуемого давления на выходе МНСДП постоянна и на основании СП 30.13330.2020 «Внутренний водопровод и канализация зданий» должна обеспечивать свободный напор (давление) на отметке наиболее высоко расположенного санитарного прибора в зоне системы водоснабжения не менее 20,0 м вод. ст.;

2) при недостаточности одного насосного агрегата (определяется по увеличению частоты ПЧТ выше частоты подключения дополнительного насосного агрегата и отклонению требуемого давления на выходе НС ниже нормы) подключается дополнительный насосный агрегат.

В случае подключения дополнительного насосного агрегата определяются оптимальные величины давлений, которые должны создать насосные станции (или насосные агрегаты), при которых полезная мощность, а соответственно и потребляемая электрическая мощность будут минимальны. Например, для трех насосной станции величины давлений определяются из следующей системы уравнений

$$\begin{cases} p_B = \frac{1}{3} p_A + \frac{2}{3} [p_G + \rho \cdot g \cdot (h_G - h_A)], \\ p_D = p_B + \frac{1}{3} (p_C - p_A) + \frac{2}{3} \cdot \rho \cdot g \cdot (h_A - h_C), \\ p_F = p_B + \frac{1}{3} (p_E - p_A) + \frac{2}{3} \cdot \rho \cdot g \cdot (h_A - h_E). \end{cases} \quad (9)$$

где p_A и p_B – давление воды до и после насосного агрегата НА1, соответственно; p_C и p_D – давление воды до и после насосного агрегата НА2, соответственно; p_E и p_F – давление воды до и после насосного агрегата НА3, соответственно; p_G – давление воды в диктующей точке; h_A , h_C , h_E и h_G – высота над уровнем моря в точке А, С, Е и G, соответственно;

3) при снижении частоты ПЧТ ниже частоты отключения дополнительного насосного агрегата отключается дополнительный насосный агрегат;

г) процесс «обучения» пройден:

1) ведущий насосный агрегат поддерживает необходимое давление в диктующей точке.

Давление поддерживается с помощью ПИД-регулятора, встроенного в систему управления МНСПД. Величина требуемого давления на выходе МНСДП постоянна и определяется аналогично пункту «в»;

2) в каждый последующий момент времени вычисляется количество оборотов (частота ПЧТ) насосного агрегата, требуемое для поддержания спрогнозированного напора и расхода;

3) определяется КПД насосного агрегата для спрогнозированного водопотребления для различных вариантов работы насосной станции.

КПД насосного агрегата определяется для следующих комбинаций работы насосной станции:

– работает только один насосный агрегат, поддерживая необходимое давление в заданной точке;

– работают несколько насосных агрегатов на одной частоте вращения, поддерживая необходимое давление в заданной точке;

– работают несколько насосных агрегата, при этом один насосный агрегат работает на изменяемой частоте вращения, поддерживая необходимое давление в заданной точке, остальные насосные агрегаты – на фиксированной частоте вращения (для случая с одним ПЧТ на группу НА);

4) Выбирается режим работы станции управления с максимальным КПД;

д) работа насосной станции при изменении режима водопотребления (например, при появлении новых потребителей).

Постоянно при работе НС после процесса «обучения» ведется контроль реального значения давления на выходе насосной станции. В случае уменьшения реального значения давления на выходе НС от требуемого более 10% и недостаточности производительности работающих насосных агрегатов в работу подключается дополнительный НА. Станция переходит на работу по стандартному алгоритму (пункт «в») до момента выравнивания спрогнозированного значения давления на выходе НС (определяется по соответствующему перепаду, который должен создать насосный агрегат) фактическому.

График работы насосной станции с учетом разработанного способа управления показан на рисунках 6 и 7.

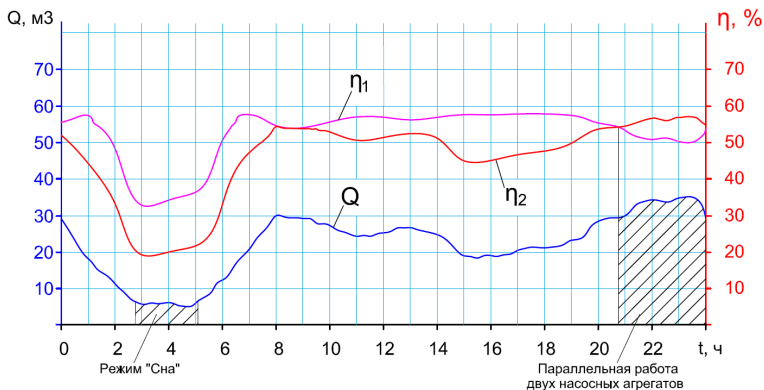


Рисунок 6 – График водопотребления и КПД насосной станции

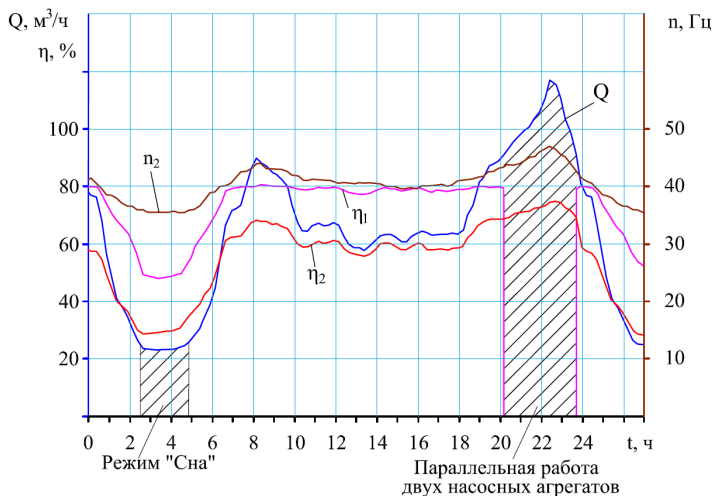


Рисунок 7 – График водопотребления и КПД насосной установки

На рисунке 6 показан график водопотребления (график Q) жилого дома г. Мытищи на ул. Юбилейная. По существующему способу управления для данной гидравлической системы в промежуток времени с 21 до 24 часов будет работать только один насосный агрегат. В случае применения нового способа управления в данный промежуток времени в работе будет находиться два насосных агрегата, работающие на одинаковой частоте вращения, поскольку КПД двух параллельно работающих насосов (график η_2) в промежуток времени с 21 до 24 больше, чем КПД одного насосного агрегата (график η_1).

На рисунке 7 показан аналогичный график водопотребления (график Q) микрорайона г. Мытищи на ул. Щербакова. Для данного случая в промежуток времени с 20 ч до 24 ч требуется подключение дополнительного насосного агрегата. При этом КПД двух насосных агрегатов, работающих параллельно на одинаковой частоте вращения (график η_2), меньше КПД одного насосного агрегата (график η_1), поэтому совместное время работы двух насосных агрегатов необходимо свести к минимуму. В отличие от существующего метода, отключение дополнительного насосного агрегата по разработанному алгоритму работы произойдет в районе 23 ч 45 мин, поскольку система управления «знает», что далее планируется снижение водопотребления и дальнейшая совместная работа двух насосных агрегатов не требуется. По существующему алгоритму работы, совместная работа насосных агрегатов продолжится, пока частота вращения насосных агрегатов (график η_2) не снизится меньше частоты отключения дополнительного насосного агрегата. Для данного примера частота отключения дополнительного насосного агрегата должна быть не менее 37 Гц, иначе дополнительный насосный агрегат никогда не отключится.

В таблице 1 показано недельное энергопотребление насосной станции при двух вариантах работы.

Таблица 1 – Недельное энергопотребление насосной станции при двух вариантах работы

Способ управления	Энергопотребление, кВт·ч	Водопотребление, м ³	Относительное энергопотребление, кВт·ч/м ³
Существующий	173,214	1886.9	0,09179
Разработанный	164.722	1907.3	0.08636

Новый способ управления многонасосной станции без каких-либо дополнительных затрат позволил снизить энергопотребление на 7%.

III. ОБЩИЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

1. Проведен анализ современных методов управления многонасосными станциями повышения давления. На текущий момент в современных алгоритмах управления насосными станциями учитываются только значение текущего давления на выходе МНСПД и текущая частота вращения насосного агрегата. При данном варианте работы не учитывается положение рабочей точки насосной станции, которая непосредственно влияет на режим работы МНСПД.

2. Проведен анализ существующих методов описания процессов водопотребления в течение суток для управления МНСПД. Анализ показал, что производительность МНСПД определяется на основании соответствующих

коэффициентов, которые являются величинами постоянными и не учитывают всего многообразия процессов водопотребления (сезонное изменение водопотребления, изменение количества потребителей и т.д.).

3. Определены параметры совместной работы группы насосных станций, позволяющие снизить общее энергопотребление многонасосными станциями. Задача сводится к определению значений давлений на выходе насосных станций (или насосных агрегатов), при которых потребляемая электрическая мощность будет минимальна. В частном случае, для насосной станции, у которой все насосные агрегаты одинаковые и расположены на одном уровне, минимум энергетических затрат при работе двух и более насосных агрегатов будет в случае одинаковой частоты вращения вала насосных агрегатов.

4. Разработана математическая модель, позволяющая на основе полученных статистических данных за прошлый промежуток времени (72 часа), провести прогнозирование дневного водопотребления на последующий день. В итоге ошибка прогнозирования суточного водопотребления в установившихся режимах водопотребления не превышает 8%. Для определения водопотребления используется регрессионная математическая модель прогнозирования.

5. На основе полученных результатов разработан оптимизированный способ управления насосными агрегатами, учитывающий не только уровень сигнала от датчика давления, но и изменение водопотребления (расхода). Данный способ позволяет в условиях реального времени изменять режим работы насосного агрегата с целью снижения энергопотребления насосной станции и системы водоснабжения.

6. Разработанный оптимизированный способ управления реализован на практике и применяется для управления МНСПД, что подтверждено соответствующими актами о внедрении. При этом новый способ управления многонасосной станцией без каких-либо дополнительных затрат позволил снизить энергопотребление на 7%.

IV. ОСНОВНЫЕ НАУЧНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

Научные статьи, опубликованные в ведущих рецензируемых научных изданиях, перечень которых размещен на официальном сайте Высшей аттестационной комиссии и приравненные к ним:

1. Барбул, М.Л. Современные средства расчета и контроля сетей водоснабжения / М.Л. Барбул // Инновации и инвестиции. – 2021. – №1. – С. 117-120;
2. Барбул, М.Л. Современные методы расчета сетей водоснабжения / М.Л. Барбул // Инновации и инвестиции. – 2021. – №2. – С. 137-140;
3. Барбул, М.Л. Способы повышения эффективности работы многонасосных станций с использованием средств автоматического контроля и управления / М.Л. Барбул, В.М. Васильев, Ю.Т. Котов, С.В. Староверов // С.О.К. – 2020. – № 3. – С. 16-19;

4. Барбул, М.Л. Определение рабочей точки насосного агрегата при наличии противодействия / М.Л. Барбул, Ю.Т. Котов // Естественные и технические науки. – 2016. – №10. – С. 152-159;

5. Котов, Ю.Т. Методика расчета сложных систем для передачи вязко-текущих сред / Ю.Т. Котов, М.Л. Барбул // Вестник Московского государственного университета леса – Лесной вестник. Вып. 4. – М.: МГУЛ. – 2014. – С. 198-205;

6. Барбул, М.Л. Прогнозирование водопотребления населением на основе авторегрессионной модели / М.Л. Барбул, С.В. Староверов // Энерго-безопасность и энергосбережение». – 2018. – №6. – С. 40-43;

7. Барбул, М.Л. Современные алгоритмы управления многонасосными станциями / М.Л. Барбул, С.В. Староверов, А.Ю. Феоктистов // Энергосбережение и водоподготовка. – 2018. – №5. – С. 9-15;

8. Барбул, М.Л. Способ управления многонасосными станциями с учетом текущего водопотребления / М.Л. Барбул, С.В. Староверов // Вестник Евразийской науки. [Электронный ресурс] /<https://esj.today/PDF/90SAVN518.pdf>/ Режим доступа: свободный. Загл. с экрана. Язык: рус., англ. – 2018. – №5. – С. 1-8;

Публикации в других изданиях:

9. Барбул, М.Л. Организация высокоскоростного канала передачи многопоточковой информации на основе асинхронной измерительной магистрали ввода-вывода / М.Л. Барбул, В.Г. Домрачев, В.М. Исаев, Е.Г. Комаров, Ю.Т. Котов // Измерительная техника. – 2014. – №6. – С. 25-29;

10. Барбул, М.Л. Определение гидравлических параметров в гидравлических системах с известными и неизвестными эксплуатационными параметрами / М. Л. Барбул, Ю.Т. Котов // Журнал научных публикаций аспирантов и докторантов. – 2016. – №9. – С. 85-87;

11. Барбул, М.Л. Организация связи и обработка данных с удаленных объектов. На примере объектов Мытищинского водоканала / М.Л. Барбул, Ю.Т. Котов // Сборник научных статей докторантов и аспирантов Московского государственного университета леса. Вып. 376. – М.: МГУЛ. – 2015. – С. 15–19.

Компьютерная верстка *М. В. Смирновой*

Подписано к печати 29.09.2021. Формат 60×84 ¹/₁₆. Бумага офсетная.

Усл. печ. л. 1,5. Тираж 120 экз. Заказ 17.

Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет.
190005, Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская, д. 4.

Отпечатано на МФУ. 198095, Санкт-Петербург, ул. Розенштейна, д. 32, лит. А.

