

УДК 621.3.07; 628.12
DOI: 10.24412/2658-4255-2021-2-81-104

Для цитирования:

Г.А. Палкин Оптимизация параметров функционирования электротехнического комплекса водоподъемных участков в арктических климатических условиях // Российская Арктика. 2021. № 13. С. 81–104. DOI: 10.24412/2658-4255-2021-2-81-104

Получена: 13.07.2021
Принята: 21.07.2021
Опубликована: 23.07.2021



Статья распространяется в полнотекстовом формате на условиях лицензии Creative Commons Attribution 4.0

ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА ВОДОПОДЪЕМНЫХ УЧАСТКОВ В АРКТИЧЕСКИХ КЛИМАТИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ

Г.А. Палкин¹ 

¹ ФГБОУ ВО «Забайкальский государственный университет», г. Чита, Россия; pala88@yandex.ru

Аннотация: В работе рассматривается вопрос оптимизации параметров электротехнического комплекса водоподъемных участков в сложных климатических условиях Арктики и аналогичных регионов. Целью оптимизации является минимизация капитальных и эксплуатационных затрат на этапах строительства и функционирования систем централизованного водоснабжения при обеспечении достаточного уровня безаварийности. Электротехнический комплекс водоподъемного участка системы водоснабжения является основным источником экономических затрат, а также наиболее уязвим для возникновения аварийных ситуаций, наиболее опасной из которых является замерзание трубопровода. Были выявлены ключевые параметры, влияющие на технико-экономическую эффективность данного объекта, и выполнена классификация существующих способов их изменения. Была разработана математическая и компьютерная оптимизационная модель для нахождения наилучших значений выбранных параметров. Модель применялась для расчета параметров электротехнического комплекса водоподъемного участка пгт. Новоорловск Забайкальского края.

Ключевые слова: водоснабжение, оптимизация, экономическая эффективность, трубопровод, защита от замерзания, сложные климатические условия

OPTIMIZATION OF THE ELECTRICAL COMPLEX FUNCTIONING PARAMETERS OF WATER-LIFTING AREAS IN ARCTIC CLIMATE CONDITIONS

G.A. Palkin¹ 

¹ FSBEI HE Transbaikal State University, Chita, Russia; pala88@yandex.ru

Abstract: The paper deals with the optimization of the electrical complex parameters of water-lifting areas in the difficult climatic conditions of the Arctic and similar regions. The aim of optimization is to minimize capital and operating costs at the stages of construction and functional of centralized water supply systems while ensuring a sufficient level of accident-free operation. The electrical complex of the water-lifting areas of the water supply system is the main source of economic costs, and also the most vulnerable to emergencies, the most dangerous of which is pipeline freezing. The key parameters affecting the technical and economic efficiency of this facility were identified, and the existing methods of changing them were classified. A mathematical and computer optimization model was developed to find the best values for the selected parameters. The model was used to calculate the parameters of the electrical complex of the water-lifting section of the urban settlement Novoorlovsk of the Zabaykalskiy kray.

Keywords: water supply, optimization, economic efficiency, pipeline, frost protection, difficult climatic conditions

Введение и актуальность

Освоение и заселение новых территорий является стратегической задачей в рамках экономического развития Российской Федерации (РФ). Осваивание арктической и субарктической материковых зон являются перспективным направлением решения данной проблемы. При этом, обеспечение приемлемых жилищно-бытовых и производственных условий является основой успешной реализации процесса колонизации новых территорий и повышения рентабельности уже освоенных. Одним из основных ресурсов, используемых населением и промышленными предприятиями, является вода. Соответственно, эффективная организация процесса водоснабжения расценивается как важнейший аспект жизнедеятельности человека.

При анализе динамики изменения общего количества существующих объектов централизованного водоснабжения за последние 10 лет по территориям Арктической зоны, а также субъектам РФ со сходными климатическими условиями (рисунок 1) [1], за последние два года отмечается резкая тенденция к снижению использования централизованных источников водоснабжения.

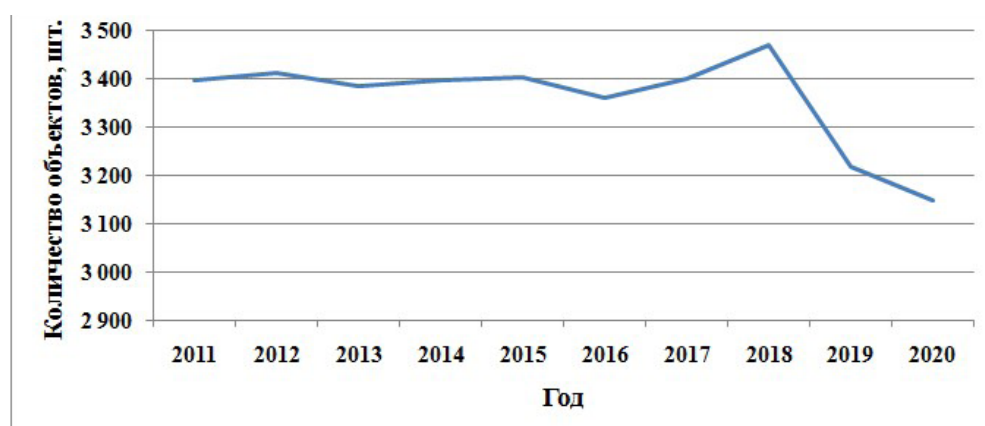


Рисунок 1 – Количество объектов централизованного водоснабжения.

Данная ситуация может свидетельствовать как об оттоке населения и ликвидации населенных пунктов, так и об ухудшении качества технического обеспечения процесса водоснабжения. Наибольшие темпы снижения прослеживаются в Камчатском крае, Республике Коми, Ямало-ненецком автономном округе, Иркутской области и Республике Бурятия (рисунок 2).

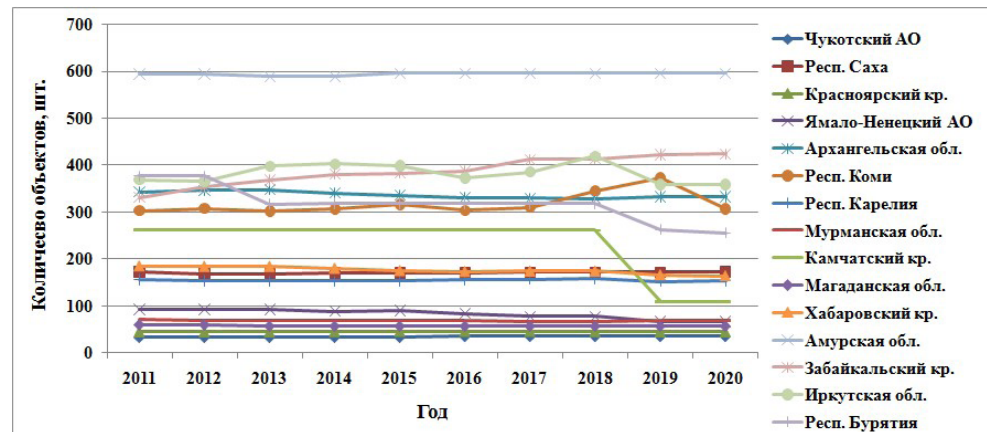


Рисунок 2 – Распределение объектов централизованного водоснабжения по субъектам РФ

Ряд субъектов Сибирского и Дальневосточного федеральных округов, рассмотренных в приведенной статистике, не относятся к Арктическим территориям РФ, тем не менее, имеют сходные природные условия, особенно в зимний период, что делает целесообразным их рассмотрение в рамках текущей работы. При этом под природными условиями понимаются не только температуры окружающей среды, но и особенности рельефа и почвы, такие как пересеченный ландшафт, болотистые местности и вечные мерзлоты. В данных по Красноярскому краю учитывались только территории Таймырского и Эвенкийского автономных округов.

Рассмотренные данные подчеркивают актуальность разработки мер повышения экономической эффективности существующих систем водоснабжения, эксплуатируемых в сложных природных условиях Арктики и аналогичных регионов. Что, в свою очередь, позволит повысить рентабельность существующих коммунальных и промышленных объектов, а также освободить ресурсы и разработать эффективные методики для освоения новых территорий. Основными направлениями повышения экономической эффективности является снижение капитальных строительных и эксплуатационных затрат, ресурсосбережение, минимизация износа и обеспечение безаварийной работы оборудования. Зачастую обособленное достижение одного из критериев эффективности может отрицательно сказаться на других. Например, снижение эксплуатационных затрат может привести к возникновению аварийных ситуаций, и наоборот. Поэтому необходимо выбрать наиболее важные параметры функционирования системы водоснабжения и определить их оптимальные значения.

Ключевым элементом любой системы водоснабжения является водоподъемный участок, на котором осуществляется забор воды из естественной среды с последующей передачей конечному потребителю. Основой водоподъемного участка является его электротехнический комплекс, обеспечивающий технологический процесс, и являющийся основным источником эксплуатационных затрат и аварийных ситуаций. Соответственно, целью работы является оптимизация

параметров функционирования электротехнического комплекса водоподъемных участков в сложных климатических условиях Арктики и аналогичных регионов.

Для достижения поставленной цели в текущей работе решались следующие задачи:

1. Рассмотрение структуры электротехнического комплекса типичного водоподъемного участка. Выбор ключевых параметров, влияющих на технико-экономическую эффективность данного объекта.
2. Анализ и классификация существующих способов изменения выбранных параметров с целью повышения экономической эффективности технологического процесса.
3. Определение методики нахождения оптимальных значений выбранных параметров.
4. Реализация оптимизационной модели при помощи компьютерного алгоритма.
5. Пробный расчет на примере электротехнического комплекса водоподъемного участка пгт. Новоорловск Забайкальского края.
6. Анализ результатов расчета, получение выводов по проделанной работе.

Материалы и методы исследования

Электротехнический комплекс водоподъемного участка (рисунок 3) состоит из: электроприводов скважинных или горизонтальных насосных агрегатов (N_1, \dots, N_n); трансформаторов; коммутационной и защитной аппаратуры; систем освещения, вентиляции и обогрева; иных вспомогательных потребителей. В состав электротехнического комплекса также следует включить неэлектрические элементы, напрямую связанные технологическим процессом с электрической частью,

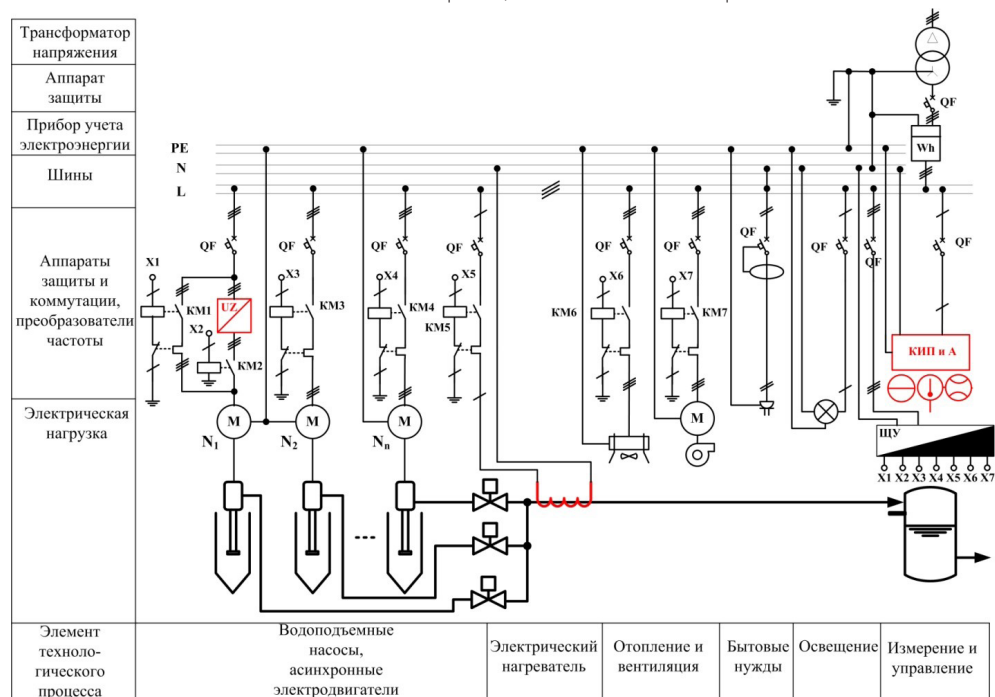


Рисунок 3 – Однолинейная схема электротехнического комплекса водоподъемного участка.

а именно: насосы, трубопроводную систему, накапливающий резервуар и конечного потребителя воды. Дополнительными элементами являются преобразователи частоты питающего напряжения, устройства для нагрева перекачиваемой воды, приборы контроля и автоматики.

Снижение затрат электроэнергии на питание электротехнического комплекса водоподъемных участков позволит уменьшить масштабы энергетических проблем Арктической зоны [2]. Основой технологического процесса и главным потребителем электрической энергии являются электроприводы насосных агрегатов. По нормативным расчетам на функционирование насосов приходится более 90% [3] общего энергопотребления на водоподъемных участках. Поэтому, большая часть неоправданных эксплуатационных затрат, потери ресурсов и преждевременного износа оборудования связаны как раз с неправильной эксплуатацией электроприводов насосных агрегатов. Ошибки проектирования системы водоснабжения, либо ограничения, накладываемые на условия её эксплуатации, приводят к завышенной производительности насосных агрегатов, что влечет за собой дополнительные затраты электроэнергии, растрату водных ресурсов за счет перелива из накопительного резервуара или слива воды из системы, а так же преждевременный износ узлов насоса и трубопроводной системы.

Косвенно оценить существующие масштабы потерь от переработки насосных агрегатов можно, проанализировав объемы утечки водных ресурсов по рассматриваемым территориям за 2019 год (рисунок 4) [4]. Общий объем утечки за данный период составил 251 131 670 м³, при общей добыче водных ресурсов в объеме 5 971 800 000 м³ [5]. Общий объем потерь составил 4.2%, что является достаточно высоким показателем. При этом, в некоторых субъектах величина потерь достигает 7% и более, а в Камчатском крае целых 17.2% (рисунок 5). Выявлено, что в некоторых системах водоснабжения суммарные затраты на переработку насосных агрегатов могут достигать 50% [6].

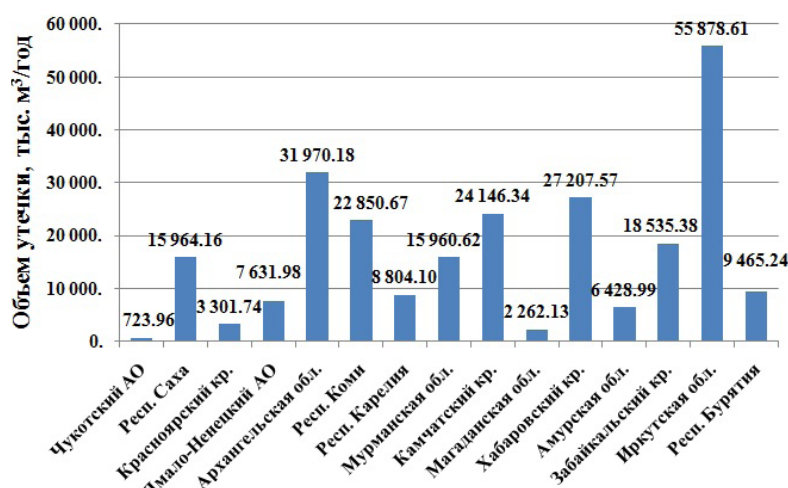


Рисунок 4 – Распределение величины утечек воды по регионам за 2019 год.

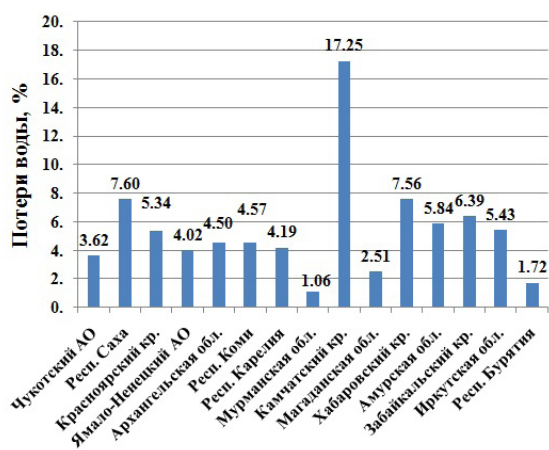


Рисунок 5 – Процент потерь воды по регионам за 2019 год.

Соответственно, минимизация переработки насосных агрегатов является важнейшим фактором повышения экономической эффективности при эксплуатации систем водоснабжения населенных пунктов и промышленных предприятий, находящихся на перспективных территориях РФ.

Очевидным способом минимизации переработки насосных агрегатов является поддержание их оптимальной производительности в зависимости от нужд потребителя или условий эксплуатации объекта путем автоматического управления. При этом основным параметром управления, подлежащим регулированию, является подача насоса, а обратной связью – уровень воды в резервуаре или давление в трубопроводе. Анализ работ в сфере регулирования подачи водоподъемных насосных агрегатов показал, что наиболее экономичным и технически эффективным методом изменения производительности насосов является частотное регулирование их электропривода [6]. В этом случае специальное устройство - преобразователь частоты (ПЧ, на рисунке 3 - UZ) - изменяет параметры питающего напряжения и, как следствие, крутящий момент и скорость вращения вала электропривода насоса, что, в свою очередь, обеспечивает требуемую величину подачи воды. В составе водоподъемного участка может присутствовать несколько насосных агрегатов, но ПЧ ставится только на один (рисунок 3), который называется основным. Остальные являются вспомогательными и подключаются на максимальной производительности в случае необходимости. Изменение подачи воды влияет на гидравлические и тепловые параметры системы, что может привести к возникновению аварийных ситуаций. Поэтому необходимым условием регулирования производительности насосных агрегатов является анализ условий эксплуатации объекта водоснабжения с последующим нахождением оптимальной величины подачи.

Аварийные ситуации на водоподъемных участках могут привести к значительным экономическим потерям и социальным проблемам. Наиболее распространенными аварийными ситуациями являются поломка насосного агрегата или выход из строя трубопроводной линии.

Предотвратить первый тип аварий возможно за счет обеспечения приемлемых режимов работы насосного оборудования с минимальной переработкой и плавными переходными процессами. Обеспечивается это также за счет частотного регулирования производительности насосов.

Второй тип аварий является более масштабным и сложно устранимым. В климатических условиях Арктики трубопровод крайне уязвим для замерзания. Зачастую ситуация усугубляется сложным ландшафтом и свойствами почвы, а также экономическими ограничениями на реализацию полноценных защитных мер. Динамика изменения общего количества трубопроводов на рассматриваемых территориях за последние 10 лет имеет отрицательную тенденцию (рисунок 6) [1], подобно количеству объектов водоснабжения.

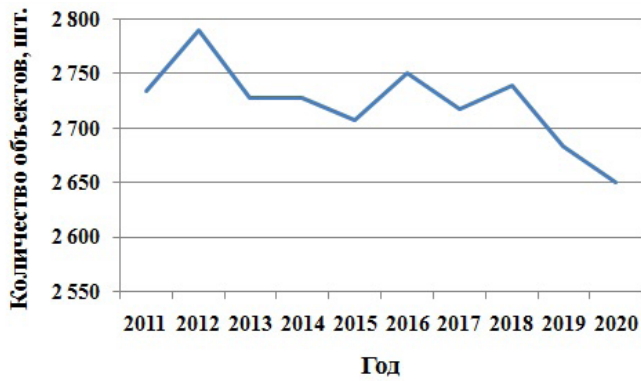


Рисунок 6 – Динамика изменения общего количества трубопроводов.

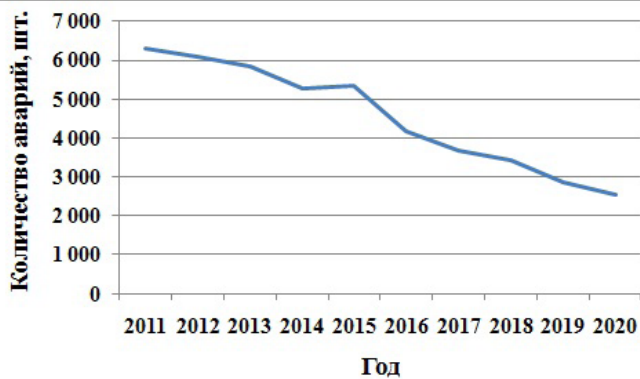


Рисунок 7 – Динамика изменения общего количества аварий трубопроводов.

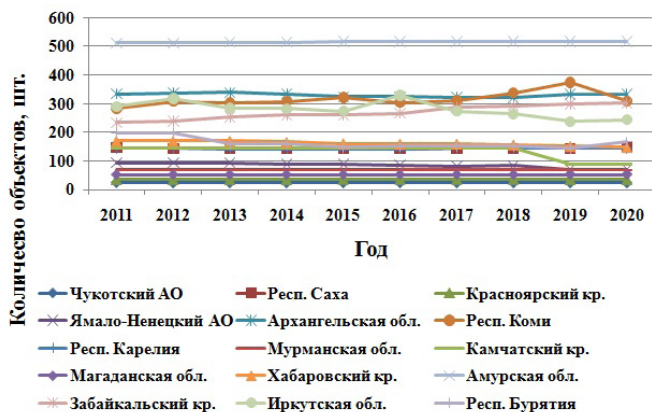


Рисунок 8 – Динамика распределения количества трубопроводов по регионам.

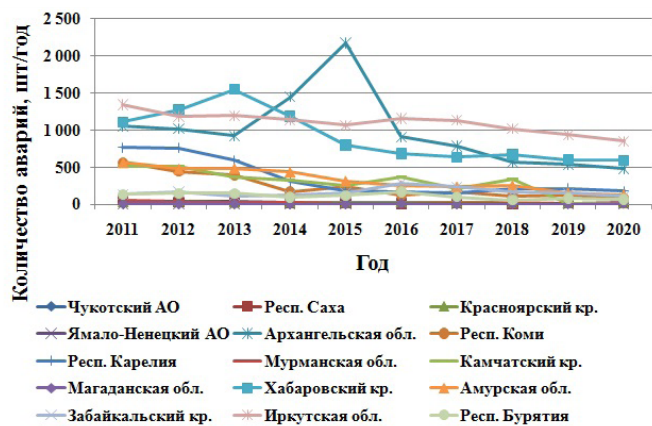


Рисунок 9 – Динамика распределения количества аварий трубопроводов по регионам.

Общее количество аварий на трубопроводе также снижается (рисунок 7) [7], но на более значительные величины (60% убыли количества аварий к 3% убыли общего количества трубопроводов), что говорит о повышенном внимании к данному вопросу и эффективности принимаемых мер.

Тем не менее, по ряду регионов соотношение количество аварий на трубопроводах к общему их количеству (рисунок 8) остается достаточно высоким. Наиболее аварийными являются Иркутская область, Хабаровский край и Архангельская область (рисунок 9). Северные районы сибирских регионов отличаются резкими изменениями климата в течении годового цикла, а также крайне сложными ландшафтными условиями эксплуатации трубопроводов, что ведет к их значительной аварийности.

Анализируя процентное соотношение количества аварий к общему числу трубопроводов по субъектам РФ за 2020 год (рисунок 10), можно сделать вывод о наличии проблем в данной сфере. Суммарная аварийность трубопроводов приближается к 100%, а в большинстве Арктических регионах находится в районе 20% и выше.

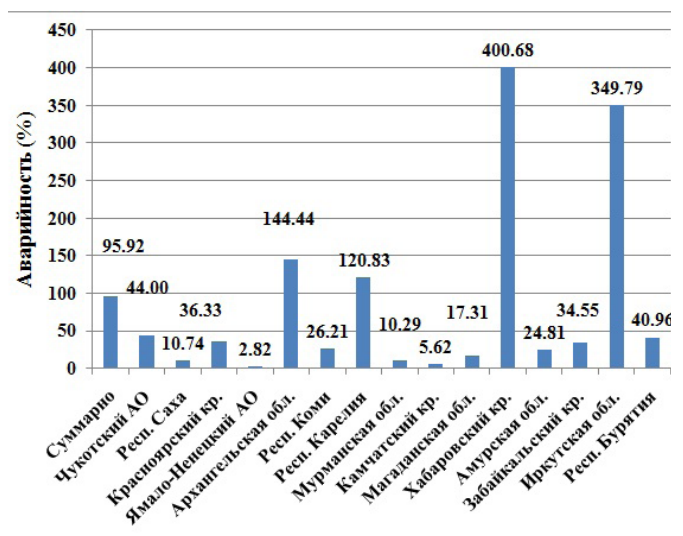


Рисунок 10 – Процент аварийности трубопроводов по регионам за 2020 год.

Проблемам защиты трубопроводов от замерзания посвящено значительное количество научно-технических работ, предложен ряд технологических решений [8-23]. На основании проанализированных источников была составлена классификация существующих способов защиты трубопроводов от замерзания (рисунок 11).

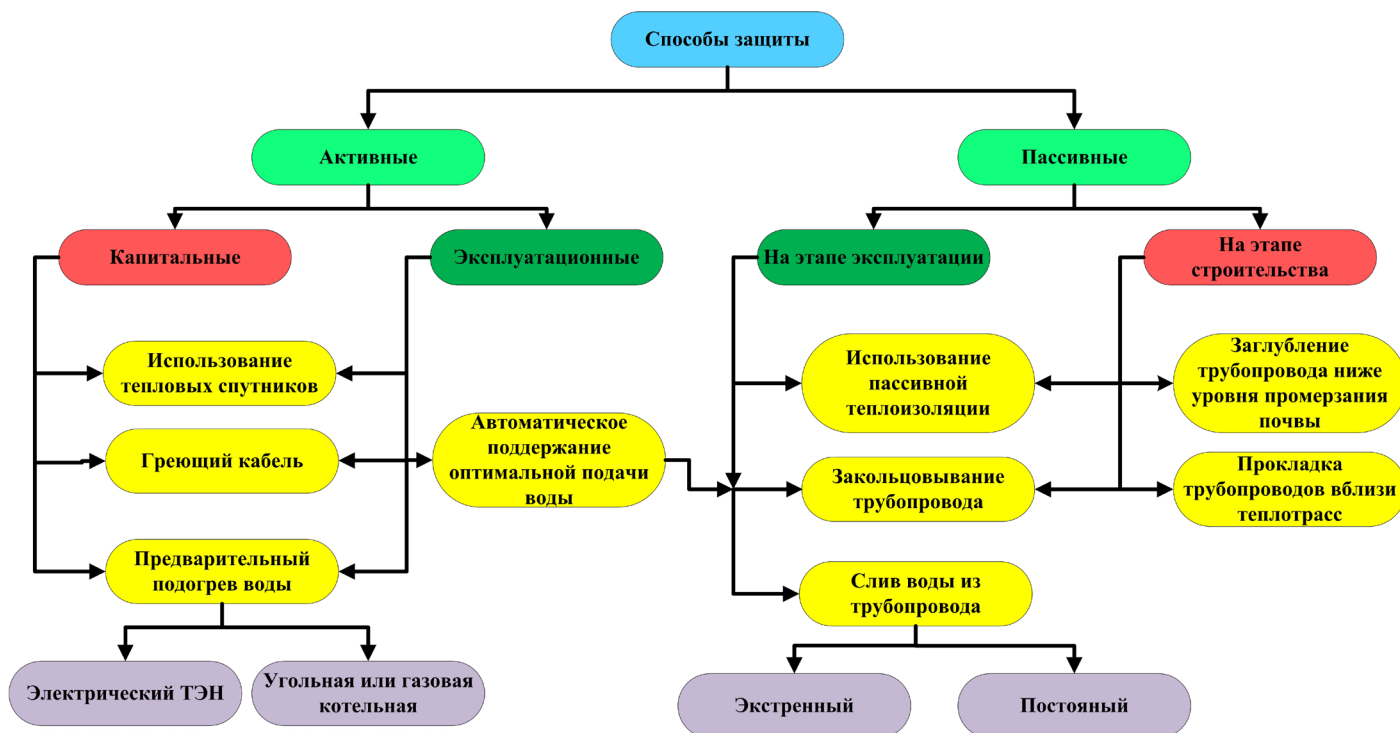


Рисунок 11 – Классификация способов защиты трубопроводов.

Способы защиты трубопровода делятся на активные и пассивные. В первом случае применяются дополнительные технические средства, обеспечивающие приемлемые тепловые параметры функционирования трубопровода. При этом могут задействоваться внешние источники тепла или иные механизмы стороннего воздействия на трубопровод, зачастую требующие регулярных дополнительных эксплуатационных затрат. Автоматическое поддержание оптимальной подачи воды, предотвращающей замерзание водовода, не требует серьезных капитальных вложений для реализации. В этом случае электропривод основного насоса снабжается преобразователем частоты и управляющим контроллером, который реализует алгоритм регулирования, минимизирующий переработку насосов и обеспечивающий достаточную циркуляцию жидкости [24]. Капитальные способы, такие как использование тепловых спутников (трубопровод малого диаметра с циркулирующим теплоносителем), установка греющего кабеля [14] либо иных, более эффективных, нагревательных элементов [25], а также предварительный подогрев воды [11, 13] требуют вмешательства в трубопроводную систему. Соответственно, их применение сопряжено с дополнительными монтажно-строительными работами.

Пассивные способы защиты основываются на минимальном вмешательстве в технологический процесс на этапе

эксплуатации объекта, но зачастую требуют серьезных капитальных затрат на реализацию. Некоторые способы, такие как заглубление трубопровода ниже уровня промерзания почвы [9] или прокладка водовода вблизи теплотрасс [10, 11] реализуемы только на этапе строительства объекта или его капитальной перепланировки. Пассивную теплоизоляцию желательно также устанавливать на этапе строительства, но в некоторых случаях, возможно её использование и на этапе эксплуатации объекта. Закольцовывание трубопровода требует наличия дополнительной возвратной трубы, которая может быть также проложена как при строительстве, так и на более поздних этапах. Слив воды из трубопровода является наиболее простым способом пассивной защиты и не требует серьезной модернизации водоподъемного участка. Слив может осуществляться как путем постоянного спуска воды из системы, так и за счет устройств автоматического опорожнения трубопровода при угрозе замерзания. Следует отметить, что при крайне низких температурах окружающей среды и низком водоразборе применение способа автоматического поддержания оптимальной подачи может сопровождаться сливом воды из системы, либо перекачкой воды по возвратному трубопроводу.

Строительство и эксплуатация трубопроводных систем в сложных природных условиях накладывает дополнительные ограничения на возможность применения и рентабельность рассмотренных способов защиты от замерзания. Вечная мерзлота и сложный рельеф местности делают непригодными заглубления трубопровода ниже уровня промерзания почвы [15], в этом случае предпочтение отдается наземной и надземной прокладке трубопроводов [16], что также упрощает поиск и ремонт аварийных участков. Прокладка трубопровода вблизи теплотрасс рентабельна только в населенных пунктах, где имеется централизованное теплоснабжение. На практике же водоподъемные участки зачастую находятся на значительном удалении от потребителя. Данные ограничения также справедливы при использовании тепловых спутников и греющего кабеля, поскольку эксплуатационные затраты для постоянного прогрева всего трубопровода окажутся слишком высокими. Закольцовывание трубопровода подразумевает серьезные дополнительные затраты на этапе строительства системы водоснабжения, а также требует постоянной циркуляции воды во избежание замерзания возвратной линии. Слив воды из системы реализуется достаточно просто, но влечет за собой неизбежную переработку насосных агрегатов нарушение технологического процесса передачи воды.

В итоге, наиболее рентабельным способом защиты является автоматическое поддержание оптимальной подачи воды. При этом оптимальная подача вычисляется таким образом, чтобы обеспечить защиту трубопровода от замерзания в текущих условиях эксплуатации, и, одновременно исключить или минимизировать переработку насосных агрегатов [17].

Как отмечалась ранее, в неблагоприятных условиях данный способ может сопровождаться переработкой насосных агрегатов. Отрицательные последствия данной проблемы уменьшаются путем использования дополнительных способов защиты трубопровода. Наилучшим решением при этом является применение пассивной теплоизоляции, поскольку данный способ не требует постоянных эксплуатационных затрат и реализуем как во время строительства трубопровода, так и на более поздних этапах. Современные технологии изготовления теплоизоляционных материалов позволяют получить требуемый эффект при небольших диаметрах изоляции и, соответственно, её себестоимости. Допустимо также и использование предварительного подогрева воды перед транспортировкой. При отсутствии котельной подогрев воды возможен при помощи электрических тэнов или небольшого участка греющего кабеля, входящих в состав электротехнического комплекса водоподъемного участка. Следует отметить, что предварительный подогрев воды будет рентабельным при условии правильного расчета требуемой температуры в начальной части трубопровода и её автоматическом поддержании.

Таким образом, приведенная комбинация способов защиты трубопровода от замерзания обеспечит максимальную экономическую эффективность объекта при минимальном риске возникновения аварийных ситуаций. Но для этого важно правильно подобрать параметры применяемых методик. Например, чрезмерный нагрев воды повлечет неоправданные затраты электрической либо тепловой энергии, а неправильно выбранная пассивная теплоизоляция – большие закупочно-монтажные затраты.

В качестве основных параметров, влияющих на тепловой режим работы трубопровода, следует выделить: подачу, предотвращающую замерзание воды; оптимальную толщину и материал теплоизоляции; оптимальную температуру воды в начальной части трубопровода. Данные параметры связаны уравнением теплового баланса (формула 1) [22], преобразованным для расчета температуры воды в конце трубопровода, как наиболее невыгодной точки системы.

$$t_k = t_n - \frac{\pi \cdot L \cdot (0.5 \cdot (t_n + t_k) - t_o)}{(R_{ia1} + R_{il_s} + R_{il_{is}} + R_{ia2}) \cdot Q_1 \cdot C_v}, \quad (1)$$

где t_n - температура воды в начале трубопровода (°C);
 t_o - температура окружающей среды (°C);
 t_k - температура воды в конце трубопровода (°C);
 L - длина трубопровода (м);
 Q_1 - объемная подача насоса или расход воды в трубопроводе (м³/с);
 C_v - объемная теплоемкость воды (Дж/м³°C);
 R_{ia1} - термическое сопротивление воды (м²K/Вт);

$R_{l_{\lambda_s}}$ - термическое сопротивление стенки трубы ($\text{м}^2\text{К}/\text{Вт}$);

$R_{l_{\lambda_s}}$ - термическое сопротивление изоляции ($\text{м}^2\text{К}/\text{Вт}$);

$R_{l_{a_2}}$ - термическое сопротивление воздуха ($\text{м}^2\text{К}/\text{Вт}$).

Термическое сопротивление воды рассчитывается по формуле 2:

$$R_{l_{a_1}} = \frac{d_1^{0.8}}{1755 \cdot Q_1^{0.8}}, \quad (2)$$

где d_1 - внутренний диаметр трубопровода (м).

Термическое сопротивление стенки трубы рассчитывается по формуле 3:

$$R_{l_{\lambda_s}} = \frac{1}{2 \cdot \lambda_m} \cdot \ln \frac{d_2}{d_1}, \quad (3)$$

где λ_m - коэффициент теплопроводности стенки трубы ($\text{Вт}/\text{м} \cdot ^\circ\text{C}$);

d_2 - внешний диаметр трубопровода (м).

Термическое сопротивление изоляции рассчитывается по формуле 4:

$$R_{l_{\lambda_{IS}}} = \frac{1}{2 \cdot \lambda_u} \cdot \ln \frac{d_3}{d_2}, \quad (4)$$

где λ_u - коэффициент теплопроводности слоя изоляции ($\text{Вт}/\text{м} \cdot ^\circ\text{C}$);

d_3 - внешний диаметр трубопровода со слоем изоляции (м).

Термическое сопротивление воздуха рассчитывается по формуле 5:

$$R_{l_{a_2}} = \frac{1}{0.32 \cdot \left(\frac{w \cdot d_3}{(13.248 + 0.0827 \cdot t_o + 5 \cdot 10^{-5} \cdot t_o^2) \cdot 10^{-6}} \right)^{0.63} \cdot (0.0244 + 8 \cdot 10^{-5} \cdot (-t_o))}, \quad (5)$$

где w - скорость ветра (м/с).

Принимая t_k как известную константу и изменив знак равенства на « \leq » возможно использовать формулу 1 как основное ограничение оптимизационной модели.

Вторым важным ограничением является необходимость превышения напора насоса требуемого напора системы водоснабжения (формула 6).

$$Q_1 \geq \sqrt{\frac{H_c \cdot Q_n^2}{H_n - S \cdot Q_n^2}}, \quad (6)$$

где Q_n - номинальная подача насоса в данной конфигурации системы водоснабжения ($\text{м}^3/\text{с}$);

H_c - статический напор системы водоснабжения (м);

S - удельное сопротивление трубопровода ($\text{с}^2/\text{м}^6$) (формула 7) [26];

H_n - номинальный напор насоса (м).

$$S = \frac{8}{\pi^2 \cdot d_1^4 \cdot g} \cdot \left(\frac{L \cdot \lambda}{d_1} + LR \right), \quad (7)$$

где λ - коэффициент гидравлического сопротивления участка трубопровода, который может вычисляться различными способами (таблица 1) [26].

Таблица 1

Методы вычисления гидравлического сопротивления трубопровода

Формула	Условие
$\lambda = \frac{64}{Re}$	$Re < 2300$
Переходной режим	$2300 < Re < 4000$
$\lambda = \frac{0.3164}{Re^{0.25}}$	$4000 < Re < \frac{10 \cdot d_1}{\Delta}$
$\lambda = 0.11 \cdot \left(\frac{\Delta}{d_1} + \frac{68}{Re} \right)^{0.25}$	$\frac{10 \cdot d_1}{\Delta} < Re < \frac{560 \cdot d_1}{\Delta}$
$\lambda = 0.11 \cdot \left(\frac{\Delta}{d_1} \right)^{0.25}$	$Re > \frac{560 \cdot d_1}{\Delta}$

где Δ - шероховатость трубопровода (м);

LR - общее сопротивление нелинейных участков трубопровода, определяемое экспериментально или при помощи таблиц для каждой конкретной конфигурации;

Re - число Рейнольдса (формула 8).

$$Re = \frac{4 \cdot Q_1}{\pi \cdot \nu \cdot d_1}, \quad (8)$$

где ν - кинематическая вязкость воды ($\text{м}^2/\text{с}$).

Основная оптимизационная функция модели минимизируется по экономическим затратам на реализацию рассматриваемых способов защиты трубопровода от замерзания.

Для её получения необходимо отдельно рассмотреть методики расчета затрат на каждый способ. Оценить экономические затраты на поддержание расхода воды можно по формуле 9:

$$C_Q = C_{QS} + \sum_{i=0}^k \left(\frac{P_n}{Q_n} \cdot C_r \cdot k_f + C_w \right) \cdot (Q_{1i} - Q_{2i}), \quad (9)$$

где C_Q - стоимость поддержания температуры расходом за заданный интервал времени (руб.);

C_{QS} - капитальные затраты на установку элементов управления насосными агрегатами (руб.);

C_r - текущий тариф на электроэнергию (руб./кВт·ч);

k_f - коэффициент энергетических потерь при частотном регулировании (зависит от КПД электродвигателя и свойств частотного преобразователя);

Q_{2i} - текущий расход, требуемый для обеспечения нужд конечного потребителя ($\text{м}^3/\text{с}$);

P_n - номинальная мощность электродвигателя насоса (кВт);

C_w - стоимость кубометра воды (руб./ м^3);

k - количество исследуемых отсчетов.

Величины Q_{1i} и Q_{2i} задаются в виде векторов из k составляющих: Q_{2i} - на основании статистической информации по водопотреблению за исследуемый период; Q_{1i} рассчитывается по формуле 1.

Значения C_r могут изменяться в зависимости от времени суток, а k_f зависит от параметров питания электропривода насоса.

Для оценки стоимости подогрева воды используется формула 10:

$$C_t = C_{TS} + \frac{1.16 \cdot 10^{-6}}{\eta_k} \cdot \sum_{i=0}^k C_r \cdot C_u \cdot \rho \cdot Q_{1i} \cdot (t_n - t_i), \quad (10)$$

где C_t - стоимость подогрева воды, перекаченной за исследуемый период (руб.);

C_{TS} - капитальные затраты на установку нагревательных элементов (руб.);

η_k - КПД нагревательных элементов;

C_u - удельная теплоемкость воды (Дж/кг $^{\circ}\text{C}$);

ρ - плотность воды (кг/ м^3);

t_i - температура воды до подогрева ($^{\circ}\text{C}$).

По формуле 11 можно посчитать стоимость теплоизоляции:

$$C_I = C_{IS} + C_{CI} \cdot \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot L \cdot (d_3^2 - d_2^2), \quad (11)$$

где C_I - стоимость установки пассивной теплоизоляции (руб.);

C_{IS} - капитальные затраты на установку пассивной теплоизоляции (руб.);

C_{CI} - стоимость одного кубического метра выбранного изоляционного материала (руб.).

Тип изоляционного материала определяют величину коэффициента теплопроводности λ_{ij} , который связан с термическим сопротивлением слоя изоляции $R_{i\lambda_{IS}}$, вычисляемым по формуле 4. Целесообразно при расчете выполнять оптимизацию термического сопротивления по отношению теплопроводности материала к его толщине ($d_3 - d_2$). Это позволит определить наименьшую стоимость теплоизоляции.

В итоге, суммарная функция затрат C на реализацию предлагаемых методов и, одновременно, основная минимизируемая зависимость на статическом наборе внешних параметров, имеет вид:

$$C = C_{QS} \cdot \frac{(Q_1 - Q_2)}{(Q_1 - Q_2) + A} + C_{TS} \cdot \frac{(t_n - t)}{(t_n - t) + A} + C_{IS} \cdot \frac{(d_3 - d_2)}{(d_3 - d_2) + A} +$$

$$+ \left(\frac{P_n}{Q_n} \cdot C_r \cdot k_f + C_w \right) \cdot (Q_1 - Q_2) + \frac{1.16 \cdot 10^{-6}}{\eta_k} \cdot C_r \cdot C_u \cdot \rho \cdot Q_1 \cdot (t_n - t) +, \quad (12)$$

$$+ C_{CI} \cdot \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot L \cdot (d_3^2 - d_2^2) \rightarrow \min$$

где A - коэффициент коррекции, определяемый максимальным порядком капитальных затрат.

Рассматривая в качестве основных независимых переменных перерасход, величину предварительного нагрева воды, толщину, теплопроводность и стоимость теплоизоляции введем следующие обозначения:

$$\begin{cases} x_1 = Q_1 - Q_2, \\ x_2 = t_n - t, \\ x_3 = d_3 - d_2, \\ x_4 = \lambda_{ij}, \\ x_5 = C_{CI} \end{cases}, \quad (13)$$

Преобразовав формулы 1 и 12, а также добавив ограничения, получаем основную оптимизационную модель:

$$\begin{cases} C = \frac{C_{QS} \cdot x_1}{x_1 + A} + \frac{C_{TS} \cdot x_2}{x_2 + A} + \frac{C_{IS} \cdot x_3}{x_3 + A} + a \cdot x_1 + b \cdot x_2 \cdot (x_1 + Q_2) + c \cdot x_5 \cdot x_3 \cdot (x_3 + 2 \cdot d_2) \rightarrow \\ \rightarrow \min, \\ d \leq x_2 - \frac{e \cdot (0.5(t_k + x_2 + t) - t_o)}{\left(\frac{f}{(x_1 + Q_2)^{0.8}} + h + \frac{1}{2 \cdot x_4} \cdot \ln \frac{(x_3 + d_2)}{d_2} + \frac{1}{l \cdot (x_3 + d_2)^{0.63}} \right) \cdot (x_1 + Q_2)}, \\ Q_n - Q_2 \geq x_1 \geq \sqrt{\frac{H_c \cdot Q_n^2}{H_n - m \cdot \left(\frac{L \cdot \lambda}{d_1} + LR \right)}} - Q_2, \\ x_1, x_2, x_3 \geq 0, \\ x_2 + t \leq t_{\max}, \\ x_3 + d_2 \leq d_{\max}, \\ x_4 \in M_{x_4}; x_5 \in M_{x_5} \end{cases} \quad (14)$$

где t_{max} - максимально возможная для данного объекта температура воды перед транспортировкой (°C);

d_{max} - максимально возможный для данного объекта диаметр трубопровода с теплоизоляцией (м);

$a, b, c, d, e, f, h, l, m$ - постоянные коэффициенты (формула 15).

$$\left\{ \begin{array}{l} a = \frac{P_n}{Q_n} \cdot C_r \cdot k_f + C_w, \\ b = \frac{1.16 \cdot 10^{-6}}{\eta_k} \cdot C_r \cdot C_u \cdot \rho, \\ c = \frac{l}{4} \cdot \pi \cdot L, \\ d = t_k - t, \\ e = \frac{\pi \cdot L}{C_v}, \\ f = \frac{d_1^{0.8}}{1755} \\ h = \frac{l}{2 \cdot \lambda_m} \cdot \ln \frac{d_2}{d_1} \\ l = 0.32 \cdot \left(\frac{w}{(13.248 + 0.0827 \cdot t_o + 5 \cdot 10^{-5} \cdot t_o^2) \cdot 10^{-6}} \right)^{0.63} \cdot (0.0244 + 8 \cdot 10^{-5} \cdot (-t_o)), \\ m = \frac{8}{\pi^2 \cdot d_1^4 \cdot g} \cdot Q_n^2 \end{array} \right. \quad (15)$$

Коэффициенты теплопроводности и стоимость кубометра теплоизоляции задаются в виде конечных упорядоченных множеств, элементы которых связаны однозначным отображением типа «биекция» по соответствующим позициям (формула 16).

$$\left\{ \begin{array}{l} M_{x_4} = (x_{41}, x_{42}, x_{43}, \dots, x_{4i}, \dots, x_{4n}), \\ M_{x_5} = (x_{51}, x_{52}, x_{53}, \dots, x_{5i}, \dots, x_{5n}), \\ f : M_{x_4} \rightarrow M_{x_5}, \\ x_{5i} = R(x_{4i}) \end{array} \right. \quad (16)$$

Количество элементов множеств n определяется доступными типами теплоизоляционного материала.

Так же в модель могут быть добавлены дополнительные условия, запрещающие или ограничивающие применение некоторых способов защиты от замерзания.

Результаты

Разработанная оптимизационная модель была применена при расчете параметров электротехнического комплекса участка первого подъема функционирующей системы водоснабжения пгт. Новоорловск Забайкальского края для защиты от замерзания трубопровода. Были определены постоянные параметры данного объекта и окружающей среды, а также текущие финансовые показатели (таблица 2).

Таблица 2

Постоянные параметры объекта водоснабжения
пгт. Новоорловск.

№	Параметр	Значение	№	Параметр	Значение
1	L (м)	9 000	15	k_f	1.05
2	C_v (Дж/м ³ °С)	4210000	16	P_n (кВт)	32
3	d_1 (м)	0.256	17	C_w (руб./м ³)	0.336
4	d_2 (м)	0.273	18	C_{TS} (руб.)	800 000
5	λ_m (Вт/м·°С)	40	19	η_k	0.95
6	w (м/с)	0.01	20	C_u (Дж/кг°С)	4210
7	Q_n (м ³ /с)	0.01556	21	ρ (кг/м ³)	1000
8	H_c (м)	60	22	C_{IS} (руб.)	2 500 000
9	H_n (м)	100	23	A	0.000 0001
10	Δ (м)	1.2	24	t_{max} (°С)	30
11	LR	36	25	d_{max} (м)	0.6
12	ν (м ² ·с)	0.000001674	26	M_{x4} (Вт/м·°С)	{0.036 - стекловолокно, 0.03- полиуретан, 1.2 - почва}
13	C_{QS} (руб.)	200 000	27	M_{x5} (руб.)	(9000, 19308, 100)
14	C_r (руб./кВт·ч)	4.2	28	t_k (°С)	3

Изменяющиеся параметры были подобраны в соответствии с усредненными условиями функционирования рассматриваемого объекта в дневное и ночное время суток по сезонам года (таблица 3). Для каждой комбинации были рассчитаны значения оптимизируемых переменных и целевой функции.

Таблица 3

Изменяющиеся параметры
и оптимизируемые переменные.

№	Параметры			Функция и переменные					
	t_o (°С)	Q_2 (м ³ /с)	t (°С)	x_1 (м ³ /с)	x_2 (°С)	x_3 (м)	x_4 (Вт/м·°С)	x_5 (руб.)	C (руб.)
1	+21	0.01417	5	0	0	0	0.036	9000	0
2	+9	0.01278	5	0	0	0	0.036	9000	0
3	0	0.01325	4.5	0.0008276	0.0000002	0	0.036	9000	1000007.6
4	-4	0.01182	4.5	0.0023	0	0	1.2	100	1000021.1
5	-25	0.01139	3.5	0.0027	3.3386	0	0.036	9000	1003681.0
6	-35	0.00722	3.5	0.0069	5.1501	0	0.036	9000	1005715.5
7	-1	0.01258	4.0	0.0015	0	0	0.036	9000	1000013.8
8	-5	0.01199	4.0	0.0021	0.003	0	1.2	100	1000022.6

Вычисления оптимизируемых параметров выполнялось в математическом программном пакете MatLab при помощи стандартной функции многомерной нелинейной оптимизации *fmincon*. Программный код, описывающий основные элементы оптимизационной модели (формула 14) в алгоритмическом виде имеет следующий вид:

```
x0=[1,1,1];
Am=[-1,0,0; 0,-1,0; 0,0,-1; 1,0,0; 0,1,0; 0,0,1];
bm=[0;0;0;Qn-Q2;tmax-t;dmax-d2];
Aeq=[];
beq=[];
lb=[];
ub=[];
[x,y] = fmincon(@func,x0,Am,bm,Aeq,beq,lb,ub,@Limit)

function f = func(x)
global Cqs Cts Cis A a b c Q2 d2 x4 x5;
f=(Cqs*x(1))/(x(1)+A)+(x(2)*Cts)/(x(2)+A)+(Cis*x(3))/(x(3)+A)+a*x(1)+
b*x(2)*(x(1)+Q2)+c*x5*x(3)*
*(x(3)+2*d2);
end

function [c1,ceq1] = Limit(x)
global Q2 d2 x4 x5 d e tk t to f h l m Hc Qn Hn L d1 LR DI v;
c1(1)=d-x(2)+(e*(0.5*(tk+x(2)+t)-to))/((f/((x(1)+Q2)^0.8) + h +
log((x(3)+ d2)/d2)/(2*x4) + 1/(l*
*((x(3)+d2)^0.63)))*(x(1)+Q2));
Re = (4*(x(1)+Q2))/(pi*v*d1);
if Re<2300
    lam=64/Re;
end
if Re>=2300 & Re<4000
    lam=0;
end
if Re>=4000 & Re<(10*d1/DI)
    lam=0.3164/(Re^0.25);
end
if (10*d1/DI)>=4000 & Re<(560*d1/DI)
    lam=0.11*(DI/d1+68/Re)^0.25;
end
if Re>=(560*d1/DI)
    lam=0.11*(DI/d1)^0.25;
end
c1(2)=sqrt((Hc*Qn*Qn)/(Hn-m*(((lam*L)/d1)+LR)))-Q2-x(1);
ceq1=[];
end
```

При анализе полученных данных о значениях оптимизируемых переменных (таблица 3) было выявлено, что в исследуемых условиях эксплуатации рассматриваемого объекта водоснабжения наиболее рациональным методом защиты трубопровода от замерзания является поддержание необ-

ходимой подачи воды. В крайне неблагоприятных условиях окружающей среды необходим дополнительный предварительный подогрев воды. Ввиду большой протяженности трубопровода, установка дополнительной пассивной теплоизоляции влечет за собой серьезные капитальные расходы (земляные работы с привлечением спец. техники, монтаж изоляции), поэтому при расчете функции для почасовых затрат, данный метод не был выбран в качестве оптимального, не смотря на отсутствие эксплуатационных затрат. Дальнейшая интерпретация результатов расчетов оптимальных величин подачи (рисунок 12) и подогрева (рисунок 13), а также расчет почасовых эксплуатационных затрат на их поддержание в текущих условиях показали, что капитальные затраты на установку пассивной теплоизоляции могут окупиться только по истечении трех лет и более.

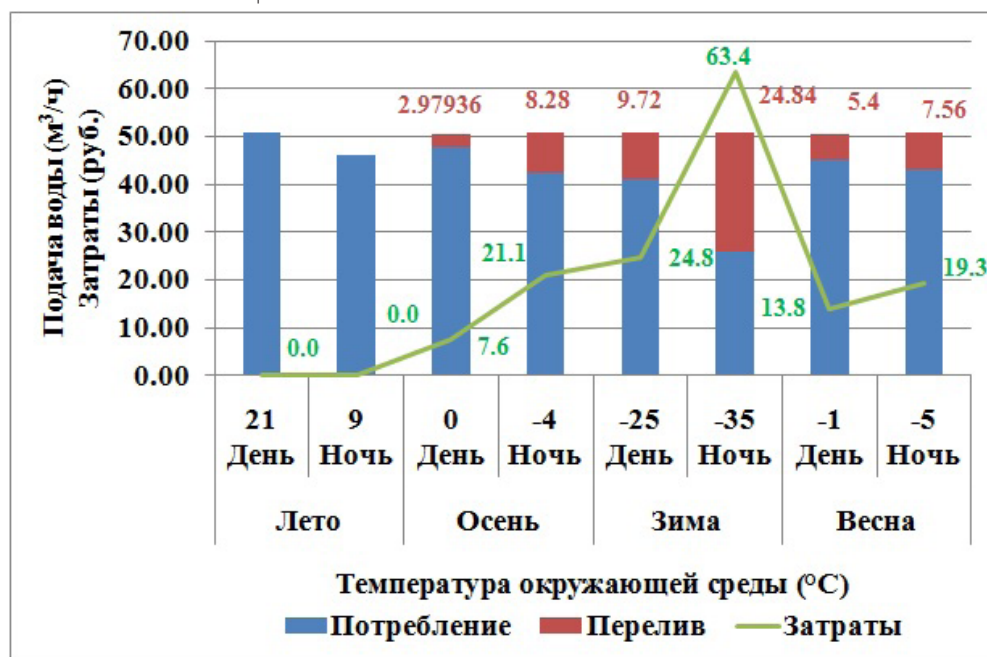


Рисунок 12 – Оптимальная подача и эксплуатационные затраты на её поддержание.

Величина общей подачи воды на всех рассматриваемых наборах входных данных поддерживается моделью в районе $50 \text{ м}^3/\text{ч}$ с небольшими отклонениями (рисунок 12), что является благоприятным условием для частотного регулирования электроприводов насосных агрегатов, поскольку данная величина незначительно отличается от номинальной подачи и её поддержание не будет оказывать отрицательного влияния на асинхронный электродвигатель насоса. При этом максимальный перелив воды будет наблюдаться при наименьших температурах окружающей среды (зимняя ночь). Величина перелива составляет практически 50%, поскольку разбор воды в данное время также является минимальным. Эксплуатационные затраты на переработку насосных агрегатов при данном уровне перелива составляет 68 рублей в час (за вычетом капитальных затрат), что, в целом, является допустимой величиной. Но, как видно из результатов, данной подачи не достаточно для обеспечения защиты трубопровода

от замерзания, и необходим также предварительный подогрев транспортируемой воды (рисунок 13).

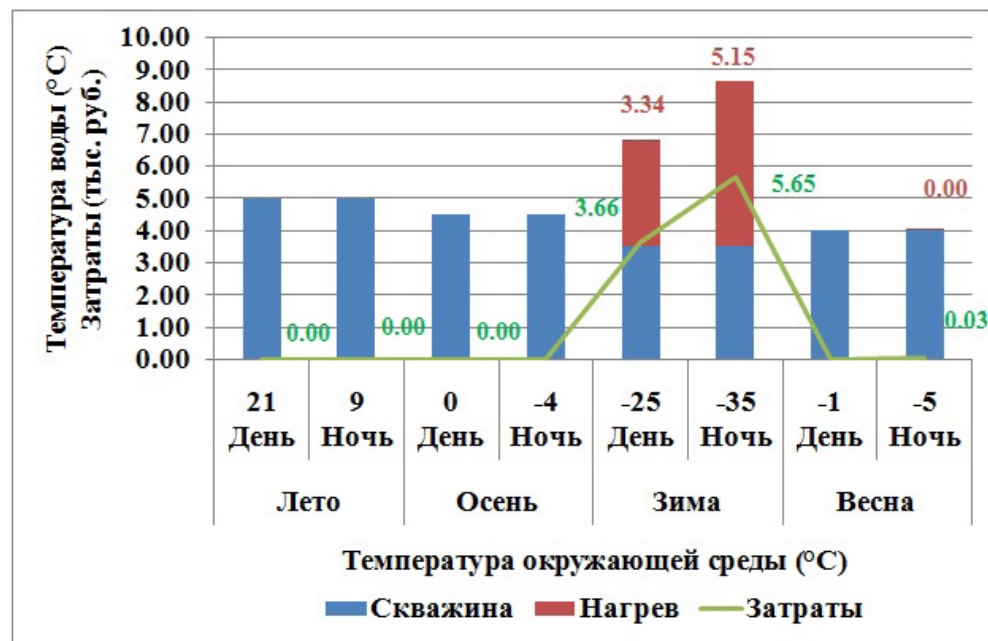


Рисунок 13 – Оптимальная температура и эксплуатационные затраты на её поддержание.

Величина начальной температуры воды при наиболее неблагоприятных условиях окружающей среды должна составлять 8.65 °C, при величине требуемого подогрева в 5.15 °C. При температуре окружающей среды -25 °C, начальная температура должна равняться 6.84 °C при подогреве в 3.34 °C. Также незначительный подогрев желателен в весеннее и осеннее время при температурах ниже -5 °C. Эксплуатационные затраты на реализацию подогрева уже достигают значительных величин. Стоимость нагрева проточной воды на 5 °C при текущей подаче превышает 5 тысяч рублей в час. Тем не менее, следует отметить, что подобные меры требуются лишь на непродолжительное время при особо низких температурах окружающей среды и малых величинах разбора воды. В остальных случаях защита от замерзания обеспечивается регулированием подачи с минимально возможным переливом.

Полученные результаты расчетов соответствуют реальным показателям эксплуатации рассматриваемого объекта водоснабжения и подтверждают возможность дальнейшего применения разработанной математической и компьютерной модели для оптимизации параметров и режимов работы электротехнического комплекса водоподъемных участков.

Заключение

В процессе выполнения работы были получены следующие результаты:

- выбраны ключевые параметры, влияющие на технико-экономическую эффективность электротехнического комплекса водоподъемных участков;
- составлена классификация существующих способов из-

менения выбранных параметров с целью повышения экономической эффективности и безаварийности рассматриваемого технологического процесса;

- определены методики нахождения оптимальных значений выбранных параметров, разработана оптимизационная математическая модель;

- разработанная оптимизационная модель реализована в виде программного алгоритма в математической среде MatLab;

- выполнен расчет электротехнического комплекса водоподъемного участка пгт. Новоорловск Забайкальского края.

По результатам расчета было выявлено, что наиболее экономичным, как с точки зрения капитальных, так и эксплуатационных затрат, является метод поддержания подачи воды, обеспечивающей приемлемые тепловые характеристики водопровода. При этом разработанная оптимизационная модель позволяет рассчитать минимально необходимую величину подачи, для минимизации переработки насосных агрегатов при небольшом водоразборе. В условиях крайне низких температур окружающей среды помимо поддержания подачи также требуется предварительный кратковременный подогрев воды, который влечет за собой более серьезные эксплуатационные затраты. Установка пассивной теплоизоляции на функционирующем трубопроводе большой протяженности имеет высокую стоимость, поэтому в краткосрочной перспективе была отклонена моделью.

При расчетах на более продолжительные временные интервалы, пассивная теплоизоляция может оказаться более предпочтительным способом. Также, при строительстве нового объекта водоснабжения капитальные затраты на теплоизоляцию будут значительно ниже, что обеспечит её преимущество над другими методами защиты трубопровода от замерзания.

В качестве перспектив развития проекта следует отметить необходимость разработки автономного программного продукта, обеспечивающего расчет модели по различным оптимизационным методикам, и обеспечивающий удобный ввод и вывод информации, что повысит качество практического применения результатов работы.

Список литературы:

1. Число объектов хозяйственно-питьевого централизованного водоснабжения. Доступно по: <https://www.fedstat.ru/indicator/37335> (дата обращения 30 июня 2021).
2. Змиева К. А. Проблемы энергоснабжения Арктических регионов // Российская Арктика. 2020. № 1(8). С. 5-14. URL: https://russian-arctic.info/upload/iblock/03e/VOLUME8_RUS.pdf (дата обращения 30 июня 2021).
3. Методические рекомендации по определению потребности в электрической энергии на технологические нужды в сфере водоснабжения, водоотведения и очистки сточных вод. М.: Центр Муниципальной Экономики и права, 2007. 16 с., ил.
4. Утечки и неучтенный расход воды (тысяч кубических метров, объем показателя за год). Доступно по: <https://www.fedstat.ru/indicator/34034> (дата обращения 30 июня 2021).

5. Ресурсы поверхностных и подземных вод, их использование и качество. Водный кадастр, ежегодное справочное издание 2019 год. Санкт-Петербург: ООО «Победа», 2020. 153 с., ил.
6. Palkin G., Suworov I. and Gorbunov R. Evaluation of Ways to Improve the Energy Efficiency of Sites of First Rise Supply Water Systems with Storage Tank by Laboratory Modeling, 2018 International Ural Conference on Green Energy (UralCon), Chelyabinsk, 2018, pp. 227-234, doi: 10.1109/URALCON.2018.8544369
7. Число аварий в системе водопровода. Доступно по: <https://www.fedstat.ru/indicator/34186> (дата обращения 30 июня 2021).
8. Самарин О.Д. Оценка скорости для предотвращения замораживания воды при движении в теплопроводах. Энергосбережение и водоподготовка. 2015. № 4 (96). С. 31-34.
9. Zhao J.Q. Thermal performance of trench backfills used for frost protection of water service lines / J.Q. Zhao, B.B. Rajani, L. Daigle // Canadian Geotechnical Journal. Ottawa: Canadian Science Publishing. 2001. Vol. 38. No. 1. pp. 161-174.
10. Reeve H.E. A study of the thermal field surrounding buried district heating pipes: thesis M.A.Sc / H.E. Reeve H.E. – Ottawa, 1997.
11. Акимов О.В. Оптимизация тепловых режимов водоводов п. Новый Ургал // Вестник Иркутского Государственного Технического Университета. 2010. № 2(42). С. 155-162.
12. Sepehr K, Goodrich L.E. Frost protection of buried PVC water mains in western Canada // Canadian Geotechnical Journal. Ottawa: Canadian Science Publishing. 1994, Vol. 31, No. 4, pp. 491-501.
13. Фаттахов И. Г. Предпосылки по использованию тепла сгорания попутного нефтяного газа для подогрева нагнетаемой воды в зимнее время // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. 2014. № 1. С. 61-65.
14. Система для обогрева трубопроводов "spyheat поток" // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. 2013. № 11 (178). С. 37.
15. Майны Ш.Б. Проблемы бесканальной прокладки трубопроводов в горных регионах (на примере республики Тыва) // Естественные и технические науки. 2014. № 7(75). С. 114-118/
16. Григорьев В.В., Захаров П.Е., Кондаков А.С., Ларионова И.Г. Расчет условий совместной прокладки трубопроводов надземным способом // Математические заметки СВФУ. 2017. Т. 24. № 3. С. 78-89.
17. Пат. 2593649С1 Российская Федерация МПК G05D 9/00, G05D 7/00, G05D 23/00 Способ регулирования уровня жидкости в емкости-сборнике и цифровая система для его осуществления / Г.А. Палкин, Р.В. Горбунов, И.Ф. Суворов, Д.А. Дейс; патентообладатель Заб. гос. ун-т. - №2015118302/28; заявл. 15.05.2015; опубл. 10.08.2016, Бюл. № 22. – 10 с.: ил.
18. Майны Ш.Б., Терехов Л.Д., Заборщикова Н.П. Методика определения минимальной глубины заложения начального участка канализационных трубопроводов в суровых климатических условиях // Вестник гражданских инженеров. 2016. № 3 (56). С. 116-122.
19. Фаттахов И.Г., Кадыров Р.Р. Определение границ незамерзания подводящих водоводов нагнетательных скважин с применением прикладного программирования // Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности. 2012. № 10. С. 39-43.
20. Терехов Л.Д., Акимов О.В., Акимова Ю.М. Назначение оптимальной толщины теплоизоляции водовода // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2009. № 3 (39). С. 180-183.
21. Терехов Л.Д. Водоснабжение и водоотведение в северных климатических условиях: учебное пособие / Л.Д. Терехов, О.В. Акимов, Ю.М. Акимова. Хабаровск: Изд-во ДВГУПС, 2008. 124 с.ил.
22. Цветков Ф.Ф. Задачник по теплообмену / Ф.Ф. Цветков, Р.В. Керимов, В.И. Величко. - 2-е изд., исправ. и доп. М.: Издательский дом МЭИ, 2008. 196 с., ил.
23. Китаев Д.Н., Котляров О.И., Монахов А.И. Экспериментальные исследования охлаждения жидкости в трубопроводах при отсутствии движения // Молодой ученый. 2017. № 21 (155). С. 131-133.

24. Palkin, G.; Suvorov, I. Simulation Modeling of First Rise Section of Water Supply System with Installed Complex of Automatic Pump Performance Control. *Machines* 2021. no 9. pp. 63. <https://doi.org/10.3390/machines9030063>
25. Махнёв Д.В., Змиева К. А. Об использовании ленты из аморфного сплава в качестве нагревательного элемента в системах обогрева и антиобледенения для Арктических территорий // *Российская Арктика*. 2020. № 1(8). С. 65-72. URL: https://russian-arctic.info/upload/iblock/03e/VOLUME8_RUS.pdf (дата обращения 30 июня 2021).
26. Лезнов Б. С. Частотно-регулируемый электропривод насосных установок, Москва: Машиностроение, 2013. 176 с.

References:

1. Chislo ob"ektov khozyaistvenno-pit'evogo tsentralizovannogo vodosnabzheniya [Number of objects of household and drinking centralized water supply]. Available at: <https://www.fedstat.ru/indicator/37335> (accessed 30.06.2021). (In Russian).
2. Zmieva K. A. Problemy energosnabzheniya Arkticheskikh regionov [PROBLEMS of energy supply in the arctic regions]. *Rossiyskaya Arktika* [Russian Arctic]. 2020. no 1(8). pp. 5-14. URL: https://russian-arctic.info/upload/iblock/03e/VOLUME8_RUS.pdf (accessed 30.06.2021). (In Russian).
3. Metodicheskie rekomendacii po opredeleniyu potrebnosti v elektricheskoy energii na tekhnologicheskie nuzhdy v sfere vodosnabzheniya, vodootvedeniya i ochistki stochnyh vod [Methodological recommendations for determining the need for electric energy for technological needs in the field of water supply, sanitation and wastewater treatment]. Moscow: Centr Municipal'noj Ekonomiki i prava [Center for Municipal Economics and Law], 2007. 16 p. (In Russian).
4. Utechki i neuchtennyi raskhod vody (tysyach kubicheskikh metrov, ob'em pokazatelya za god) [Leakage and unrecorded water consumption (thousand cubic meters, the value of the indicator for the year)]. Available at: <https://www.fedstat.ru/indicator/34034> (accessed 30.06.2021). (In Russian).
5. Resursy poverhnostnyh i podzemnyh vod, ih ispol'zovanie i kachestvo [Surface and underground water resources, their use and quality]. *Vodnyj kadastr, ezhegodnoe spravochnoe izdanie 2019* [Water Cadastre, annual reference publication 2019]. Sankt-Petersburg: OOO «Pobeda», 2020. 153 p. (In Russian).
6. Palkin G., Suvorov I. and Gorbunov R. Evaluation of Ways to Improve the Energy Efficiency of Sites of First Rise Supply Water Systems with Storage Tank by Laboratory Modeling, 2018 International Ural Conference on Green Energy (UralCon), Chelyabinsk, 2018, pp. 227-234, DOI: 10.1109/URALCON.2018.8544369
7. Chislo avarii v sisteme vodoprovoda [Number of accidents in the water supply system]. Available at: <https://www.fedstat.ru/indicator/34186> (accessed 30.06.2021). (In Russian).
8. Samarin O.D. Ocenka skorosti dlya predotvrashcheniya zamorazhivaniya vody pri dvizhenii v teploprovodah [Estimation of the speed to prevent freezing of water when moving in heat pipelines]. *Energoberezhenie i vodopodgotovka* [Energy saving and water treatment]. 2015. no 4 (96). pp. 31-34. (In Russian).
9. Zhao J.Q. Thermal performance of trench backfills used for frost protection of water service lines. J.Q. Zhao, B.B. Rajani, L. Daigle // *Canadian Geotechnical Journal*. Ottawa: Canadian Science Publishing. 2001. Vol. 38. No. 1. pp. 161-174.
10. Reeve H.E. A study of the thermal field surrounding buried district heating pipes: thesis M.A.Sc. H.E. Reeve H.E. – Ottawa, 1997.
11. Akimov O.V. Optimizaciya teplovyh rezhimov vodovodov p. Novyj Urgal [Optimization of thermal modes of water pipelines p. Novy Urgal]. *Vestnik Irkutskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta* [Bulletin

- of the Irkutsk State Technical University]. 2010. no 2(42). pp. 155-162. (In Russian).
12. Sepehr K, Goodrich L.E. Frost protection of buried PVC water mains in western Canada. *Canadian Geotechnical Journal*. Ottawa: Canadian Science Publishing. 1994, Vol. 31, No. 4, pp. 491-501.
 13. Fattahov I. G. Predposylki po ispol'zovaniyu tepla sgoraniya poputnogo neftyanogo gaza dlya podogreva nagnetaemoj vody v zimnee vremya [Prerequisites for using the combustion heat of associated petroleum gas for heating the injected water in winter]. *Geologiya, geofizika i razrabotka neftyanyh i gazovyh mestorozhdenij* [Geology, geophysics and development of oil and gas fields]. 2014. no 1. pp. 61-65. (In Russian).
 14. Sistema dlya obogreva truboprovodov "spyheat potok" [System for heating pipelines "spyheat stream"]. *Stroitel'nye materialy, oborudovanie, tekhnologii XXI veka* [Building materials, equipment, technologies of the XXI century]. 2013. no 11 (178). pp. 37. (In Russian).
 15. Majny SH.B. Problemy beskanal'noj prokladki truboprovodov v gornyh regionah (na primere respubliki Tyva) [Problems of channel-free pipeline laying in mountainous regions (on the example of the Republic of Tyva)]. *Estestvennye i tekhnicheskie nauki* [Natural and Technical Sciences]. 2014. no 7(75). pp. 114-118. (In Russian).
 16. Grigor'ev V.V., Zaharov P.E., Kondakov A.S., Larionova I.G. Raschet uslovij sovmestnoj prokladki truboprovodov nadzemnym sposobom [Calculation of conditions for joint laying of pipelines by an aboveground method]. *Matematicheskie zametki SVFU* [Mathematical notes of NEFU]. 2017. vol 24. no 3. pp. 78-89. (In Russian).
 17. Palkin G.A., Gorbunov R.V., Suvorov I.F. et al. Sposob regulirovaniya urovnya zhidkosti v emkosti-sbornike i tsifrovaya sistema dlya ego osushchestvleniya [A method for regulating the level of liquid in the collecting tank and a digital system for its implementation]. Patent RUS no 2593649. 10.08.2016. Byul. no 22. (In Russian).
 18. Majny SH.B., Terekhov L.D., Zaborshchikova N.P. Metodika opredeleniya minimal'noj glubiny zalozheniya nachal'nogo uchastka kanalizacionnyh truboprovodov v surovyh klimaticheskikh usloviyah [Methodology for determining the minimum depth of laying the initial section of sewer pipelines in harsh climatic conditions]. *Vestnik grazhdanskih inzhenerov* [Bulletin of Civil Engineers]. 2016. no 3 (56). pp. 116-122. (In Russian).
 19. Fattahov I.G., Kadyrov R.R. Opredelenie granic nezamerzaniya podvodyashchih vodovodov nagnetatel'nyh skvazhin s primeneniem prikladnogo programmirovaniya [Determination of the boundaries of non-freezing of the supply water pipelines of injection wells using applied programming]. *Avtomatizaciya, telemekhanizaciya i svyaz' v nefyanoj promyshlennosti* [Automation, telemechanization and communication in the oil industry]. 2012. no 10. pp. 39-43. (In Russian).
 20. Terekhov L.D., Akimov O.V., Akimova YU.M. Naznachenie optimal'noj tolshchiny teploizolyacii vodovoda [Appointment of the optimal thickness of the thermal insulation of the water pipe]. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of the Irkutsk State Technical University]. 2009. no 3 (39). pp. 180-183. (In Russian).
 21. Terekhov L.D. Vodopodabzhenie i vodootvedenie v severnyh klimaticheskikh usloviyah: uchebnoe posobie [Water supply and sanitation in northern climatic conditions: training manual]. L.D. Terekhov, O.V. Akimov, YU.M. Akimova. Habarovsk: DVGUPS, 2008. 124 p. (In Russian).
 22. Cvetkov F.F. Zadachnik po teplomassoobmenu [Taskbook on heat and mass transfer]. F.F. Cvetkov, R.V. Kerimov, V.I. Velichko. - 2nd ed., corrected. and add. Moscow:MEI, 2008. 196 p. (In Russian).
 23. Kitaev D.N., Kotlyarov O.I., Monahov A.I. Eksperimental'nye issledovaniya ohlazhdeniya zhidkosti v truboprovodah pri otsutstvii dvizheniya [Experimental studies of liquid cooling in pipelines in the absence of movement]. *Molodoj uchenyj* [Young Scientist]. 2017. no 21 (155). pp. 131-133. (In Russian).
 24. Palkin, G.; Suvorov, I. Simulation Modeling of First Rise Section of Water Supply System with Installed Complex of Automatic Pump Performance

- Control. Machines 2021. no 9. pp. 63. DOI:<https://doi.org/10.3390/machines9030063>
25. Mahnyov D.V., Zmieva K. A. Ob ispol'zovanii lenty iz amorfnogo splava v kachestve nagrevatel'nogo elementa v sistemah obogreva i antiobledeneniya dlya Arkticheskikh territorij [On the use of an amorphous alloy tape as a heating element in heating and de-icing systems for Arctic territories]. Rossijskaya Arktika [Russian Arctic]. 2020. no 1(8). pp. 65-72. URL: https://russian-arctic.info/upload/iblock/03e/VOLUME8_RUS.pdf (accessed 30.06.2021). (In Russian).
 26. Leznov B. S. Chastotno-reguliruemyj elektroprivod nasosnyh ustanovok [Frequency-controlled electric drive of pumping installations]. Moscow: Mashinostroenie [Mechanical Engineering], 2013. p. 176 (In Russian).