

Среднегодовые температуры воды в тепловых сетях криолитозоны

Д.Н. Китаев ¹ ✉, А.Р. Бохан ¹

¹ Воронежский государственный технический университет
ул. 20-летия Октября, д. 84, г. Воронеж 394006, Российская Федерация

✉ e-mail: dkitaev@cchgeu.ru

Резюме

Цель исследования. Для населенных пунктов, расположенных в криолитозоне на территории РФ, получить значения среднегодовых температур воды в тепловых сетях централизованных систем теплоснабжения отдельно для подающей и обратной магистрали при использовании проектных температур воды в диапазоне от 95 до 150°C с учетом современных климатических данных и показателей используемых отопительных приборов.

Методы. Для достижения поставленных целей использовались методы центрального качественного регулирования нагрузки потребителя тепловой энергии, основанные на уравнении теплового баланса. Для нахождения температур в точке излома температурного графика использовались численные методы решения уравнений. Для получения уравнения зависимости среднегодовой температуры воды в подающей магистрали тепловой сети использовались методы теории приближения функций алгебраическими полиномами. Для кластеризации населенных пунктов по критерию нахождения в криолитозоне и возможности использования централизованного теплоснабжения использовались методы анализа и синтеза.

Результаты. Получены среднегодовые значения температур воды для подающей и обратной магистралей тепловых сетей при использовании графиков центрального качественного регулирования с проектными температурами от 95 до 150°C с учетом значений среднемесячных наружных температур воздуха для населенных пунктов криолитозоны Российской Федерации.

Заключение. Рекомендуемые современными нормативами значения годовых температур воды для подающей магистрали тепловых сетей могут существенно отличаться от расчетных значений, полученных с учетом проектных температур воды, климатических характеристик района проектирования, особенностей организации закрытой системы теплоснабжения с целью обеспечения нормативных температур горячего водоснабжения. Получено квадратное уравнение, позволяющее с высокой точностью рассчитать проектную годовую температуру теплоносителя для подающего трубопровода в зависимости от реализуемого в системе теплоснабжения температурного графика для населенных пунктов, расположенных на территории криолитозоны.

Ключевые слова: теплоснабжение; криолитозона; тепловые сети; качественное регулирование; температура теплоносителя.

Конфликт интересов: Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Для цитирования: Китаев Д.Н., Бохан А.Р. Среднегодовые температуры воды в тепловых сетях криолитозоны // Известия Юго-Западного государственного университета. 2024; 28(1): 44-56. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2024-28-1-44-56>.

Поступила в редакцию 03.02.2024

Подписана в печать 05.03.2024

Опубликована 27.03.2024

Average Annual Water Temperatures in Heating Networks Cryolithozones

Dmitry N. Kitaev ¹ ✉, Anna R. Bohan ¹

¹ Voronezh State Technical University,
84, 20 Anniversary of October str., Voronezh 394006, Russian Federation

✉ e-mail: dkitaev@cchgeu.ru

Abstract

Purpose of research. For settlements located in the permafrost zone on the territory of the Russian Federation, obtain the values of average annual water temperatures in heating networks of centralized heating systems separately for the supply and return mains using design water temperatures in the range from 95 to 150 °C, taking into account modern climatic data and the indicators of the heating systems used devices.

Methods. To achieve the set goals, methods of central high-quality regulation of the load of the thermal energy consumer were used, based on the heat balance equation. To find the temperatures at the break point of the temperature graph, numerical methods for solving equations were used. To obtain an equation for the dependence of the average annual water temperature in the supply main of the heating network, methods of the theory of approximation of functions by algebraic polynomials were used. To cluster settlements according to the criterion of being in the permafrost zone and the possibility of using centralized heat supply, methods of analysis and synthesis were used.

Results. Average annual water temperatures for the supply and return lines of heating networks were obtained using central quality control schedules with design temperatures from 95 to 150°C, taking into account the values of average monthly outdoor air temperatures for settlements in the permafrost zone of the Russian Federation.

Conclusion. The values of annual water temperatures recommended by modern standards for the supply main of heating networks may differ significantly from the calculated values obtained taking into account the design water temperatures, climatic characteristics of the design area, and features of the organization of a closed heat supply system in order to ensure standard hot water supply temperatures. A quadratic equation has been obtained that makes it possible to calculate with high accuracy the design annual temperature of the coolant for the supply pipeline depending on the temperature schedule implemented in the heat supply system for settlements located in the permafrost zone.

Keywords: heat supply; cryolithozone; heating networks; quality regulation; coolant temperature.

Conflict of interest. The authors declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

For citation: Kitaev D.N., Bohan A. R. Average Annual Water Temperatures in Heating Networks Cryolithozones. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2024; 28(1): 44-56 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2024-28-1-44-56>.

Received 03.02.2024

Accepted 05.03.2024

Published 27.03.2024

Введение

Развитие арктической зоны является важным аспектом экономической и стратегической безопасности РФ. Повышение качества жизни на данной территории является неотъемлемой целью государственной политики, закрепленной в указе президента РФ [1, 2]. Существующее состояние объектов жилищно-коммунальной инфраструктуры городов, расположенных на арктической территории в значительной степени не удовлетворяет современным требованиям, а результатом этого является снижение темпов социально-экономического развития. В теплоснабжающих комплексах населенных пунктов арктической зоны большое внимание уделяется реконструкции и модернизации систем теплоснабжения [3, 4], что особенно актуально при низких проектных температурах наружного воздуха [5, 6]. В значительной части крупных северных городов используются централизованные системы теплоснабжения различной мощности. Необходимым при реконструкции систем теплоснабжения является обеспечение инженерных решений, соответствующих нормативам проектирования и учитывающих особенности климата рассматриваемых территорий [7, 8]. Важным вопросом является проектирование тепловой изоляции трубопроводов тепловых сетей [9-11], влияющих на технико-экономические показатели теплоснабжающих и тепло-

сетевых организаций [12, 13]. При ее расчете в качестве исходных данных часто пользуются рекомендуемыми значениями, не учитывающими климатические характеристики местности и особенности функционирования закрытых двухтрубных систем теплоснабжения с преобладающей отопительной нагрузкой, что особенно актуально для районов полярного региона [14, 15]. Как считают некоторые исследователи, такой подход может способствовать ошибкам проектирования [16-18].

В соответствии с действующими рекомендациями по проектированию тепловых сетей, при расчете тепловой изоляции температуры воды принимаются отдельно для подающих и обратных трубопроводов как среднегодовые и имеют различные значения. Рекомендуемые значения температуры теплоносителя в последней редакции свода правил были скорректированы по сравнению с предыдущей 2012 г. В настоящее время для подающего трубопровода при качественном регулировании для проектных температурных графиков 95, 105, 115, 130, 150, 180°C, рекомендуемые температуры воды за год составляют 65, 70, 75, 85, 90, 110°C соответственно. В предыдущих рекомендациях отсутствовали значения для 105 и 115°C, а также для температурных графиков 95 и 130°C были отличные значения, составляющие 55 и 65°C соответственно. В ряде современных рекомендаций в части расчета тепловой изо-

ляции трубопроводов также наблюдаются несоответствия. Например, ГОСТ 30732-2020 содержит рекомендации для двух температурных графиков с проектными значениями 95 и 150 °С, а свод правил по проектированию изоляции оборудования и трубопроводов рассматривает три значения годовой температуры для 95, 150 и 180 °С, совпадающие с СП по тепловым сетям. В современной нормативной литературе однозначна трактовка принятия значения среднегодовой температуры воды для обратных трубопроводов водяных сетей, составляющая 50 °С. Ввиду специфики регулирования централизованных тепловых сетей по температуре наружного воздуха и применения уравнений на основе теплового баланса транспортируемой, поступившей в систему отопления, отданной отопительными приборами энергии и теплопотерь здания, годовые значения температур воды в сети должны зависеть от климатических характеристик района проектирования [19-21]. Учет подобных факторов будет способствовать повышению точности инженерных расчетов и их качеству.

Материалы и методы

Для определения значений температур теплоносителя в водяных тепловых сетях в течение календарного года, использовались рекомендации приказа министерства энергетики РФ от 30.12.2008 «Об утверждении порядка определения нормативов технологических потерь при передаче тепловой энергии, теплоносителя». Искомое значение годовой

температуры определялось нахождением средневзвешенного значения по средним температурам воды в трубопроводе за каждый месяц года, определенных по соответствующему значению среднемесячной температуры наружного воздуха, с учетом продолжительности работы сети. Общая формула имеет вид

$$\tau_{\text{год}} = \frac{\sum_i^{12} (\tau_{ji} n_i)}{n_3 + n_d}, \quad (1)$$

где τ_{ji} – температура теплоносителя в j -й магистрали (подающая или обратная) сети при средней температуре наружного воздуха соответствующего i -го месяца года, °С; n_i – продолжительность работы сети в i -м месяце; n_3, n_d – продолжительность отопительного и неоперительного периода, соответственно.

На основе уравнения качественного регулирования, значение температуры теплоносителя в трубопроводе τ_{ji} ($j=1$ для подающего и $j=2$ для обратного трубопровода), при произвольной температуре наружного воздуха t_i определяется по известным отношениям с учетом преобладающего современного значения показателя n , учитывающего конкретный тип устанавливаемых отопительных приборов и схему подключения [11,12], с учетом средней температуры в отапливаемых помещениях t_b , имеет вид

$$\tau_{ji} = t_b + (\tau_{o.n} - t_b) \left(\frac{t_b - t_i}{t_b - t_0} \right)^{\frac{1}{1+n}} + (\tau_{j0} - \tau_{o.n}) \left(\frac{t_b - t_i}{t_b - t_0} \right), \quad (2)$$

где t_i – произвольная температура наружного воздуха, °C; t_0 – расчетная температура для проектирования отопления, °C; τ_{j0} – температура воды в j -й магистрали при t_0 , °C; $\tau_{o.п}$ – средняя температура воды в отопительном приборе, °C.

Климатические параметры принимались по последней редакции СП строительная климатология. При проведении расчетов учитывалась круглогодичная работа тепловой сети. Температура воды в неотапительный период в подающей магистрали принималась 70°C с целью обеспечения нормативных температур горячего водоснабжения у потребителей. В обратной магистрали рассматривалось два значения в неотапительном периоде $\tau_{2ноп} = 50$ и 55°C. В процессе расчета численным решением уравнения (2) находилось значение температуры наружного воздуха при температуре воды 70°C.

Расчеты проводились для населенных пунктов, расположенных в криоли-

тозоне. Был проведен анализ последней версии СП по строительной климатологии по отнесению населенных пунктов, указанных в нормативе, к территории криолитозоны. После чего из выборки были исключены населенные пункты с количеством населения менее 1000 человек, с временным проживанием людей, упраздненные на момент исследования. В итоге количество населенных пунктов составило 91. Для каждого населенного пункта были определены среднегодовые температуры теплоносителя для проектных температур воды в тепловой сети от 95 до 150 °C с шагом в 5°C.

Результаты и их обсуждение

В табл. 1 представлены результаты расчетов значений годовых температур воды в подающей магистрали сети $\tau_{1год}$ по каждой проектной температуре τ_{10} , °C, максимальные $\tau_{1год(макс)}$ и минимальные $\tau_{1год(мин)}$ значения, разница $\Delta = \tau_{1год(макс)} - \tau_{1год(мин)}$.

Таблица 1. Проектные значения температур воды для подающей магистрали

Table 1. Design values of water temperatures for the supply line

τ_{10} , °C/ τ_{10} , °C	95	100	105	110	115	120	125	130	135	140	145	150
Δ , °C/ Δ , °C	3,83	5,15	6,27	7,23	8,12	8,92	9,51	9,99	10,66	11,32	11,98	12,64
$\tau_{1год(макс)}$, °C/ $\tau_{1year(max)}$,	73,83	75,34	76,95	78,56	80,17	81,78	83,39	85,00	86,79	88,58	90,42	92,37
$\tau_{1год(мин)}$, °C/ $\tau_{1year(min)}$,	70,00	70,19	70,68	71,33	72,05	72,86	73,88	75,01	76,13	77,26	78,44	79,73
$\tau_{1год}$, °C/ τ_{1year} , °C	71,74	72,77	73,91	75,15	76,49	77,88	79,30	80,74	82,22	83,72	85,25	86,82

Для обратной магистрали получили следующие результаты: при $\tau_{2\text{ноп}} = 50^\circ\text{C}$, $\Delta = 5,24^\circ\text{C}$, $\tau_{2\text{год}}(\text{мин}) = 46,15^\circ\text{C}$, $\tau_{2\text{год}}(\text{макс}) = 51,39^\circ\text{C}$, $\tau_{2\text{год}} = 49,22^\circ\text{C}$; при $\tau_{2\text{ноп}} = 55^\circ\text{C}$, $\Delta = 6,11^\circ\text{C}$, $\tau_{2\text{год}}(\text{мин}) = 47,25^\circ\text{C}$, $\tau_{2\text{год}}(\text{макс}) = 53,36^\circ\text{C}$, $\tau_{2\text{год}} = 50,54^\circ\text{C}$.

На рис.1 представлены результаты расчетов годовых температур воды для обратной магистрали сети. Расчеты проводились для двух значений средних температур неотапительного периода 55°C (синий цвет) и 50°C (зеленый цвет). Представлены также средние значения температур (см. рис.1).

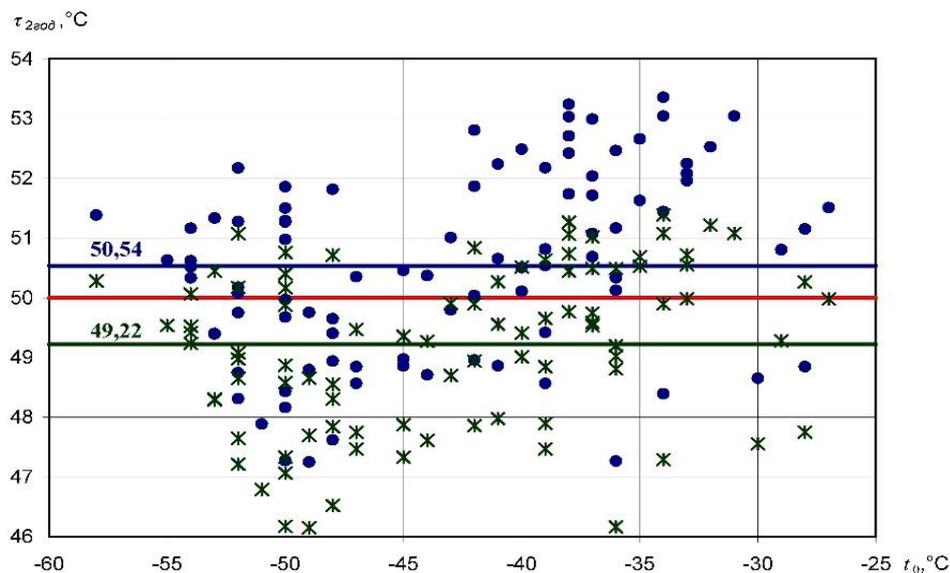


Рис. 1. Температуры воды в обратной магистрали

Fig. 1. Return water temperatures

Как показывают результаты расчетов (см. рис. 1), среднегодовые температуры в обратной магистрали тепловой сети в принятых условиях практически не отличаются от рекомендуемых нормативами в 50°C и разницу в $0,54$ и $0,78^\circ\text{C}$ нельзя назвать существенной. Тем не менее, разница между минимальным и максимальным значением в $5,24$ и $6,11^\circ\text{C}$ уже значительна, и способна повлиять на толщину изоляции при расчете.

На рис. 2 представлены значения годовых температур воды в подающей магистрали тепловой сети для проектных температур 150°C (синий цвет) и

115°C (зеленый цвет). На рис.2 представлены также осредненные значения температур. Красными линиями обозначены рекомендуемые нормативами значения для соответствующих температурных графиков.

Результаты расчетов (табл.1) и данные рис. 2 демонстрируют отличие рекомендуемых нормативами и полученных расчетами данных. Наблюдается тенденция увеличения разницы между минимальным и максимальным значениями годовой температуры воды для подающей магистрали Δ , $^\circ\text{C}$ с ростом проектных значений температурного графика.

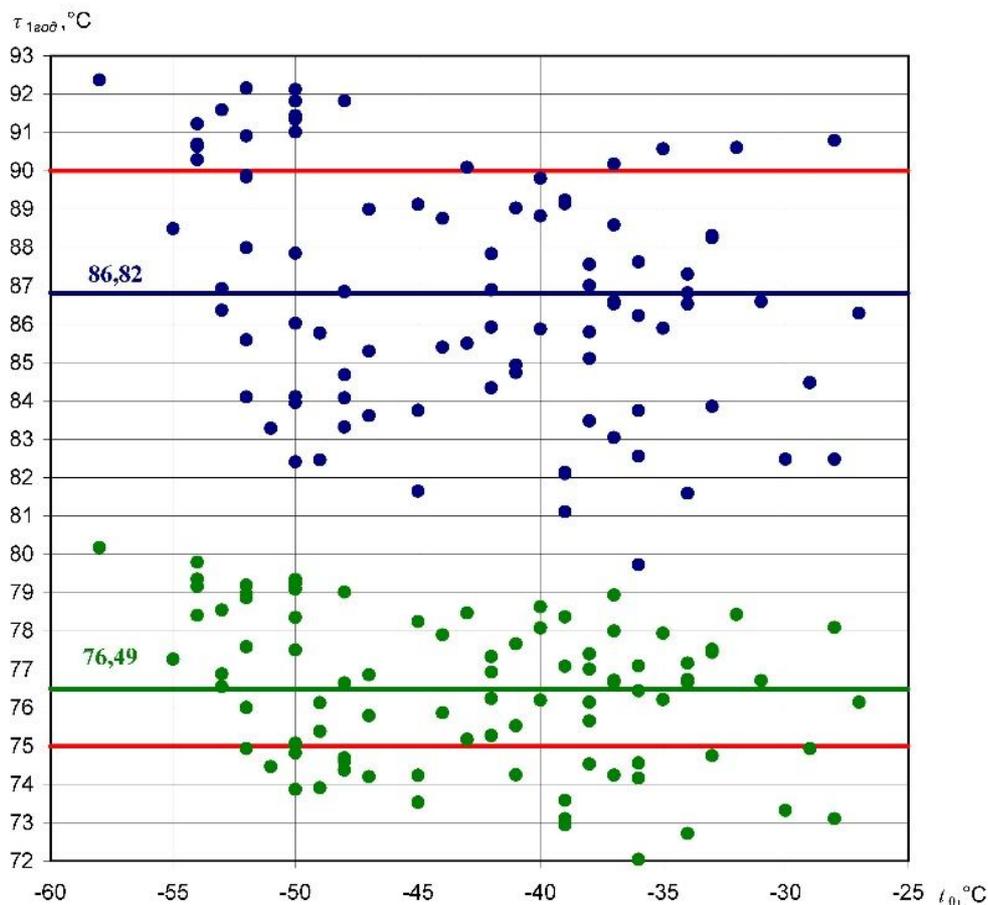


Рис. 2. Температуры воды в подающей магистрали для графиков 150/70 и 115/70

Fig. 2. Water temperatures in the supply line for schedules 150/70 and 115/70

Таким образом, для температурного графика 95/70 разница имеет значение $\Delta=3,83^{\circ}\text{C}$, для 115/70 $-\Delta=8,12^{\circ}\text{C}$ а для 150/70 $-\Delta=12,64^{\circ}\text{C}$. Максимальная разница между рекомендуемым нормативами значением среднегодовой температуры воды в сети и расчетным значением составляет $10,27^{\circ}\text{C}$ при температурном графике 150/70. При температурном графике 115/70 максимальная разница между рекомендуемой и расчетной температурой составляет $5,17^{\circ}\text{C}$ для поселка городского типа Усть-Нера, расположенного на востоке Якутии. Для этого же населенного пункта и Крест-Хальджай также находящегося в

Якутии, при температурном графике 95/70 разница будет составлять $8,83^{\circ}\text{C}$. Отсюда следует необходимость учета конкретных климатических условий местности для проектирования изоляции тепловых сетей.

На рис. 3 представлено сравнение полученных расчетных данных (синяя линия) и значений, рекомендуемых различными нормативами. Из рис. 3 следует, что расчетные значения и рекомендуемые различными нормативами совпадают (пересекаются) только в двух точках, которым соответствуют значения $\tau_{\text{год}} = 77,55^{\circ}\text{C}$ при $\tau_{10} = 118,82^{\circ}\text{C}$ и $\tau_{\text{год}} = 80,3^{\circ}\text{C}$ при $\tau_{10} = 128,7^{\circ}\text{C}$.

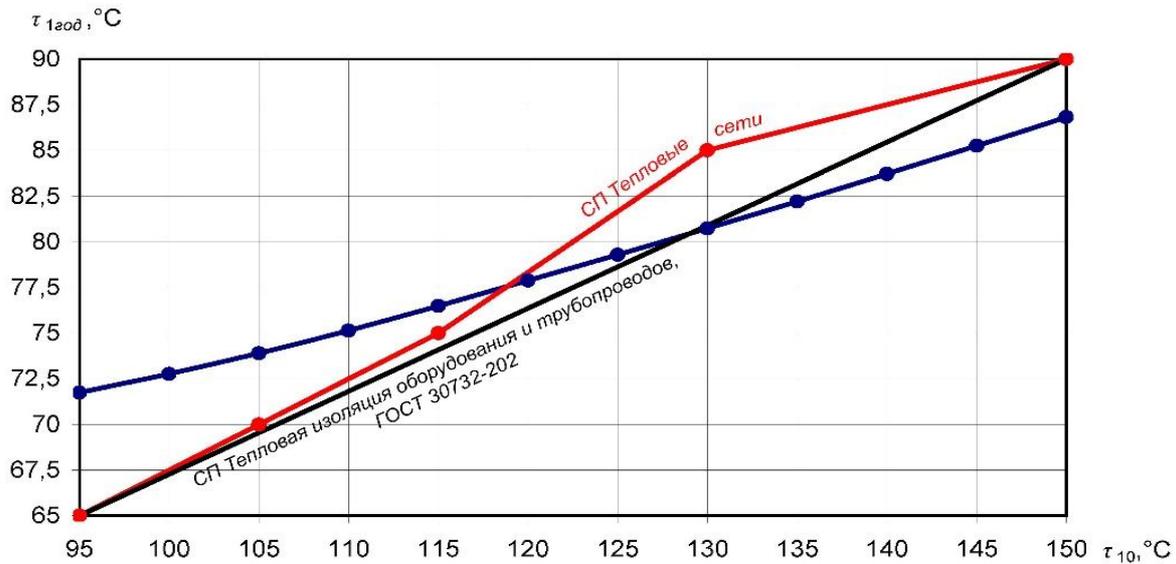


Рис. 3. Сравнение расчетных и рекомендуемых значений

Fig. 3. Comparison of calculated and recommended values

Наибольшая разница наблюдается при проектной температуре 95°C и имеет значение $6,74^{\circ}\text{C}$, при 105 – $3,91^{\circ}\text{C}$, а при 150 – $3,18^{\circ}\text{C}$. В области низких проектных температур воды, расчетные значения ниже рекомендуемых, а в области высоких – наоборот. Отсюда следует, что расчетная толщина изоляции в первом интервале будет получаться меньше, а во втором больше по сравнению с рекомендуемыми нормативами.

Получено уравнение, позволяющее со средним значением относительной ошибки $0,065\%$ рассчитать среднегодовую температуру теплоносителя в подающей магистрали тепловой сети в зависимости от проектной температуры, имеющее вид

$$\tau_{1\text{год}} = 0,000925\tau_{10}^2 + 0,050639\tau_{10} + 58,48. \quad (3)$$

Выводы

Полученные результаты исследований позволяют сделать следующие вы-

воды. Среднегодовые температуры воды в обратной магистрали тепловой сети в принятых условиях незначительно отличаются от рекомендуемых нормативами в 50°C , но для точных расчетов рекомендуется учитывать климатические данные, т.к. для некоторых населенных пунктов ошибка может составлять более 5°C .

Значения годовых температур воды в подающей магистрали тепловой сети, рассчитанные с учетом климатических особенностей арктической местности, могут существенно отличаться от рекомендуемых нормативами, как в большую, так и в меньшую сторону. Установлена тенденция увеличения разницы между максимальными и минимальными значениями расчетной температуры воды при возрастании проектных значений температурного графика от 95 до 150°C , составляющие соответственно $3,83^{\circ}\text{C}$ и $12,64^{\circ}\text{C}$.

Полученное квадратное уравнение, позволят с высокой точностью проводить расчеты годовых температур теплоносителя для подающей магистрали

тепловых сетей арктической зоны для температурных графиков с проектными температурами от 95 до 150°C.

Список литературы

1. Города азиатской арктики в условиях новых вызовов изменений климата и пандемии COVID-19 / А.Н. Пилясов, Н.Ю. Замятина, А.Е. Поляченко, Б.В. Никитин // Научный вестник Ямало-Ненецкого автономного округа. 2022. №2(115). С. 114-140. DOI:10.26110/ARCTIC.2022.115.2.007.
2. Оценка воздействия опасных криогенных процессов на инженерные объекты в арктике / В.И. Гребенец, Ф.Д. Юров, А.И. Кизяков, Л.И. Зотова, А.А. Маслаков, В.А. Толманов, И.Д. Стрелецкая // Вестник Российского фонда фундаментальных исследований. 2022. № 3-4 (115-116). С. 87-102. DOI:10.22204/2410-4639-2022-115-116-03-04-87-102.
3. Минин В.А. Характеристики источников теплоснабжения городов мурманской области // Труды Кольского научного центра РАН. 2019. Т.10. № 5-18. С. 5-19. DOI:10.25702/KSC.2307-5252.2019.5.5-19.
4. Биев А.А., Шпак А.В. Проблема мазутозависимости северного региона: ее особенности и возможные пути разрешения на примере мурманской области // Проблемы развития территории. 2016. №1(81). С. 65-78.
5. Влияние климатических условий на эффективность автоматического регулирования в системах централизованного теплоснабжения / Н.А. Драпалюк, М.С. Кононова, О.О. Андрияшкин, С.В. Божко // Жилищное хозяйство и коммунальная инфраструктура. 2020. №1(12). С. 54-61.
6. Кононова М.С., Воробьева Ю.А., А Забара.В. Влияние теплозащитных характеристик тепловой сети на температурный режим системы горячего водоснабжения // Жилищное хозяйство и коммунальная инфраструктура. 2020. № 4(15). С. 48-54.
7. Shan X., Wang P., Lu W. The reliability and availability evaluation of repairable district heating networks under changeable external conditions // Applied Energy. 2017. Т.203. Pp.686-695. DOI: 10.1016/j.apenergy.2017.06.081.
8. Influence of the layout of functional zones of cities on the development of heat supply systems / V.N. Mel'kumov, S.N. Kuznetsov, S.G. Tul'skaya, A.A. Chuikina // Russian Journal of Building Construction and Architecture. 2019. №2(42). Pp. 85-92. DOI:10.25987/VSTU.2019.42.2.009.
9. Расчет условий совместной прокладки трубопроводов надземным способом / В.В. Григорьев, П.Е. Захаров, А.С. Кондаков, И.Г. Ларионова // Математические заметки СВФУ. 2017. Т. 24. №3. С. 78-89. DOI 10.25587/SVFU.2018.3.10891.

10. Akhmetova I., Chichirova N., Derevianko O. Revisiting heat losses calculation at district heating network // International Journal of Civil Engineering and Technology. 2017. Т.8. №12. Pp 694-702.

11. Version of the solution of the problem of optimization of thickness of the heat-insulation layer in heat supply / N.A. Petrikeeve, D.M. Chudinov, Ye.A. Kopytina, O.A. Sotnikova // Russian Journal of Building Construction and Architecture. 2018. №4(40). Pp. 40-49.

12. Жутаева Е.Н., Давыдова Т.Е., Дубровская Т.Н. Оптимизация затрат предприятия (на примере исследования рынка теплоснабжения) // ФЭС: Финансы. Экономика. 2017. №5. С. 29-38.

13. Китаев Д.Н., Тульская С.Г., Мартыненко Г.Н. Влияние проектных среднегодовых значений температур воды в тепловой сети на стоимость изоляции // ФЭС: Финансы. Экономика. Стратегия. 2022. Т. 19. №6. С. 53-57.

14. Solving the multi-criteria optimization problem of heat energy transport / V. Melkumov, S. Tulskaaya, A. Chuykina, V. Dubanin // Advances in Intelligent Systems and Computing. 2021. Т. 1258. Pp 3-10. DOI:10.1007/978-3-030-57450-5_1.

15. Рафальская Т.А. Низкотемпературные режимы работы тепловых сетей при качественно - количественном регулировании // Новая наука: Теоретический и практический взгляд. 2016. №10(2). С. 141-143.

16. Воеводин А.Г. Анализ расчетов нормативных значений технологических потерь при передаче тепловой энергии по сетям систем теплоснабжения потребителей с целью снижения эксплуатационных затрат // Транспортные системы. 2016. №2. С.31-41. DOI:10.46960/62045_2016_2_31.

17. Басс М.С., Середкин А.А., Батухтин С.Г. Проблемы нормирования тепловых потерь в водяных тепловых сетях и котельных // Кулагинские чтения: техника и технологии производственных процессов. XVIII Международная научно-практическая конференция / отв. ред. А. В. Шапиева. Чита, 2018. С. 57-61.

18. Бадах В.Ф., Кузнецова А.Д. Расчет нормативных потерь тепла через изоляцию трубопроводов тепловых сетей // Техничко-технологические проблемы сервиса. 2011. №4(18). С. 60-72.

19. Панферов В.И., Панферов С.В. Об особенностях вывода уравнений регулирования систем централизованного теплоснабжения // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. 2016. Т. 16. №1. С. 21-30. DOI: 10.14529/ctcr160102.

20. Китаев Д.Н., Мартыненко Г.Н., Лобода А.В. Уравнения характерных значений температурных графиков // Научный журнал строительства и архитектуры. 2019. №3(55). С. 21-27. DOI 10.25987/VSTU.2019.55.3.002.

21. Смородова О.В., Китаев С.В., Усеев Н.Ф. Сравнительный анализ методов регулирования теплоснабжения // Norwegian Journal of Development of the International Science. 2018. №17-1. С. 54-58.

References

1. Pilyasov A.N. Goroda aziatskoj arktiki v usloviyah novykh vyzovov izmenenij klimata i pandemii COVID-19 [Cities of the Asian Arctic in the context of new challenges of climate change and the covid-19 pandemic]. *Nauchnyj vestnik Yamalo-Nenetskogo avtonomnogo okruga = Scientific Bulletin of the Yamalo-Nenets Autonomous Okrug*, 2022, no. 2(115), pp. 114-140. doi:10.26110/arctic.2022.115.2.007.
2. Grebenets V.I. et al. Ocenka vozdejstviya opasnykh kriogennykh processov na inzhenernye ob"ekty v arktike [Assessment of the impact of hazardous cryogenic processes on engineering objects in the Arctic]. *Vestnik Rossijskogo fonda fundamental'nyh issledovanij = Bulletin of the Russian Foundation for Basic Research*, 2022, no. 3-4 (115-116), pp. 87-102. doi:10.22204/2410-4639-2022-115-116-03-04-87-102.
3. Minin V.A. Harakteristiki istochnikov teplosnabzheniya gorodov murmanskoy oblasti [Characteristics of heat supply sources for cities in the Murmansk region]. *Trudy Kol'skogo nauchnogo centra RAN = Proceedings of the Kola Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*, 2019, vol. 10, no. 5-18, pp. 5-19. doi:10.25702/KSC.2307-5252.2019.5.5-19.
4. Biev A.A. Shpak A.V. Problema mazutozavisimosti severnogo regiona: ee osobennosti i vozmozhnye puti razresheniya na primere murmanskoy oblasti [The problem of fuel oil dependence of the northern region: its features and possible solutions using the example of the Murmansk region]. *Problemy razvitiya territorii = Problems of Territory Development*, 2016, no. 1(81), pp. 65-78.
5. Drapalyuk N.A., Kononova M.S., Andriyashkin O.O., Bozhko S.V. Vliyanie klimaticheskikh uslovij na effektivnost' avtomaticheskogo regulirovaniya v sistemah centralizovannogo teplosnabzheniya [The influence of climatic conditions on the efficiency of automatic regulation in centralized heating systems]. *Zhilishchnoe hozyajstvo i kommunal'naya infrastruktura = Housing and Communal Infrastructure*, 2020, no. 1(12), pp. 54-61.
6. Kononova M.S., Vorobyova Yu.A., Zabara A.V. Vliyanie teplozashchitnykh harakteristik teplovoj seti na temperaturnyj rezhim sistemy goryachego vodosnabzheniya [The influence of heat-protective characteristics of a heating network on the temperature regime of a hot water supply system]. *Zhilishchnoe hozyajstvo i kommunal'naya infrastruktura = Housing and Communal Infrastructure*, 2020, no. 4(15), pp. 48-54.
7. Shan X., Wang P., Lu W. The reliability and availability evaluation of repairable district heating networks under changeable external conditions. *Applied Energy*, 2017, vol. 203, pp. 686-695. doi: 10.1016/j.apenergy.2017.06.081.
8. Mel'kumov V.N., Kuznetsov S.N., Tul'skaya S.G., Chuikina A.A. Influence of the layout of functional zones of cities on the development of heat supply systems. *Russian Journal of Building Construction and Architecture*, 2019, no 2(42), pp. 85-92. doi:10.25987/VSTU.2019.42.2.009.

9. Grigoriev V.V., Zakharov P.E., Kondakov A.S., Larionova I.G. Raschet uslovij sovmestnoj prokladki truboprovodov nadzemnym sposobom [Calculation of conditions for joint laying of pipelines by overhead method]. *Matematicheskie zametki SVFU = Mathematical Notes of NEFU*, 2017, vol. 24, no 3, pp. 78-89. doi 10.25587/SVFU.2018.3.10891.
10. Akhmetova I., Chichirova N., Derevianko O. Revisiting heat losses calculation at district heating network. *International Journal of Civil Engineering and Technology*, 2017, vol.8, no. 12, pp. 694-702.
11. Petrikeeveva N.A., Chudinov D.M., Kopytina Ye.A., Sotnikova O.A. Version of the solution of the problem of optimization of thickness of the heat-insulation layer in heat supply. *Russian Journal of Building Construction and Architecture*, 2018, no. 4(40), pp. 40-49.
12. Zhutaeva E.N., Davydova T.E., Dubrovskaya T.N. Optimizaciya zatrat predpriyatiya (na primere issledovaniya rynka teplosnabzheniya) [Optimization of enterprise costs (based on the example of heat supply market research)]. *FES: Finansy. Ekonomika = FES: Finance. Economy*, 2017, no. 5, pp. 29-38.
13. Kitaev D.N., Tulskeya S.G., Martynenko G.N. Vliyanie proektnykh srednegodovykh znachenij temperatur vody v teplovoj seti na stoimost' izolyacii [The influence of the design average annual values of water temperatures in the heating network on the cost of insulation]. *FES: Finansy. Ekonomika. Strategiya = FES: Finance. Economy. Strategy*, 2022, vol. 19, no. 6, pp. 53-57.
14. Melkumov V., Tulskeya S., Chuykina A., Dubanin V. Solving the multi-criteria optimization problem of heat energy transport. *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 2021, vol. 1258. pp. 3-10. doi:10.1007/978-3-030-57450-5_1.
15. Rafalskaya T.A. Nizkotemperaturnye rezhimy raboty teplovykh setej pri kachestvenno - kolichestvennom regulirovanii [Low-temperature operating modes of heating networks with qualitative and quantitative regulation]. *Novaya nauka: Teoreticheskij i prakticheskij vzglyad = New science: Theoretical and practical view*, 2016, no. 10(2), pp. 141-143.
16. Voevodin A.G. Analiz raschetov normativnykh znachenij tekhnologicheskikh poter' pri peredache teplovoj energii po setyam sistem teplosnabzheniya potrebitel'ej s cel'yu snizheniya ekspluatacionnykh zatrat [Analysis of calculations of standard values of technological losses during the transfer of thermal energy through networks of heat supply systems for consumers in order to reduce operating costs]. *Transportnye sistemy = Transport Systems*, 2016, no. 2, pp.31-41. doi:10.46960/62045_2016_2_31.
17. Bass M.S., Seredkin A.A., Batukhtin S.G. [Problems of standardization of heat losses in water heating networks and boiler houses]. *Kulaginskie chteniya: tekhnika i tekhnologii proizvodstvennykh processov. XVIII Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferenciya* [Kulagin readings: equipment and technologies of production processes. XVIII International Scientific and Practical Conference], ed. by A. V. Shapieva. Chita, 2018, pp. 57-61 (In Russ.).

18. Badakh V.F., Kuznetsova A.D. Raschet normativnykh poter' tepla cherez izolyaciyu truboprovodov teplovykh setej [Calculation of standard heat losses through insulation of pipelines of heating networks]. *Tekhniko-tehnologicheskie problemy servisa = Technical and Technological Problems of Service*, 2011, no. 4(18), pp.60-72.

19. Panferov V.I., Panferov S.V. Ob osobennostyah vyvoda uravnenij regulirovaniya sistem centralizovannogo teplosnabzheniya [On the features of deriving equations for regulating centralized heating systems]. *Vestnik YUzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Komp'yuternye tekhnologii, upravlenie, radioelektronika = Bulletin of the South Ural State University. Series: Computer technologies, control, radio electronics*, 2016, vol. 16, no. 1, pp. 21-30. doi: 10.14529/ctcr160102.

20. Kitaev D.N., Martynenko G.N., Loboda A.V. Uravneniya harakternykh znachenij temperaturnykh grafikov [Equations of characteristic values of temperature graphs]. *Nauchnyj zhurnal stroitel'stva i arhitektury = Scientific Journal of Construction and Architecture*, 2019, no. 3(55), pp. 21-27. doi 10.25987/VSTU.2019.55.3.002.

21. Smorodova O.V., Kitaev S.V., Useev N.F. Sravnitel'nyj analiz metodov regulirovaniya teplosnabzheniya [Comparative analysis of heat supply regulation methods]. *Norwegian Journal of Development of the International Science*, 2018, no. 17-1, pp. 54-58.

Информация об авторах / Information about the Authors

Китаев Дмитрий Николаевич, кандидат технических наук, доцент кафедры теплогазоснабжения и нефтегазового дела, Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Российская Федерация, e-mail: dkitaev@cchgeu.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4148-1261>

Dmitry N. Kitaev, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor of Heat and Gas Supply and Oil and Gas Business Department, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation, e-mail: dkitaev@cchgeu.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4148-1261>

Бохан Анна Руслановна, аспирант кафедры теплогазоснабжения и нефтегазового дела, Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Российская Федерация, e-mail: abohan@cchgeu.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-2128-6209>

Anna R. Bokhan, Post-Graduate Student, Heat and Gas Supply and Oil and Gas Engineering Department, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation, e-mail: abohan@cchgeu.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-2128-6209>