

**Разработка цифровых инструментов для расчета энергопотребления жилых зданий:  
отопление и горячее водоснабжение**

**Д.Ф. Карпов<sup>1</sup>, М.В. Павлов<sup>1</sup>, Е.В. Абрамова<sup>2,3</sup>, В.К. Заикин<sup>4</sup>**

<sup>1</sup>Вологодский государственный университет,

<sup>1</sup>160000, г. Вологда, ул. Ленина, 15, Россия,

<sup>2</sup>Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана  
(национальный исследовательский институт),

<sup>2</sup>105005, г. Москва, ул. 2-я Бауманская, 5, Россия,

<sup>3</sup>Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии  
архитектуры и строительных наук,

<sup>3</sup>127238, г. Москва, Локомотивный пр., 21, Россия,

<sup>4</sup>Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет,

<sup>4</sup>190005, г. Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., 4, Россия

**Резюме. Цель.** Целью исследования является создание программных средств, обеспечивающих достоверное и устойчиво воспроизводимое определение тепловых нагрузок и годовых затрат тепловой энергии с учетом совокупного влияния климатических, строительных и эксплуатационных условий. **Метод.** Методологической основой исследования является структурирование вычислительного процесса в виде последовательных функциональных блоков, реализующих алгоритмы расчета тепловых нагрузок и годового энергопотребления. Исходными данными являются строительные характеристики зданий, численность жителей, а также климатические и эксплуатационные параметры. **Результат.** Разработаны два программных модуля для расчета энергопотребления систем отопления и горячего водоснабжения. Новизной исследования являются разработка концепции специализированного программного обеспечения, предназначенного для реализации алгоритмов вычисления тепловых нагрузок и годового энергопотребления, а также создание метода автоматизированного расчета параметров систем отопления и горячего водоснабжения с применением укрупненных расчетных показателей. Тестирование программ подтвердило корректность алгоритмов и применимость разработанных решений в инженерной практике. Представленные алгоритмы реализованы в программных модулях, апробированных на примерах гражданских зданий. **Вывод.** Разработанные программы реализуют автоматизацию расчетов энергопотребления жилых зданий и позволяют учитывать ключевые климатические, строительные и эксплуатационные параметры. Представленные алгоритмы вычисляют максимальные и средние тепловые нагрузки, а также годовой расход энергии для систем отопления и горячего водоснабжения. Верификация программных модулей продемонстрировала высокую точность и устойчивость расчетных результатов. Проведенное исследование подтверждает значимость цифровых инструментов в сфере энергоэффективности и устойчивого развития жилой застройки.

**Ключевые слова:** энергоэффективность, энергопотребление, тепловая нагрузка, годовой расход, отопление, горячее водоснабжение, жилое здание, программное обеспечение, цифровой инструмент, алгоритм

**Для цитирования:** Д.Ф. Карпов, М.В. Павлов, Е.В. Абрамова, В.К. Заикин. Разработка цифровых инструментов для расчета энергопотребления жилых зданий: отопление и горячее водоснабжение. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2025;52(4):214-224. DOI:10.21822/2073-6185-2025-52-4-214-224

## **Development of digital tools for calculating the energy consumption of residential buildings: heating and domestic hot water**

**D.F. Karpov<sup>1</sup>, M.V. Pavlov<sup>1</sup>, E.V. Abramova<sup>2,3</sup>, V.K. Zaikin<sup>4</sup>**

<sup>1</sup>Vologda State University,

<sup>1</sup>15 Lenin St., Vologda, 160000, Russia,

<sup>2</sup>Bauman Moscow State Technical University (National Research Institute),

<sup>2</sup>5 2nd Baumanskaya Str., Moscow, 105005, Russia,

<sup>3</sup>Research Institute of Building Physics

of the Russian Academy of Architecture and Building Sciences,

<sup>3</sup>21 Locomotive Str., Moscow 127238, Russia,

<sup>4</sup>Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering,

<sup>4</sup>4, 2nd Krasnoarmeiskaya Str., Saint Petersburg 190005, Russia

**Abstract. Objective.** The aim of the study is to create software tools that ensure reliable and consistently reproducible determination of heat loads and annual thermal energy consumption, taking into account the combined influence of climatic, structural, and operational factors. **Method.** The methodological basis of the study involves structuring the computational process into a sequence of functional blocks implementing algorithms for calculating heat loads and annual energy consumption. The input data include the architectural and construction characteristics of buildings, the number of occupants, as well as climatic and operational parameters. The proposed algorithms are implemented in software modules tested on examples of civil buildings. **Result.** Two software modules have been developed for calculating the energy consumption of heating and domestic hot water systems. The novelty of the study lies in the development of a concept for specialized software implementing algorithms for calculating heat loads and annual energy consumption, as well as in the creation of an automated method for determining the parameters of heating and hot water supply systems using aggregated calculation indicators. Software testing confirmed the correctness of the algorithms and the applicability of the developed solutions in engineering practice. **Conclusion.** The developed software implements the automation of energy consumption calculations for residential buildings and enables consideration of key climatic, construction, and operational parameters. The presented algorithms determine peak and average heat loads as well as the annual energy demand for heating and domestic hot water systems. The obtained results demonstrate the efficiency of the software for optimizing energy consumption calculations. Verification of the software modules demonstrated high accuracy and stability of the computational results. The conducted study confirms the importance of digital tools in enhancing energy efficiency and promoting sustainable development in residential construction.

**Keywords:** energy efficiency, energy consumption, heat load, annual consumption, heating, domestic hot water, residential building, software, digital tool, algorithm

**For citation:** D.F. Karpov, M.V. Pavlov, E.V. Abramova, V.K. Zaikin. Development of digital tools for calculating the energy consumption of residential buildings: heating and domestic hot water. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2025;52(4):214-224. (In Russ) DOI:10.21822/2073-6185-2025-52-4-214-224

**Введение.** Актуальные направления развития теплоснабжения и повышения энергоэффективности жилых зданий требуют внедрения цифровых инструментов, обеспечивающих оптимизацию проектирования, эксплуатации и анализа инженерных систем [1-3]. Ключевое значение в этом контексте имеют методы расчета тепловых нагрузок и годового энергопотребления, которые формируют основу для стратегий энергосбережения и устойчивого развития [4].

Увеличение требований к экологической безопасности и рациональному использованию ресурсов обуславливает необходимость создания специализированного программного обеспечения для автоматизации расчетов тепловой энергии [5]. Расчет тепловых нагрузок на отопление и горячее водоснабжение жилых зданий является фундаментальной

задачей проектирования и эксплуатации систем теплоснабжения, обеспечивая точность определения параметров энергообеспечения и соответствие нормативным требованиям [6-9]. Разработка и внедрение программных решений для автоматизированного вычисления тепловых нагрузок и годового энергопотребления повышает эффективность инженерных расчетов, их оперативность и надежность [10].

Проблема исследования охватывает методы расчета энергопотребления жилых зданий, анализ факторов, влияющих на энергоэффективность инженерных систем, и оценку эксплуатационных характеристик зданий [11-26]. Анализ источников [11-18] показывает, что в большинстве исследований отсутствуют специализированные цифровые инструменты для комплексного расчета энергопотребления, что ограничивает практическую применимость предложенных методов отопления. Недостаточно количественно оценено влияние модернизационных мероприятий на энергопотребление, тепловой комфорт и долговременную надежность систем [15-17], а также ограничена разработка программ для комплексной оценки технологических, эксплуатационных и экономических показателей модернизации [12, 18].

Оценка публикаций, посвященных расходу тепловой энергии на горячее водоснабжение жилых зданий [19-26], подтверждает, что существующие методы недостаточно поддерживаются цифровыми инструментами для оперативного планирования энергосберегающих мероприятий и анализа их практических последствий. Отсутствует количественный анализ влияния поведенческих факторов жильцов, сезонных колебаний и вариативности нагрузки на точность прогнозирования потребления и долговременную эксплуатационную надежность систем [22-25]. Также ограничена разработка цифровых платформ для оценки эффективности, экономической целесообразности и устойчивости энергосбережения при реализации различных стратегий снижения энергопотребления [20, 21, 26].

**Постановка задачи.** Существующие тенденции в решении вопросов повышения энергоэффективности гражданских зданий требуют разработки прикладных программных средств для расчета энергопотребления системами отопления и горячего водоснабжения, что позволяет оптимизировать эксплуатацию и управление инженерными системами [27, 28]. Применяемые концепции включают моделирование тепловых нагрузок, анализ нормативных требований и фактического потребления, а также внедрение технологий повышения эффективности, таких как рекуперация теплоты и интеллектуальное предиктивное управление [29-31].

Цель исследования – разработать и апробировать специализированные программные продукты для расчета энергопотребления жилых зданий на отопление и горячее водоснабжение с учетом укрупненных показателей и параметров эксплуатации.

Для достижения цели исследования требуется:

1. Разработать структуру программных модулей, обеспечивающих ввод исходных данных, автоматическую обработку информации и получение результатов расчетов тепловых нагрузок и годового энергопотребления.
2. Реализовать алгоритмы вычисления максимальных и средних тепловых нагрузок, а также годового расхода тепловой энергии для отопления и горячего водоснабжения жилых зданий.
3. Выполнить тестирование созданных программ и оценить их возможности для практического применения в строительстве и теплоэнергетике при расчетах энергопотребления жилых зданий.

Объект исследования – процессы расчета тепловых нагрузок и энергопотребления жилых зданий в системах отопления и горячего водоснабжения.

Предмет исследования – методы и алгоритмы специализированного программного обеспечения, реализующего автоматизацию вычислений тепловых потоков, нагрузок и годового расхода тепловой энергии.

**Методы исследования.** Методологической базой исследования является применение вычислительных методов для автоматизированного определения тепловых нагрузок

и годового расхода тепловой энергии жилых зданий. Используются данные о строительных параметрах жилых зданий, численности жильцов, климатических и эксплуатационных условиях. Основным инструментом является разрабатываемое прикладное программное обеспечение для расчета энергопотребления на отопление и горячее водоснабжение.

Методика исследования включает структурирование алгоритмов расчета в виде отдельных функциональных блоков, обеспечивающих поэтапное преобразование исходных данных в результаты. Для оценки тепловых нагрузок применяются укрупненные показатели, позволяющие учитывать как средние, так и максимальные режимы работы инженерных систем. Расчет годового расхода тепловой энергии основан на моделировании эксплуатационных режимов систем отопления и горячего водоснабжения с учетом сезонных и региональных факторов. Верификация корректности алгоритмов осуществляется сопоставлением полученных результатов с традиционными инженерными методами расчета.

Структура программного расчета расходов тепловой энергии на отопление жилого здания: вычисление расчетных тепловых нагрузок и годового потребления тепловой энергии для поддержания нормативных параметров микроклимата в помещениях жилого здания в отопительный период.

Структура программного расчета расходов тепловой энергии на горячее водоснабжение жилого здания: реализация алгоритмов определения расчетных тепловых нагрузок и годового потребления тепловой энергии, необходимых для горячего водоснабжения жилого здания с учетом климатических, эксплуатационных и водопотребляющих характеристик. Языком программирования разработанных цифровых продуктов является Visual Basic for Applications, а средой реализации – Microsoft Excel.

Табл. 1 содержит ключевые этапы работы, характеризующие методологию, методы и материалы исследования.

**Таблица 1. Основные этапы программного расчета тепловых нагрузок и энергопотребления жилых зданий на отопление и горячее водоснабжение**  
**Table 1. Main stages of software-based calculation of heat loads and energy consumption of residential buildings for heating and domestic hot water supply**

№	Наименование этапа работы Stage title	Краткое описание этапа работы Brief description of the work stage
1.	Ввод исходных данных. Input of initial data.	Пользователь вводит ключевые параметры здания или жилого комплекса. Для первой программы (система отопления) это строительный объем отапливаемой части и параметры наружного воздуха. Для второй (система горячего водоснабжения) – количество жителей, температура холодной воды и коэффициенты тепловых потерь.
2.	Проверка корректности данных. Data validation.	Программы автоматически проверяют введенные данные на полноту и соответствие допустимым диапазонам. Все ошибки или пропущенные значения автоматически выявляются и отображаются. Это обеспечивает надежность последующих расчетов.
3.	Расчет средних параметров. Calculation of average parameters.	Для системы отопления программа вычисляет усредненную температуру внутреннего воздуха и удельную отопительную характеристику здания. Для системы горячего водоснабжения программа определяет средний часовой расход воды и коэффициент часовой неравномерности потребления. Параметры применяются для построения модели тепловых нагрузок.
4.	Определение максимальных и средних тепловых нагрузок. Determination of maximum and average heat loads.	Программы рассчитывают максимальные и средние тепловые нагрузки здания в кДж/ч или ккал/ч. Расчеты учитывают как средние режимы работы, так и экстремальные (пиковые) нагрузки. Это позволяет оценить энергетическую нагрузку на систему отопления или горячего водоснабжения.
5.	Формирование годового расхода энергии. Calculation of annual energy consumption.	На основе рассчитанных нагрузок программы вычисляют годовой расход тепловой энергии в ГДж или Гкал. Для отопления учитывается продолжительность отопительного периода и режим работы системы. Для горячего водоснабжения учитываются сезонные изменения потребления и климатические особенности региона строительства.

**Обсуждение результатов.** Разработаны и проанализированы два функциональных программных модуля, реализующие алгоритмы определения расчетных тепловых нагрузок

и годового потребления тепловой энергии для систем отопления и горячего водоснабжения с учетом строительного объема отапливаемой части здания, численности жителей, климатических условий региона и эксплуатационных режимов инженерных систем. Программы выполняют последовательное преобразование исходных данных в расчетные показатели через структурированные функциональные блоки и обеспечивают высокую точность вычислений.

Представим краткое описание функциональных возможностей разработанных модулей и результаты их компьютерной реализации, подтверждающие практическую эффективность предложенных решений.

1. Программа для расчета расходов тепловой энергии на нужды отопления жилого здания позволяет определять максимальные и средние тепловые нагрузки, а также годовое потребление тепловой энергии, при этом реализованный алгоритм на основе известного строительного объема отапливаемой части здания и климатических характеристик региона определяет требуемые тепловые потоки для функционирования системы отопления [32].

Функциональное назначение блоков программы:

Блок 1 обеспечивает ввод исходных данных: строительный объем отапливаемой части здания, параметры наружного воздуха и продолжительность отопительного периода.

Блок 2 автоматически определяет усредненную температуру внутреннего воздуха, рассчитывает удельную отопительную характеристику здания и вычисляет максимальную и среднюю тепловые нагрузки.

Блок 3 формирует годовой расход тепловой энергии с учетом продолжительности отопительного периода и режима работы системы отопления.

Табл. 2 содержит код разработанного программного обеспечения.

**Таблица 2. Код программы для расчета расходов тепловой энергии на отопление жилого здания**  
**Table 2. Program code for calculating heat energy consumption for residential building heating**

№ п/п: 'A2'. No.: 'A2'.	
Наименование величины: 'B2'.Quantity name: 'B2'.	
Условное обозначение: 'G2'.Symbol: 'G2'.	
Значение: 'H2'.Value: 'H2'.	
Единица измерения: 'I2'.Unit of measurement: 'I2'.	
<b>Блок 1. Исходные данные: 'A3'. Block 1. Input data: 'A3'.</b>	
1.	Строительный объем отапливаемой части жилого здания: 'B4': 'H4'.
2.	Расчетная температура наружного воздуха: 'B5': 'H5'.
3.	Средняя температура наружного воздуха за отопительный период: 'B6': 'H6'.
4.	Продолжительность отопительного периода: 'B7': 'H7'.
<b>Блок 2. Расчетные расходы тепловой энергии (тепловые нагрузки): 'A8'. Block 2. Calculated heat energy consumption (heat loads): 'A8'.</b>	
1.	Усредненная температура внутреннего воздуха: 'B9': 'H9', 'ЕСЛИ(H5>=-30;18;20)'.
2.	Удельная отопительная характеристика жилого здания: 'B10': 'H10', '5,5/(H4^0,125)' [кДж/(м <sup>3</sup> ·ч·°C)]; 'H11', 'H10/4,187' [ккал/(м <sup>3</sup> ·ч·°C)].
3.	Расчетная (максимальная) тепловая нагрузка на нужды отопления жилого здания: 'B12': 'H12', '=ОКРВВЕРХ((1+0,05)*(1,3+0,01*H5)*H10*H4*(H9-H5);10)' [кДж/ч]; 'H13', 'H12/(4,187*10^6)' [Гкал/ч].
4.	Средняя тепловая нагрузка на нужды отопления жилого здания: 'B14': 'H14', 'ОКРВВЕРХ(H12*((H9-H6)/(H9-H5));10)' [кДж/ч]; 'H15', 'H14/(4,187*10^6)' [Гкал/ч].
<b>Блок 3. Годовой расход тепловой энергии: 'A16'. Block 3. Annual heat energy consumption: 'A16'.</b>	
1.	Годовой расход тепловой энергии на нужды отопления жилого здания: 'B17': 'H17', 'H14*H7*24*10^-6' [ГДж]; 'H18', 'H17/4,187' [Гкал].
2.	Гидравлический напор смесительного насоса: 'B17': 'H17', 'H9+2,5'.

Рис. 1 демонстрирует пример автоматизированного программного расчета расходов тепловой энергии на отопление жилого здания.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
2	№ п/п	Наименование величины				Условное обозначение	Значение	Единица измерения	
3	Блок 1. Исходные данные								
4	1.	Строительный объем отапливаемой части жилого здания				$V$	6400	$\text{м}^3$	
5	2.	Расчетная температура наружного воздуха				$t_{н.р}$	-32	$^{\circ}\text{C}$	
6	3.	Средняя температура наружного воздуха за отопительный период				$t_{н.ср}$	-4,0	$^{\circ}\text{C}$	
7	4.	Продолжительность отопительного периода				$n_{о.с}$	228	сут/год	
8	Блок 2. Расчетные расходы тепловой энергии (тепловые нагрузки)								
9	1.	Усредненная температура внутреннего воздуха				$t_{вн}$	20	$^{\circ}\text{C}$	
10	2.	Удельная отопительная характеристика жилого здания				$q_o$	1,839	$\text{кДж}/(\text{м}^3 \cdot \text{ч} \cdot ^{\circ}\text{C})$	
11							0,439	$\text{ккал}/(\text{м}^3 \cdot \text{ч} \cdot ^{\circ}\text{C})$	
12	3.	Расчетная (максимальная) тепловая нагрузка на нужды отопления жилого здания				$Q_{о,макс}$	629790	$\text{кДж}/\text{ч}$	
13							0,150	$\text{Гкал}/\text{ч}$	
14	4.	Средняя тепловая нагрузка на нужды отопления жилого здания				$Q_{о,ср}$	290680	$\text{кДж}/\text{ч}$	
15							0,069	$\text{Гкал}/\text{ч}$	
16	Блок 3. Годовой расход тепловой энергии								
17	1.	Годовой расход тепловой энергии на нужды отопления жилого здания				$\Delta Q_{о,год}$	1590,6	$\text{ГДж}$	
18							379,9	$\text{Гкал}$	

Рис. 1 – Результаты расчета расходов тепловой энергии на отопление жилого здания

Fig. 1 – Results of heat energy consumption calculation for residential building heating

2. Программа расчета расходов тепловой энергии на нужды горячего водоснабжения жилого здания позволяет определять максимальные и средние тепловые нагрузки и годовой расход тепловой энергии. Методика расчета на основе данных о численности проживающих, температуре холодной водопроводной воды и климатических характеристиках региона обеспечивает определение тепловых потоков для системы горячего водоснабжения типового жилого здания, оборудованного ваннами длиной 1500-1700 мм и душевыми кабинами [33]. Табл.3 содержит код разработанного программного обеспечения.

Таблица 3. Код программы для расчета расходов тепловой энергии на горячее водоснабжение жилого здания

Table 3. Program code for calculating heat energy consumption for domestic hot water supply in a residential building

№ п/п: 'A2'. No.: 'A2'.	
Наименование величины: 'B2'.Quantity name: 'B2'.	
Условное обозначение: 'G2'.Symbol: 'G2'.	
Значение: 'H2'.Value: 'H2'.	
Единица измерения: 'I2'.Unit of measurement: 'I2'.	
Блок 1. Исходные данные: 'A3'. Block 1. Initial data: 'A3'.	
1.	Расчетное количество жителей в жилом здании: 'B4': 'H4'.
2.	Средняя температура холодной водопроводной воды за отопительный период года: 'B5': 'H5'.
3.	Средняя температура холодной водопроводной воды в теплый период года: 'B6': 'H6'.
4.	Коэффициент, учитывающий потери теплоты трубопроводами системы горячего водоснабжения: 'B7': 'H7'.
5.	Коэффициент снижения потребления горячей водопроводной воды в теплый период года: 'B8': 'H8'.
6.	Продолжительность отопительного периода: 'B9': 'H9'.
Блок 2. Часовые расходы тепловой энергии: 'A10'. Block 2. Hourly heat consumption: 'A10'.	
1.	Средний часовой расход горячей водопроводной воды за сутки максимального водопотребления: 'B11': 'H11', '(1/24)*985,73*120*H4*10 <sup>-6</sup> '.
2.	Коэффициент часовой неравномерности потребления горячей водопроводной воды: 'B12': 'H12', '120*(10/105)*(0,2+0,6/((H4*10/200) <sup>0,5</sup> +0,18/(H4*10/200)))'.
3.	Максимальный часовой расход тепловой энергии на нужды горячего водоснабжения жилого здания: 'B13': 'H13', 'ОКРВВЕРХ(4187*(H12*H11+H11*H7)*(55-H5);10)' [кДж/ч]; 'H14', 'H13/(4,187*10 <sup>6</sup> )' [Гкал/ч].
4.	Средний часовой расход тепловой энергии на нужды горячего водоснабжения жилого здания: 'B15': 'H15', 'ОКРВВЕРХ(4187*H11*(55-H5)*(1+H7);10)' [кДж/ч]; 'H16', 'H15/(4,187*10 <sup>6</sup> )' [Гкал/ч].
Блок 3. Годовой расход тепловой энергии: 'A17'. Block 3. Annual heat consumption: 'A17'.	
1.	Годовой расход тепловой энергии на нужды горячего водоснабжения жилого здания: 'B18': 'H18', 'H15*(H9+H8*(55-H6)/(55-H5))*(350-H9))*24*10 <sup>-6</sup> ' [ГДж]; 'H19', 'H18/4,187' [Гкал].

Функциональное назначение блоков программы: Блок 1 обеспечивает ввод исходных данных: количество потребителей, температуру холодной воды, тепловые потери и продолжительность отопительного периода. Блок 2 автоматически определяет средний часовой расход горячей воды, коэффициент неравномерности потребления, максимальную и среднюю тепловые нагрузки. Блок 3 формирует годовой расход тепловой энергии с учетом сезонного режима работы системы горячего водоснабжения и климатических условий региона. Рис. 2 демонстрирует пример автоматизированного программного расчета расходов тепловой энергии на горячее водоснабжение жилого здания.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	
2	№ п/п	Наименование величины					Условное обозначение	Значение	Единица измерения	
3	Блок 1. Исходные данные									
4	1.	Расчетное количество жителей в жилом здании					$m$	90	–	
5	2.	Средняя температура холодной водопроводной воды за отопительный период года					$t_x$	5	°С	
6	3.	Средняя температура холодной водопроводной воды в теплый период года					$t_n$	15	°С	
7	4.	Коэффициент, учитывающий потери теплоты трубопроводами системы горячего водоснабжения					$k_{тп}$	0,3	–	
8	5.	Коэффициент снижения потребления горячей водопроводной воды в теплый период года					$\phi_n$	0,8	–	
9	6.	Продолжительность отопительного периода					$n_{о.с}$	228	сут/год	
10	Блок 2. Часовые расходы тепловой энергии									
11	1.	Средний часовой расход горячей водопроводной воды за сутки максимального водопотребления					$G_{гвс}$	0,44	т/ч	
12	2.	Коэффициент часовой неравномерности потребления горячей водопроводной воды					$k_{ч}$	5,98	–	
13	3.	Максимальный часовой расход тепловой энергии на нужды горячего водоснабжения жилого здания					$Q_{макс}$	582750	кДж/ч	
14								0,139	Гкал/ч	
15	4.	Средний часовой расход тепловой энергии на нужды горячего водоснабжения жилого здания					$Q_{ср}$	120730	кДж/ч	
16								0,029	Гкал/ч	
17	Блок 3. Годовой расход тепловой энергии									
18	1.	Годовой расход тепловой энергии на нужды горячего водоснабжения жилого здания					$\Delta Q_{год}$	886,9	ГДж	
19								211,8	Гкал	

Рис. 2 – Результаты расчета расходов тепловой энергии на горячее водоснабжение жилого здания  
 Fig. 2 – Results of heat energy consumption calculation for domestic hot water supply in a residential building

Разработанное программное обеспечение структурирует вычислительный процесс в функциональные блоки, поддерживая полноту и точность расчетов. Первая программа ориентирована на определение тепловых нагрузок и годового расхода энергии, необходимых для отопления жилых зданий, с учетом их строительного объема и климатических характеристик региона. Вторая программа предназначена для вычисления тепловых потоков и энергопотребления на горячее водоснабжение жилых зданий, исходя из численности потребителей и режимов эксплуатации инженерных систем. Программы позволяют проводить расчеты с высокой степенью автоматизации, минимизируя вероятность ошибок и повышая воспроизводимость результатов. Внедрение данных цифровых решений способствует развитию современных подходов к управлению энергопотреблением и созданию более энергоэффективной и устойчивой городской инфраструктуры.

**Вывод.** Проведенное исследование позволило разработать и апробировать цифровые инструменты в виде прикладных программ, ориентированных на автоматизацию расчетов тепловых нагрузок и годового энергопотребления жилых зданий для систем отопления и горячего водоснабжения. На основе структурированного алгоритмического подхода обеспечены высокая точность вычислений, воспроизводимость результатов и удобство практического применения цифровых продуктов в инженерной деятельности.

Основные результаты работы:

1. Созданы два программных модуля, позволяющих рассчитывать тепловые нагрузки и годовое энергопотребление для систем отопления и горячего водоснабжения жилых зданий.

2. Реализованы алгоритмы вычисления максимальных и средних тепловых нагрузок, а также годового расхода энергии с учетом климатических условий, строительных параметров и эксплуатационных факторов.

3. Выполнена проверка программного обеспечения, подтвердившая его корректность и возможность применения в практике проектирования и эксплуатации систем теплоснабжения.

Разработанные программные модули обеспечивают автоматизацию расчетов, учитывающих строительные параметры, климатические условия и эксплуатационные режимы, что позволяет получать достоверные результаты с высокой степенью воспроизводимости. Проведенная апробация показала эффективность предложенных решений и их применимость в инженерной практике для оптимизации работы систем теплового обеспечения зданий. Полученные результаты подтверждают актуальность цифровых инструментов в сфере энергоэффективности и устойчивого развития жилой застройки. Представленные программы могут служить основой для дальнейшей интеграции интеллектуальных технологий управления энергопотреблением и совершенствования методов проектирования инженерных систем.

Перспективы дальнейших исследований по заявленной проблеме:

1. Интеграция разработанного программного обеспечения с технологиями информационного моделирования гражданских и промышленных зданий для повышения точности и комплексности расчетов.

2. Использование методов искусственного интеллекта и машинного обучения для прогнозирования энергопотребления с учетом поведенческих факторов и динамики эксплуатационных режимов.

3. Расширение функционала программного обеспечения для многокритериальной оптимизации, включая экономическую эффективность, экологические показатели и сценарное планирование модернизации инженерных систем жизнеобеспечения.

#### **Библиографический список:**

1. Czock, Berit and Frings, Cordelia and Arnold, Fabian. Cost and cost distribution of policy-driven investments in decentralized heating systems in residential buildings in Germany. *Energy and Buildings*. 2024. 327. 115104. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2024.115104>
2. Borovkov, A.I., Vafaeva, Kh.M., Vatin, N.I., Ponyaeva, I. Synergistic Integration of Digital Twins and Neural Networks for Advancing Optimization in the Construction Industry: A Comprehensive Review // *Construction Materials and Products*. 2024. Vol. 7. No. 4. <https://doi.org/10.58224/2618-7183-2024-7-4-7>
3. Вафаева, Х.М., Гаевская, З.А. Алгоритмы оптимизации и их применение в информационном моделировании объектов культурного наследия // *Инновации и инвестиции*. 2021. № 12. С. 175-179. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.20715.92965>
4. Arif, Rashique and Singh, Abhay and Kumar, Alok. Implementation of optimization techniques for reducing the building energy consumption of a residential building. *Engineering Research Express*. 2025. 7. <https://doi.org/10.1088/2631-8695/ade5ec>
5. Felez, Ricardo and Félez, Jesús. Advanced Energy Management for Residential Buildings Optimizing Costs and Efficiency Through Thermal Energy Storage and Predictive Control. *Applied Sciences*. 2025. 15. 880. <https://doi.org/10.3390/app15020880>
6. Liu, Yongchun and Liu, Qingrong and Liang, Qingqing and Ruan, Yingjun and Qian, Fanyue and Xu, Tingting and Meng, Hua and Yao, Yuting. Comparison of the energy flexibility potential of different heating ends in residential buildings. *Journal of Physics: Conference Series*. 2025. 2993. 012012. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2993/1/012012>
7. Олейников, А.А., Тимофеева, К.Н. Система контроля расхода тепловой энергии в контуре горячего водоснабжения в составе системы управления умным домом. *Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки*. 2024; 51(1): 206-214. <https://doi.org/10.21822/2073-6185-2024-51-1-206-214>
8. Рафальская, Т.А. Обоснование применения центрального регулирования по совмещенной нагрузке отопления и горячего водоснабжения в условиях низкотемпературного теплоснабжения // *Известия вузов. Строительство*. 2025. № 5 (797). С. 116-130. <https://doi.org/10.32683/0536-1052-2025-797-5-116-130>
9. Карпов, Д.Ф., Павлов, М.В., Абрамова, Е.В., Разумнова, Е.А. Алгоритмизация и программная реализация подбора параметров работы насосного оборудования в системах водяного отопления жилых зданий. *Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки*. 2025;52(3):199-211. <https://doi.org/10.21822/2073-6185-2025-52-3-199-211>
10. Vaisi, S., Ahmadi, N., Shirzadi, A., Bahrami, B., Shahabi, H., Mahdavejad, M.: A comparison between different machine learning techniques for predicting heating energy consumption for residential buildings in a cold climate. *Energy Efficiency*. 18, 85 (2025). <https://doi.org/10.1007/s12053-025-10379-1>

11. Тальха, И. Анализ энергетического баланса и моделирование системы отопления для жилого дома. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2025;52(2):220-226. <https://doi.org/10.21822/2073-6185-2025-52-2-220-226>
12. Diachenko, Serhii. Reconstruction of the heating system as an element of thermal modernization of old multi-story residential buildings. Technical sciences and technologies. 2025. 502-509. [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-2\(40\)-502-509](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-2(40)-502-509)
13. Kaymaz, Egemen and Sezer, Filiz. A Multi-Variable Analysis for Heating Energy Performance and Thermal Comfort in Residential Buildings. Athens Journal of Technology and Engineering. 2025. 22. 1-22. <https://doi.org/10.30958/ajte.X-Y-Z>
14. Polyvianchuk, Andrii and Gritsuk, Igor and Polyvianchuk, Natalia and Yefimov, Oleksii and Romanenko, Sergiy and Kapustenko, P. and Arsenyeva, Olga. Optimized step-by-step modernization of residential heating systems: a multi-period investment strategy for energy efficiency and cost reduction. Thermal Science and Engineering Progress. 2025. 64. 103799. <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2025.103799>
15. Dorca, Alexandru and Sarbu, Ioan. Thermal protection impact assessment of a residential house on the energy efficiency of the air-source heat pump radiant floor heating system. Thermal Science and Engineering Progress. 2025. 67. 104059. <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2025.104059>
16. Taradai, O and Bugai, Volodymyr and Gvozetskii, O and Burda, Y and Diachenko, S. Modern Heating Systems for Multi-Story Residential Buildings. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2024. 1376. 012046. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1376/1/012046>
17. Zhang, Zhizheng and Hua, Yunfeng and Peng, Na and Liu, Kailong. Research on Energy-Saving Transformation of Rural Residential Building Envelope Structures and Heating Modes in Northeast China. Energies. 2024. 17. 5195. <https://doi.org/10.3390/en17205195>
18. Rahgozar, Saeed and Ahmadpour, Mohammad and Dehghan, Maziar and Haghgou, Hamidreza and Pourrajabian Shahrababak, Abolfazl. Evaluation of retrofit strategies to improve energy efficiency and winter thermal comfort of an existing residential apartment. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. 2025. 150. <https://doi.org/10.1007/s10973-025-14352-z>
19. Nakhodov, V. and Shovkaliuk, M. and Mykyta, Yevhenii. Analysis of approaches to determining the quantity of thermal energy for the needs of hot water supply in the energy certification of buildings. Power engineering: economics, technique, ecology. 2023. <https://doi.org/10.20535/1813-5420.3.2022.270242>
20. Kushka, Oleksandr and Liubenko, Volodymyr and Nechypor, Oksana and Petryk, Uliana. Determination of the circulation flow rate in the calculation of internal hot water supply networks. Problems of Water supply, Sewerage and Hydraulic. 2023. 40-46. <https://doi.org/10.32347/2524-0021.2023.44.40-46>
21. Li, Xianting and Wu, Wei and Yu, Chuck. Energy demand for hot water supply for indoor environments: Problems and perspectives. Indoor and Built Environment. 2014. 24. 5-10. <https://doi.org/10.1177/1420326X14564285>
22. Rubina, Aleš and Uher, Pavel and Vrána, Jakub and Znebežánek, Jiří and Salajka, Radek and Mostek, Jan and Čakl, Dominik and Varbanov, Petar. Monitoring of fresh water consumption and energy needs for hot tap water heating in residential buildings. Thermal Science and Engineering Progress. 2024. 51. 102639. <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2024.102639>
23. Balan, Mircea and Sandu, Mihnea and Bode, Florin. In-building direct wastewater heat recovery solutions for enhancing thermal efficiency in domestic hot water systems. E3S Web of Conferences. 2025. 608. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202560801015>
24. Maltais, Louis-Gabriel and Gosselin, Louis. Predictability analysis of domestic hot water consumption with neural networks: From single units to large residential buildings. Energy. 2021. 229. 120658. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.120658>
25. Glamazdin, P. and Chepurna, Natalia and Koziachyna, Bohdan. The selection of a methodology for calculating the heat load of hot water supply systems for facilities with significant uneven consumption. Ventilation, Illumination and Heat Gas Supply. 2023. 44. 39-48. <https://doi.org/10.32347/2409-2606.2023.44.39-48>
26. Canale, Laura and Cholewa, Tomasz and Ficco, G. and Siuta-Olcha, A. and Pietra, B. and Kołodziej, P. and Dell'Isola, Marco. The role of individual metering in reducing domestic hot water consumption in residential buildings: A long-term evaluation. Journal of Building Engineering. 2023. 73. 106734. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.106734>
27. Чакин, Е.Ю., Гамаюнова, О.С. Методика выбора энергоэффективных теплоизоляционных материалов с помощью среды визуального программирования Дунамо // Известия Юго-Западного государственного университета. 2024. Т. 28. No. 3. С. 50-68. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2024-28-3-50-68>
28. Фролова, А.А., Лухменев, П.И. Расчет уровня энергетически целесообразной теплозащиты // Вестник МГСУ. 2023. Т. 18. Вып. 1. С. 82-90. <https://doi.org/10.22227/1997-0935.2023.1.82-90>
29. Khmel, Ekaterina and Hurynovich, Anatoly and Holubava, Volha and Romanovski, Valentin. Organizational Models for Managing the Operation of Water Supply Facilities of the Agro-Industrial Complex. World Water Policy. 2025. 11. 735-750. <https://doi.org/10.1002/wwp2.70012>
30. Kapanski, Aliaksei and Hrutovich, Nadzeya and Klyuev, Roman and Brigida, Vladimir. Identification of Easily Accessible Urban Water Consumption Factors for Energy-Efficient Management of Pumping Stations. Water Conservation Science and Engineering. 2025. 10. <https://doi.org/10.1007/s41101-025-00372-1>
31. Нуриев, М.Г., Кремлева, Э.Ш., Пикулева, Н.И., Хафизова, А.Ш. Разработка системы управления умным домом на базе Home Assistant и Zigbee // Международный научно-исследовательский журнал. 2025. № 7 (157). <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.157.11>
32. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021614736. Программа для расчета расходов тепловой энергии на нужды отопления жилого здания: № 2021613736: заявл. 24.03.2021: опубл. 29.03.2021. Бюл. № 4 / М.В. Павлов, Д.Ф. Карпов, С.В. Клопов, В.А. Писаренко, В.П. Березина; правообладатель ВоГУ. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.10808.15364>
33. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021665902. Программа для расчета расходов тепловой энергии на нужды горячего водоснабжения жилого здания: № 2021665271: заявл. 05.10.2021:

#### References:

1. Czock, Berit and Frings, Cordelia and Arnold, Fabian. Cost and cost distribution of policy-driven investments in decentralized heating systems in residential buildings in Germany. *Energy and Buildings*. 2024. 327. 115104. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2024.115104>
2. Borovkov, A.I., Vafaeva, Kh.M., Vatin, N.I., Ponyaeva, I. Synergistic Integration of Digital Twins and Neural Networks for Advancing Optimization in the Construction Industry: A Comprehensive Review // *Construction Materials and Products*. 2024. Vol. 7. No. 4. <https://doi.org/10.58224/2618-7183-2024-7-4-7>
3. Vafaeva, Kh.M., Gaevskaya, Z.A. Optimization algorithms and their application in information modeling of cultural heritage objects. *Innovation and Investment*. 2021;12:175-179. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.20715.92965> (In Russ)
4. Arif, Rashique and Singh, Abhay and Kumar, Alok. Implementation of optimization techniques for reducing the building energy consumption of a residential building. *Engineering Research Express*. 2025. 7. <https://doi.org/10.1088/2631-8695/ade5ec>
5. Felez, Ricardo and Félez, Jesús. Advanced Energy Management for Residential Buildings Optimizing Costs and Efficiency Through Thermal Energy Storage and Predictive Control. *Applied Sciences*. 2025. 15. 880. <https://doi.org/10.3390/app15020880>
6. Liu, Yongchun and Liu, Qingrong and Liang, Qingqing and Ruan, Yingjun and Qian, Fanyue and Xu, Tingting and Meng, Hua and Yao, Yuting. Comparison of the energy flexibility potential of different heating ends in residential buildings. *Journal of Physics: Conference Series*. 2025. 2993. 012012. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2993/1/012012>
7. Oleinikov, A. and Timofeeva, K. Thermal Energy consumption monitoring System in the Hot water Supply circuit as part of the Smart Home management system. *Herald of Dagestan State Technical University. Technical Sciences*. 2024. 51. 206-214. <https://doi.org/10.21822/2073-6185-2024-51-1-206-214> (In Russ)
8. Rafalskaya, T.A. Rationale for the use of central regulation for joint heating and hot water supply loads in low-temperature heat supply conditions. *News of Higher Educational Institutions. Construction*. 2025; (5): 116-130. <https://doi.org/10.32683/0536-1052-2025-797-5-116-130> (In Russ)
9. Karpov, D.F., Pavlov, M.V., Abramova, E.V., Razumnova, E.A. Algorithmization and software implementation for selecting operating parameters of pumping equipment in hydronic heating systems of residential buildings. *Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences*. 2025;52(3):199-211. <https://doi.org/10.21822/2073-6185-2025-52-3-199-211> (In Russ)
10. Vaisi, S., Ahmadi, N., Shirzadi, A., Bahrami, B., Shahabi, H., Mahdavejad, M.: A comparison between different machine learning techniques for predicting heating energy consumption for residential buildings in a cold climate. *Energy Efficiency*. 18, 85 (2025). <https://doi.org/10.1007/s12053-025-10379-1>
11. Talha, I. Energy balance analysis and heating system modeling for a residential building. *Herald of Dagestan State Technical University. Technical Sciences*. 2025;52(2):220-226. <https://doi.org/10.21822/2073-6185-2025-52-2-220-226> (In Russ)
12. Diachenko, Serhii. Reconstruction of the heating system as an element of thermal modernization of old multi-story residential buildings. *Technical sciences and technologies*. 2025. 502-509. [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-2\(40\)-502-509](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-2(40)-502-509)
13. Kaymaz, Egemen and Sezer, Filiz. A Multi-Variable Analysis for Heating Energy Performance and Thermal Comfort in Residential Buildings. *Athens Journal of Technology and Engineering*. 2025;22:1-22. <https://doi.org/10.30958/ajte.X-Y-Z>
14. Polyvianchuk, Andrii and Gritsuk, Igor and Polyvianchuk, Natalia and Yefimov, Oleksii and Romanenko, Sergiy and Kapustenko, P. and Arsenyeva, Olga. Optimized step-by-step modernization of residential heating systems: a multi-period investment strategy for energy efficiency and cost reduction. *Thermal Science and Engineering Progress*. 2025. 64. 103799. <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2025.103799>
15. Dorca, Alexandru and Sarbu, Ioan. Thermal protection impact assessment of a residential house on the energy efficiency of the air-source heat pump radiant floor heating system. *Thermal Science and Engineering Progress*. 2025. 67. 104059. <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2025.104059>
16. Taradai, O and Bugai, Volodymyr and Gvozdetskii, O and Burda, Y and Diachenko, S. Modern Heating Systems for Multi-Story Residential Buildings. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2024. 1376. 012046. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1376/1/012046>
17. Zhang, Zhizheng and Hua, Yunfeng and Peng, Na and Liu, Kailong. Research on Energy-Saving Transformation of Rural Residential Building Envelope Structures and Heating Modes in Northeast China. *Energies*. 2024;17. 5195. <https://doi.org/10.3390/en17205195>
18. Rahgozar, Saeed and Ahmadpour, Mohammad and Dehghan, Maziar and Haghgou, Hamidreza and Pourrajabian Shahrabak, Abolfazl. Evaluation of retrofit strategies to improve energy efficiency and winter thermal comfort of an existing residential apartment. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2025. 150. <https://doi.org/10.1007/s10973-025-14352-z>
19. Nakhodov, V. and Shovkaliuk, M. and Mykyta, Yevhenii. Analysis of approaches to determining the quantity of thermal energy for the needs of hot water supply in the energy certification of buildings. *Power engineering: economics, technique, ecology*. 2023. <https://doi.org/10.20535/1813-5420.3.2022.270242>
20. Kushka, Oleksandr and Liubenko, Volodymyr and Nechypor, Oksana and Petryk, Uliana. Determination of the circulation flow rate in the calculation of internal hot water supply networks. *Problems of Water supply, Sewerage and Hydraulic*. 2023. 40-46. <https://doi.org/10.32347/2524-0021.2023.44.40-46>
21. Li, Xianting and Wu, Wei and Yu, Chuck. Energy demand for hot water supply for indoor environments: Problems and perspectives. *Indoor and Built Environment*. 2014. 24. 5-10. <https://doi.org/10.1177/1420326X14564285>
22. Rubina, Aleš and Uher, Pavel and Vrána, Jakub and Znebežánek, Jiří and Salajka, Radek and Mostek, Jan and Cakl, Dominik and Varbanov, Petar. Monitoring of fresh water consumption and energy needs for hot tap water heating in

- residential buildings. Thermal Science and Engineering Progress. 2024. 51. 102639. <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2024.102639>
23. Balan, Mircea and Sandu, Mihnea and Bode, Florin. In-building direct wastewater heat recovery solutions for enhancing thermal efficiency in domestic hot water systems. E3S Web of Conferences. 2025. 608. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202560801015>
24. Maltais, Louis-Gabriel and Gosselin, Louis. Predictability analysis of domestic hot water consumption with neural networks: From single units to large residential buildings. Energy. 2021. 229. 120658. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.120658>
25. Glamazdin, P. and Chepurna, Nataliia and Koziachyna, Bohdan. The selection of a methodology for calculating the heat load of hot water supply systems for facilities with significant uneven consumption. Ventilation, Illumination and Heat Gas Supply. 2023. 44. 39-48. <https://doi.org/10.32347/2409-2606.2023.44.39-48>
26. Canale, Laura and Cholewa, Tomasz and Ficco, G. and Siuta-Olcha, A. and Pietra, B. and Kołodziej, P. and Dell'Isola, Marco. The role of individual metering in reducing domestic hot water consumption in residential buildings: A long-term evaluation. Journal of Building Engineering. 2023. 73. 106734. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.106734>
27. Chakin, E. and Gamayunova, Olga. Methodology for selecting energy-efficient thermal insulation materials using the Dynamo visual programming environment. Proceedings of the Southwest State University. 2024. 28. 50-68. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2024-28-3-50-68> (In Russ)
28. Frolova, A.A., Lukhmenov, P.I. Calculation of the level of energy efficient heat protection. Vestnik MGSU [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2023;18(1):82-90. DOI.org/10.22227/1997-0935.2023.1.82-90 (In Russ)
29. Khmel, Ekaterina and Hurynovich, Anatoly and Holubava, Volha and Romanovski, Valentin. Organizational Models for Managing the Operation of Water Supply Facilities of the Agro-Industrial Complex. World Water Policy. 2025. 11. 735-750. <https://doi.org/10.1002/wwp2.70012>
30. Kapanski, Aliaksei and Hruntovich, Nadzeya and Klyuev, Roman and Brigida, Vladimir. Identification of Easily Accessible Urban Water Consumption Factors for Energy-Efficient Management of Pumping Stations. Water Conservation Science and Engineering. 2025. 10. <https://doi.org/10.1007/s41101-025-00372-1>
31. Nuriev, M.G., Kremleva, E.S., Pikuleva, N.I., Khafizova, A.S. Development of a smart home control system based on Home Assistant and Zigbee *International Research Journal*. 2025;7 (157). DOI:10.60797/IRJ.2025.157.11 (In Russ)
32. Computer Program State Registration Certificate No. 2021614736. Software "Calculation of Heat Energy Consumption for Heating a Residential Building": No. 2021613736: declared 24.03.2021: publ. 29.03.2021. Bull. No. 4 / M.V. Pavlov, D.F. Karpov, S.V. Klopov, V.A. Pisarenko, V.P. Berezina; right holder of VoSU. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.10808.15364> (In Russ)
33. Computer Program State Registration Certificate No. 2021665902. Software "Calculation of Heat Energy Consumption for Domestic Hot Water Supply in a Residential Building": No. 2021665271: declared 05.10.2021: publ. 05.10.2021. Bull. No. 10 / M.V. Pavlov, D.F. Karpov, S.V. Klopov, V.A. Pisarenko, V.P. Zhukova; right holder of VoSU. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.17519.04009> (In Russ)

#### Сведения об авторах:

Карпов Денис Федорович, старший преподаватель, кафедра теплогазоводоснабжения; [karpovdf@vogu35.ru](mailto:karpovdf@vogu35.ru); ORCID 0000-0002-3522-9302

Павлов Михаил Васильевич, кандидат технических наук, доцент, доцент, кафедра теплогазоводоснабжения; [pavlovmv@vogu35.ru](mailto:pavlovmv@vogu35.ru); ORCID 0000-0002-8687-3296

Абрамова Елена Вячеславовна, доктор технических наук, профессор, кафедра сварки, диагностика и специальной робототехники; главный научный сотрудник, НИИСФ РААСН; [eva32@bk.ru](mailto:eva32@bk.ru); РИНЦ ID 107200  
Заикин Владимир Константинович, старший преподаватель, кафедра начертательной геометрии и инженерной графики; [zaikin.vladimir@yandex.ru](mailto:zaikin.vladimir@yandex.ru); РИНЦ ID 738199

#### Information about authors:

Denis F. Karpov, Senior Lecturer, Department of Heat, Gas and Water Supply; [karpovdf@vogu35.ru](mailto:karpovdf@vogu35.ru); ORCID 0000-0002-3522-9302

Mikhail V. Pavlov, Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof., Assoc. Prof., Department of Heat, Gas and Water Supply; [pavlovmv@vogu35.ru](mailto:pavlovmv@vogu35.ru); ORCID 0000-0002-8687-3296

Elena V. Abramova, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Department of Welding, Diagnostics and Special Robotics; Chief Scientific Officer, NIISF RAASN; [eva32@bk.ru](mailto:eva32@bk.ru); RSCI ID 107200

Vladimir K. Zaikin, Senior Lecturer, Department of Descriptive Geometry and Engineering Graphics; [zaikin.vladimir@yandex.ru](mailto:zaikin.vladimir@yandex.ru); RSCI ID 738199

#### Конфликт интересов/Conflict of interests.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов/The authors declare that there are no conflicts of interests.

Поступила в редакцию/Received 01.09.2025

Одобрена после рецензирования/Revised 30.09.2025

Принята в печать/Accepted for publication 08.10.2025