

DOI: 10.15593/2499-9873/2021.3.03

УДК 004.942

**Р.Ю. Банников**

Пермский национальный исследовательский  
политехнический университет, Пермь, Россия

## **ВИРТУАЛЬНЫЙ СТЕНД ГОРОДСКОЙ СЕТИ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ В УСЛОВИЯХ НЕПОЛНОТЫ ДАННЫХ**

Рассматривается актуальная для теплоснабжающей организации задача оптимального регулирования тепловой нагрузки на котельной с целью обеспечения теплоносителем конечных потребителей с учетом допустимых отклонений по температуре согласно температурному графику. Регулирование на котельной, которая питает тепловую сеть с неизвестными теплофизическими характеристиками, представляет собой слабоформализуемую задачу. Это не в последнюю очередь связано с характерными особенностями эксплуатации сетей теплоснабжения. Исходя из этого, возникает необходимость в разработке виртуального стенда городской сети теплоснабжения в условиях неполноты данных, который позволяет создавать модели сетей теплоснабжения с разнообразными условиями тепловых потерь, с потребителями тепла разных категорий и разным потреблением тепловой энергии. При этом появляется возможность моделировать вносимые изменения без внесения фактических изменений в структуру городской теплосети.

Объектом исследования является закрытая городская сеть теплоснабжения со сложной топологией, а предметом – расчетные модели теплосети, позволяющие определять потери температуры теплоносителя на участках теплосети на основе обработки данных с общедомовых приборов учета. Целью работы является повышение эффективности управления городской сетью теплоснабжения на основе данных, получаемых с помощью виртуального стенда.

Разработана концептуальная модель и реализован основной функционал виртуального стенда. На основе ряда проведенных численных экспериментов сформулирован и реализован в рамках виртуального стенда алгоритм, позволяющий определять значения суммарных термических сопротивлений на каждом участке сети теплоснабжения на основе данных с ОДПУ. Проведена апробация стенда на городской сети теплоснабжения г. Лысьвы. Отклонение значений температуры, вычисленных в рамках модели, реализованной в виртуальном стенде, от значений температуры, полученных с ОДПУ, не превысило 5 %. Следовательно, можно использовать данный виртуальный стенд для более эффективного управления городской сетью теплоснабжения с учетом погрешности вычислений.

**Ключевые слова:** сеть теплоснабжения, моделирование, математическая модель, метод Нелдера – Мида, виртуальный стенд, оптимальное управление, инерционность теплосети, неполнота данных, характеристики теплосети, слабоформализуемая задача.

**R.Yu. Bannikov**

Perm National Research Polytechnic University,  
Perm, Russian Federation

## **URBAN HEATING SYSTEM VIRTUAL STAND UNDER DATA INCOMPLETE CONDITIONS**

The problem of heat load optimal regulation in a boiler house considered to provide heat carrier to end users, taking into account the permissible temperature deviations according to the temperature schedule, is relevant for a heat supplying organization. Regulation in a boiler house that feeds a heating network with unknown thermophysical characteristics is a problem that belongs to the class of poorly formalized problems. This is due, not least, to the specific features of heating system exploitation. The problem relatively easily solved at different ambient temperatures and at different times in the data completeness case on the above specific features. Unfortunately, collecting such information is almost impossible. We have to pose and solve the problem under conditions of uncertainty. Therefore, decided to develop an urban heating system virtual stand under data incomplete conditions, which will allow creating a heating system models with various conditions of heat loss, with heat consumers of different categories and different heat energy consumption. It will allow to simulate a changes made without making factual changes in an urban heating system structure.

The object of the study is a closed urban heating system with a complex topology, and the subject is calculation models of a heating system, which allow determining the temperature loss of the coolant in the sections of the heating system based on data processing from general house metering devices (GHMD).

The aim of the work is to improve the efficiency of an urban heating system management based on data obtained using a virtual stand. A conceptual model developed and the main functionality of the virtual stand implemented. Based on a number of numerical experiments carried out, an algorithm formulated and implemented within the framework of a virtual stand, which makes it possible to determine total thermal resistances values at each section of the heating system from GHMD data. The stand tested on the urban heating system of the Lysva city. The deviation of the temperature values calculated within the framework of the model implemented in the virtual stand from the temperatures obtained from the GHMD did not exceed 5 %. Consequently, this virtual stand can used for more efficient urban heating system management, taking into account the calculation error.

**Keywords:** heating system, modeling, mathematical model, Nelder – Mead method, virtual stand, optimal control, inertia of the heating network, incompleteness of data, heating system characteristics, poorly formalized problem.

### **Введение**

Тепловое потребление является одной из основных статей топливно-энергетического баланса нашей страны. По данным Единой межведомственной информационно-статистической системы (ЕМИСС) [1], за 2020 г. расходы топливно-энергетических ресурсов на производство пара и горячей воды, отпущенной котельными, составили более 40 млн т условного топлива.

Чтобы организовать теплофикацию, необходимо наличие следующей инфраструктуры [2]:

- Источник генерации тепла (котельная, ТЭЦ, АТЭС).
- Разветвленная сеть теплоснабжения. Представляет собой теплоизолированные теплопроводы, по которым осуществляется доставка теплоносителя абонентам (конечным потребителям тепла).

- Тепловые пункты (ТП). Назначение ТП – подготовка теплоносителя согласно температурным графикам для конечных потребителей, происходит с помощью сетевой воды (пара).

- Оборудование конечных потребителей. Предназначено для использования горячей воды (пара) в системах отопления, горячего водоснабжения (ГВС), вентиляции, кондиционирования воздуха.

Температурный график – это неэмпирическая зависимость температуры сетевой воды от температуры наружного воздуха [3]. Значения температурных графиков принято рассчитывать по формулам. В основе этих формул заложены уравнения теплопередачи. Результаты расчетов обычно представляются в табличной форме.

### **1. Особенности теплоснабжения**

Основной задачей теплоснабжающей организации (ТСО) является поставка теплоносителя в многоквартирные дома (МКД) с соблюдением установленного нормативного температурного графика. Допускается отклонение в размере 5 % по температуре, поступающей в МКД, в меньшую сторону от температуры, обозначенной в температурном графике. Следовательно, актуальной задачей для ТСО является задача качественного (оптимального) регулирования тепловой нагрузки на котельной.

В качестве базовой теплосети рассматривается закрытая сеть теплоснабжения, упрощенная структура которой представлена на рис. 1.

Основными элементами, образующими теплосеть, являются:

- Котельная – поставщик теплоносителя.
- ТК – тепловые камеры.
- МКД – многоквартирные дома, потребители теплоносителя.
- Соединительные участки теплосети – трубы, соединяющие основные узлы теплосети.

Регулирование на котельной, которая питает тепловую сеть с неизвестными теплофизическими характеристиками, представляет собой задачу, относящуюся к классу слабоформализуемых проблем. Это не в последнюю очередь связано с характерными особенностями эксплуатации сетей теплоснабжения:

- инерционность – теплоноситель с измененными характеристиками поступает к потребителю через определенный промежуток времени;

- износ сети теплоснабжения, который может быть как прогнозируемым, так и непрогнозируемым;
- сложность топологии сети теплоснабжения, которая оказывает влияние на распределение и изменение характеристик теплоносителя;
- неполнота данных с общедомовых приборов учета (ОДПУ), порой снимается только часть данных (например, только температура) или вообще ОДПУ может отсутствовать.

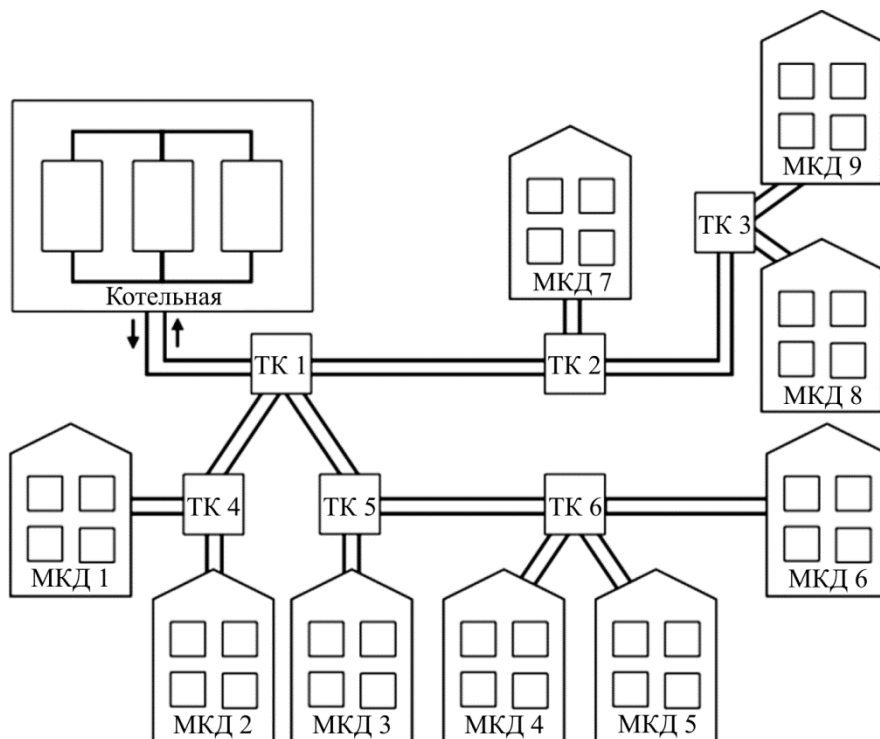


Рис. 1. Упрощенная структура закрытой сети теплоснабжения

В случае полноты данных по обозначенным выше характерным особенностям при разных температурах окружающей среды и в разные моменты времени задача относительно легко может быть решена.

К сожалению, сбор такой информации практически невозможен. Приходится ставить и решать задачу в условиях неопределенности.

Ввиду этого было решено разработать виртуальный стенд городской сети теплоснабжения в условиях неполноты данных, который позволит создавать модели сетей теплоснабжения с разнообразными условиями тепловых потерь, с потребителями тепла разных категорий

и разным потреблением тепловой энергии, а также моделировать вносимые изменения без внесения фактических изменений в структуру городской теплосети.

Таким образом, в данной работе объектом исследования является закрытая городская сеть теплоснабжения со сложной топологией, а предметом – расчетные модели теплосети, позволяющие определять потери температуры теплоносителя на участках теплосети на основе обработки данных с ОДПУ. Цель работы – повышение эффективности управления городской сетью теплоснабжения на основе данных, получаемых с помощью виртуального стенда.

Для достижения обозначенной цели необходимо решить следующий перечень задач:

1. Сформулировать функциональные требования к виртуальному стенду и реализовать в виде конечного программного продукта.
2. Разработать алгоритм, позволяющий вычислять параметры сети теплоснабжения на основе данных с ОДПУ.
3. Провести апробацию стенда на реальной сети теплоснабжения:
  - построить топологию сети теплоснабжения;
  - вычислить параметры сети теплоснабжения на основе обработки данных с ОДПУ;
  - с учетом заданных и вычисленных параметров сети теплоснабжения провести ряд численных экспериментов, направленных на определение отклонений значений температуры по МКД, получаемых на стенде, от значений температуры с ОДПУ (фактических).

## **2. Расчет потерь тепла**

Расчет теплотерь на участках теплосети осуществляется по следующей формуле [4]:

$$\tau_2 = t_0 + (\tau_1 - t_0) e^{-\frac{l(1+\beta)}{RGc_p}}, \quad (1)$$

где  $\tau_1$ ,  $\tau_2$  – температуры теплоносителя в начале и в конце участка, °С;  
 $t_0$  – температура окружающей среды, °С;  $l$  – длина теплопровода, м;  
 $\beta$  – коэффициент местных потерь теплоты, зависит от диаметра труб<sup>1</sup>;

---

<sup>1</sup> МКД 4-03.2001. Методика определения нормативных значений показателей функционирования водяных тепловых сетей систем коммунального теплоснабжения.

$R$  – суммарное термическое сопротивление тепловой изоляции, стенки канала и грунта,  $(\text{м}\cdot^\circ\text{C})/\text{Вт}$ ;  $G$  – расход теплоносителя,  $\text{кг}/\text{с}$ ;  $c_p$  – теплоемкость теплоносителя,  $\text{Дж}/(\text{кг}\cdot^\circ\text{C})$ .

Неизвестным параметром в формуле (1) является суммарное термическое сопротивление, которое сложно точно определить по приведенным в источниках формулам [5–10]. Проблема определения точного значения суммарного термического сопротивления связана с неравномерным для всего участка трубопровода ухудшением изоляционных характеристик как самого теплоизоляционного материала, так и стенок канала, в том числе грунта [11].

Таким образом, необходимо реализовать в рамках виртуального стенда сети теплоснабжения алгоритм вычисления суммарного термического сопротивления в зависимости от топологии и показаний ОДПУ, с учетом погодных условий и характеристик теплоносителя на выходе из котельной.

### 3. Вычисление значений суммарных термических сопротивлений

Для того чтобы определить значения суммарных термических сопротивлений на каждом участке теплотрассы, необходимо решить задачу оптимизации с заданными ограничениями. В качестве минимизируемой была выбрана функция следующего вида:

$$J = \sum_{i=1}^N (T_i^* - T_i)^2 \rightarrow \min ,$$

где  $T_i^*$  – фактически замеренная температура на входе в  $i$ -й МКД;  $T_i$  – вычисленное на виртуальном стенде значение температуры на входе в  $i$ -й МКД;  $N$  – количество МКД.

При этом вводятся ограничения по значениям суммарных термических сопротивлений:

$$R_i \geq 0, \quad i = \overline{1, N_y},$$

где  $R_i$  – суммарное термическое сопротивление тепловой изоляции, стенки канала и грунта на участке теплосети, ведущем к  $i$ -му узлу теплосети от узла, с которым соединен;  $N_y$  – количество узлов (ТК и МКД) теплосети.

Для учета обозначенных ограничений сформированы следующие функции:

$$f_{0,i}^* = 1 - |\text{sign}(R_i)|; \quad (2)$$

$$f_{1,i}^* = 1 - |\text{sign}(1 + R_i)|; \quad (3)$$

$$f_{0,i}^{**} = (1 + \text{sign}(1 + R_i) + f_{1,i}^*)(1 - \text{sign}(R_i) + f_{0,i}^*); \quad (4)$$

$$f_{1,i}^{**} = (1 - \text{sign}(1 + R_i) - f_{1,i}^*)(1 - \text{sign}(R_i)); \quad (5)$$

$$f_{0,i} = f_{0,i}^{**} \left( \frac{\lambda}{2} (1 + |R_i|) \right)^2; \quad (6)$$

$$f_{1,i} = f_{1,i}^{**} (\lambda R_i)^2; \quad (7)$$

$$f_i = f_{0,i} + f_{1,i}, \quad (8)$$

где  $\lambda$  – коэффициент, определяющий вид штрафной функции.

С учетом формул (2)–(8) общий вид штрафной функции следующий:

$$S = \sum_{i=1}^{N_y} f_i.$$

Таким образом, минимизируемая функция с учетом ограничений примет следующий вид:

$$J = \sum_{i=1}^N (T_i^* - T_i)^2 + \sum_{i=1}^{N_y} f_i \rightarrow \min.$$

Для поиска минимума функции решено было использовать метод Нелдера – Мида (метод деформируемого многогранника [12, 13]). Основная идея метода заключается в последовательном перемещении и деформировании симплекса в районе точки экстремума. Метод находит локальный экстремум и может «застрять» в одном из них. В случае когда требуется найти глобальный экстремум, можно пробовать выбирать другой начальный симплекс [12, 13]. В реализации поиска глобального экстремума в рамках виртуального стенда был разработан алгоритм, в рамках которого происходит перестроение симплекса из текущей найденной точки экстремума путем увеличения граней сим-

плекса на определенно заданную величину. Процедура поиска глобального экстремума происходит до тех пор, пока не будет найдена новая точка, где значение минимизируемой функции меньше наперед заданного значения, или пока новая точка экстремума не совпадет с точкой, найденной на предыдущем шаге. Кроме того, процедура поиска глобального экстремума ограничена количеством попыток поиска.

#### **4. Функциональные требования**

Для реализации будущего виртуального стенда городской сети теплоснабжения были сформулированы следующие функциональные требования:

1. Генерация структуры упрощенной сети теплоснабжения случайно или вручную из набора заданных параметров/элементов.
2. Сохранение в файл и загрузка из файла конфигурации и текущего состояния сети теплоснабжения.
3. Управление параметрами сети теплоснабжения.
4. Расчет сети теплоснабжения:
  - расчет состояния теплосети через заданный временной интервал;
  - расчет установившегося состояния.
5. Определение среднего суммарного термического сопротивления тепловой изоляции для каждого МКД на основе:
  - данных по температуре и расходу теплоносителя на выходе из бойлерной;
  - данных по температуре теплоносителя на входе в МКД;
  - данных по температуре окружающей среды.
6. Визуализация расчетных результатов.
7. Имитация распределения температуры внутри сети теплоснабжения при изменяющихся параметрах: погодные условия, характеристики теплоносителя, поступающего с котельной.

#### **5. Виртуальный стенд сети теплоснабжения**

В рамках виртуального стенда реализована возможность генерации случайной топологии сети. Случайная генерация происходит на основе следующих параметров:

- Общая протяженность теплосети. Суммарная длина участков теплосети от котельной до каждого узла теплосети (ТК, МКД).



- Количество ТК. Общее количество в генерируемой теплосети тепловых камер. Значение должно быть больше 1.
- Количество МКД. Общее количество в генерируемой теплосети тепловых камер. Значение должно быть больше 1.
- Минимальное расстояние между ТК. Минимально допустимое расстояние (длина трубопровода) от ТК до узла, к которому он подключен.
- Максимальное/минимальное расстояние от ТК до МКД. Максимально/минимально допустимое расстояние (длина трубопровода) от МКД до ТК, к которому он подключен.
- Максимальное суммарное термическое сопротивление. Максимально возможное допустимое значение суммарного термического сопротивления должно быть обязательно больше  $1E-4$  – нижняя граница, используемая при генерации параметров теплосети.

При случайной генерации теплосети учтены следующие моменты:

1. Диаметр труб, распределяющих теплоноситель от ТК, должен быть меньше диаметра трубы, подводящей теплоноситель к данному ТК.
2. Суммарное максимально возможное расстояние до каждого узла теплосети (ТК, МКД) должно быть меньше заданной общей протяженности сети. В случае некорректного ввода данных выводится сообщение с рекомендацией изменить один из заданных параметров.

В случае ручного создания теплосети необходимо добавлять каждый узел в отдельности и задавать минимально необходимые параметры узла: диаметр и длину трубы, проводящей теплоноситель, а также величину суммарных термических потерь, а для МКД обязательным параметром является величина расхода (рис. 2).

Сгенерированная теплосеть отображается в виде древовидной структуры, пример которой представлен на рис. 3.

Для работы с ранее созданными моделями теплосетей в рамках виртуального стенда реализована возможность сохранения в файл и загрузки конфигурации и текущего состояния теплосети. Данные по теплосети в файлах представлены в формате JSON [14].

Предусмотрены следующие виды расчетов:

- Расчет состояния теплосети через заданный временной интервал. С учетом скорости движения теплоносителя производится расчет распределения теплоносителя в теплосети.
- Расчет установившегося состояния. Расчет распределения теплоносителя в теплосети без учета временной составляющей.



Рис. 2. Генерация топологии теплосети вручную

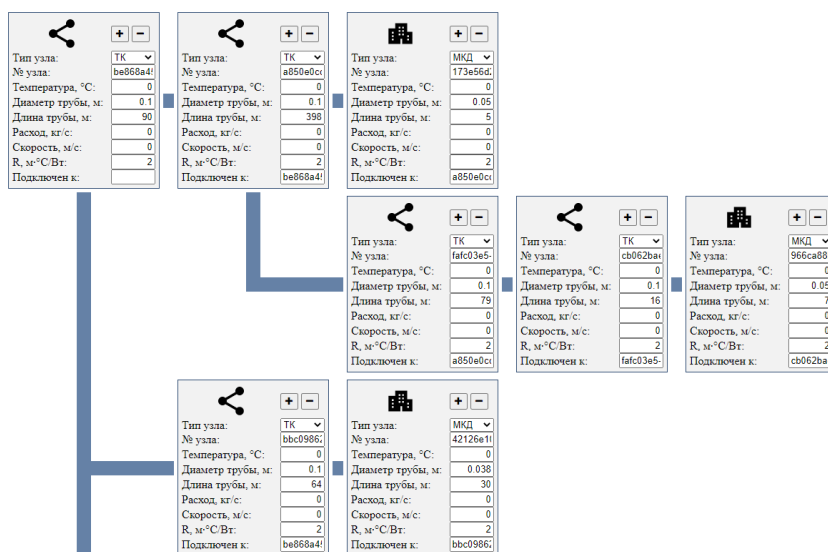


Рис. 3. Отображение топологии теплосети

Для всех обозначенных расчетов необходимо задать исходные данные – погодные условия (рис. 4) и характеристики теплоносителя на выходе с котельной (рис. 5), остальные характеристики теплоносителя, необходимые для расчета, берутся из справочной литературы [15].

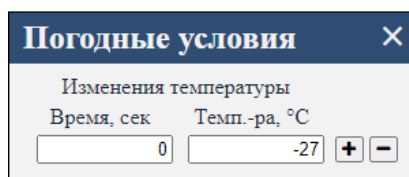


Рис. 4. Форма для задания погодных условий

Котельная		
Изменения расхода, температуры		
Время, сек	Расход, кг/с	Темп.-ра, °C
<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="60.167222222"/>	<input type="text" value="83"/> <input type="button" value="+"/> <input type="button" value="-"/>

Рис. 5. Форма для задания характеристики теплоносителя на выходе с котельной

## 6. Апробация виртуального стенда

В качестве объекта исследования была взята одна из действующих теплосетей закрытого типа г. Лысьвы (рис. 6). Теплосеть состоит из одной котельной и подключенных к ней 25 потребителей тепла (МКД) через соединительные узлы теплосети (ТК) в количестве 26 штук. Следовательно, для построения полнофункциональной модели данной теплосети нужно определить значения суммарного термического сопротивления для 51 участка.

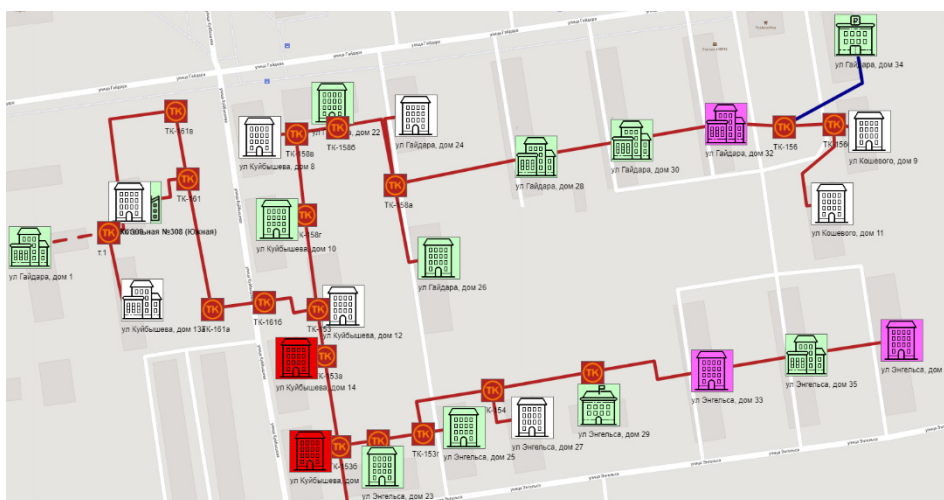


Рис. 6. Рассматриваемая теплосеть

Апробация работы стенда была проведена на базе данных, представленных ООО «СофтМ», по теплосети г. Лысьвы Пермского края.

Вычисление суммарных термических сопротивлений предполагалось проводить на основе данных, предоставляемых с ОДПУ. Однако не во всех домах, подключенных к теплосети, установлены ОДПУ. Исходя из этого, ввиду отсутствия данных по ряду МКД было решено

задать примерные данные по расходу, схожие с аналогичными у МКД. В качестве снимаемых значений температуры теплоносителя задавалось нормативное значение из температурного графика с учетом допустимого отклонения не более 5 %.

Были проведены расчеты по определению суммарных термических сопротивлений на основе осредненных данных, полученных 05.02.2019 г. за период времени с 1:06 до 1:36 ч. Данный временной интервал выбран с учетом инерционности сети, составляющей 18 мин, при учете неизменности погодных условий в заданный промежуток времени и до начала периода осреднения.

На основе вычисленных значений суммарных термических сопротивлений были проведены расчеты по определению температуры в МКД с учетом усредненных данных, полученных 05.03.2019 г. с 6:40 до 8:20 ч. Временной интервал был также выбран с учетом вышесказанных соображений. Для сравнительного анализа результаты расчета сведены в таблицу.

#### Сравнение результатов

МКД	Температура с ОДПУ	Температура вычисленная	Разница	
			Градусы	Проценты
Гайдара, 1	77,9625	78,233 434 09	2,27	2,91
Гайдара, 22	76,511 25	78,538 450 9	2,03	2,65
Гайдара, 26	76,494 285 71	78,654 557 06	2,16	2,82
Гайдара, 28	75,631 25	77,846 215 7	2,21	2,93
Гайдара, 30	76,195	78,122 501 53	1,93	2,53
Гайдара, 32	75,988 75	77,897 294 94	1,91	2,51
Куйбышева, 8	76,271 25	78,261 401 09	1,99	2,61
Куйбышева, 10	76,566 25	78,742 516 93	2,18	2,84
Куйбышева, 14	76,508 75	78,802 990 73	2,29	3,00
Куйбышева, 16	76,66	79,057 376 49	2,40	3,13
Энгельса, 18	76,48	78,600 364 67	2,12	2,77
Энгельса, 22	75,546 25	78,573 796 12	3,03	4,01
Энгельса, 23	76,507 5	78,876 773 82	2,37	3,10
Энгельса, 25	76,275	78,554 994 16	2,28	2,99
Энгельса, 29	76,467 142 86	78,432 361 12	1,97	2,57
Энгельса, 33	76,48625	78,652 376 28	2,17	2,83
Энгельса, 35	76,41625	79,008 915 39	2,59	3,39
Энгельса, 37	75,75	78,238 607 13	2,49	3,29

Как видно из таблицы, наибольшее отклонение вычисленных значений температуры от фактически замеренных составило 4,01, или 3,03 °С. Данные показатели говорят о достоверности созданной виртуальной модели теплосети в рамках допустимых ограничений в 5 %.

### **Заключение**

Таким образом, в рамках выполненной работы реализован виртуальный стенд городской сети теплоснабжения в условиях неполноты данных с обозначенным функционалом.

Разработан алгоритм поиска суммарных термических сопротивлений на основе метода Нелдера – Мида. Проведена верификация получаемых значений с помощью созданного виртуального стенда с данными, получаемыми с ОДПУ. Погрешность вычислений по виртуальному стенду составила менее 5 %.

Созданный стенд позволяет прогнозировать поведение сети теплоснабжения, что положительным образом может сказаться на эффективности управления конкретной городской сетью теплоснабжения.

В дальнейшем планируется проведение дополнительных численных экспериментов и усовершенствование методики определения суммарных термических потерь с целью снижения погрешности вычислений.

### **Список литературы**

1. Единая межведомственная информационно-статистическая система (ЕМИСС) [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.fedstat.ru/indicator/58506> (дата обращения: 01.06.2021).
2. Вафин Д.Б. Теплоснабжение и тепловые сети: учеб. пособие / Нижнекам. хим.-технол. ин-т (филиал) ФГБОУ ВПО «КНИТУ». – Нижнекамск, 2014. – 228 с.
3. Миргородский А.И. О температурных графиках [Электронный ресурс] // Новости теплоснабжения. – 2018. – № 8 (216). – URL: <http://www.rosteplo.ru/nt/216> (дата обращения: 01.06.2021).
4. Иванов В.Д. Системы теплоснабжения предприятий: учеб.-метод. пособие для самост. подготовки и выполнения контр. и курсов. раб. / СПбГТУРП. – СПб., 2014. – 118 с.
5. Соколов Е.Я. Теплофикация и тепловые сети: учеб. для вузов. – М.: Изд. дом МЭИ, 2001. – 472 с.
6. Амосов Н.Т. Теплофикация и теплоснабжение: учеб. пособие. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2010. – 237 с.

7. Тихомиров К.В., Сергеенко Э.С. Теплотехника, теплогазоснабжение и вентиляция. – М.: Стройиздат, 1991. – 416 с.
8. Гидравлический расчет тепловых сетей промпредприятий: метод. указ. к практическим занятиям и курсовому проектированию по источникам и системам теплоснабжения промпредприятий для студентов специальностей 140104, 140106 и других специальностей / сост. Т.С. Бакрунова, С.В. Елфинов; Самар. гос. техн. ун-т. – Самара, 2011. – 24 с.
9. Тихомиров А.К. Теплоснабжение района города: учеб. пособие. – Хабаровск: Изд-во Тихоокеан. гос. ун-та, 2006. – 135 с.
10. Гидравлика и гидропривод в примерах и задачах: учеб. пособие. / Г.Я. Суров, А.Н. Вихарев, И.И. Долгова, В.А. Барабанов; Север. (Аркт.) федер. ун-т. – 2-е изд., перераб. и доп. – Архангельск, 2010. – 338 с.
11. Соколов Е.Я. Теплофикация и тепловые сети: учеб. для вузов. – 9-е изд., стереотип. – М.: Изд. дом МЭИ, 2009. – 472 с.
12. Лемешко Б.Ю. Методы оптимизации: конспект лекций. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2009. – 126 с.
13. Метод Нелдера – Мида [Электронный ресурс]. – URL: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Метод\\_Нелдера\\_—\\_Мида](https://ru.wikipedia.org/wiki/Метод_Нелдера_—_Мида) (дата обращения: 10.04.2021).
14. Работа с JSON [Электронный ресурс]. – URL: <https://developer.mozilla.org/ru/docs/Learn/JavaScript/Objects/JSON> (дата обращения: 15.04.2021).
15. Бобылев В.Н. Физические свойства наиболее известных химических веществ: справ. пособие / РХТУ им. Д.И. Менделеева. – М., 2003. – 24 с.

## References

1. Edinaia mezhvedomstvennaia informatsionno-statisticheskaiia sistema (EMISS), available at: <https://www.fedstat.ru/indicator/58506> (accessed 01 June 2021).
2. Vafin D.B. Teplosnabzhenie i teplovye seti: uchebnoe posobie [Heat supply and heating systems: a tutorial]. Nizhnekamsk: Nizhnekamsk Institute of Chemistry and Technology, 2014. 228 p.
3. Mirgorodskii A.I. O temperaturnykh grafikakh [About temperature charts]. *Novosti teplosnabzheniia*, 2018, no. 8, available at: <http://www.rosteplo.ru/nt/216> (accessed 01 June 2021).
4. Ivanov, V.D. Sistemy teplosnabzheniia predpriatii: uchebno-metodicheskoe posobie dlia samostoitel'noi podgotovki i vypolneniia kontrol'nykh i kursovoi rabot [Enterprises heat supply systems: a teaching aid for self-preparation and performance of control and coursework]. St. Petersburg: Saint Petersburg State Technological University of Plant Polymers, 2014. 118 p.
5. Sokolov, E.Ia. Teplofikatsiia i teplovye seti: Ucheb. dlia vuzov [Heat supply and heating systems: a tutorial]. Moscow: Power Engineering Institute, 2001. 472 p.

6. Amosov N.T. *Teplofikatsiia i teplosnabzhenie: ucheb. posobie* [District heating and heat: tutorial]. St. Petersburg: St. Petersburg Polytechnic University, 2010. 237 p.

7. Tikhomirov K.V. *Teplotekhnika, teplogazosnabzhenie i ventiliatsiia* [Heat engineering, heat and gas supply and ventilation]. Moscow: Stroiizdat, 1991. 416 p.

8. Bakrunova, T.S., Elfimov S.V. *Gidravlicheskii raschet teplovykh setei prompredpriatii: metod. ukaz. k prakticheskim zaniatiiam i kursovomu proektirovaniu po istochnikam i sistemam teplosnabzheniia prompredpriatii dlia studentov spetsial'nostei 140104,140106 i drugikh spetsial'nostei* [Hydraulic calculation of industrial enterprises heating systems: method. decree. to practical studies and course design on sources and systems of heat supply for industrial enterprises for students of specialties 140104, 140106 and other specialties]. Samara: Samara State Technical University, 2011. 24 p.

9. Tikhomirov A. K. *Teplosnabzhenie raiona goroda: ucheb. posobie* [Heat supply of the city district: a tutorial]. Khabarovsk: Pacific National University, 2006. 135 p.

10. Surov G.Ia., Vikharev A.N., Dolgova I.I., Barabanov V.A. *Gidravlika i gidroprivod v primerakh i zadachakh: ucheb. posobie, 2-e izd., pererab. i dop.* [Hydraulics and hydraulic drive in examples and tasks: a tutorial]. Arkhangelsk: Northern (Arctic) Federal University, 2010. 338 p.

11. Sokolov E.Ia. *Teplofikatsiia i teplovye seti: uchebnik dlia vuzov, 9th izd., stereot* [District heating and heating systems: a textbook for universities]. Moscow: Power Engineering Institute, 2009. 472 p.

12. Lemeshko, B.Iu. *Metody optimizatsii: Konspekt leksii* [Optimization techniques: Lecture notes]. Novosibirsk: Novosibirsk State Technical University, 2009. 126 p.

13. *Metod Nelder–Mida* [Nelder–Mead method], available at: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Метод\\_Нелдера\\_—\\_Мида](https://ru.wikipedia.org/wiki/Метод_Нелдера_—_Мида) (accessed 10 April 2021).

14. *Rabota s JSON* [Working with JSON], available at: <https://developer.mozilla.org/ru/docs/Learn/JavaScript/Objects/JSON> (accessed 15 April 2021).

15. Bobylev V. N. *Fizicheskie svoistva naibolee izvestnykh khimicheskikh veshchestv: Spravochnoe posobie* [The Physical Properties of the Most Known Chemicals: A Reference Guide]. Moscow: Mendeleev University of Chemical Technology, 2003. 24 p.

Статья получена: 12.08.2021

Статья принята: 16.09.2021

### Сведения об авторе

**Банников Руслан Юрьевич** (Пермь, Россия) – старший преподаватель кафедры «Вычислительная математика, механика и биомеханика», Пермский национальный исследовательский политехнический университет (614990, Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: bannikov.ru@inbox.ru).

### About the author

**Ruslan Yu. Bannikov** (Perm, Russian Federation) – Senior Lecturer, Department of Computational Mathematics, Mechanics and Biomechanics, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, e-mail: bannikov.ru@inbox.ru).

### Библиографическое описание статьи согласно ГОСТ Р 7.0.100–2018:

**Банников, Р.Ю.** Виртуальный стенд городской сети теплоснабжения в условиях неполноты данных / Р.Ю. Банников. – текст : непосредственный. – DOI: 10.15593/2499-9873/2021.3.03 // Прикладная математика и вопросы управления = Applied Mathematics and Control Sciences. – 2021. – № 3. – С. 63–78.

### Цитирование статьи в изданиях РИНЦ:

**Банников, Р.Ю.** Виртуальный стенд городской сети теплоснабжения в условиях неполноты данных // Прикладная математика и вопросы управления. – 2021. – № 3. – С. 63–78. DOI: 10.15593/2499-9873/2021.3.03

### Цитирование статьи в references и международных изданиях

#### Cite this article as:

Bannikov R.Yu. Urban heating system virtual stand under data incomplete conditions. *Applied Mathematics and Control Sciences*, 2021, no. 3, pp. 63-78. DOI: 10.15593/2499-9873/2021.3.03