

**Министерство образования и науки Российской Федерации**

**Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Тульский государственный университет»**

**16+**  
**ISSN 2071-6168**

**ИЗВЕСТИЯ  
ТУЛЬСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО  
УНИВЕРСИТЕТА**

**ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ**

**Выпуск 10**

**Тула  
Издательство ТулГУ  
2018**

Председатель

*Грязев М.В.*, д-р техн. наук, проф., ректор Тульского государственного университета.

Заместитель председателя

*Воротилин М.С.*, д-р техн. наук, проф., проректор по научной работе.

Ответственный секретарь

*Фомичева О.А.*, канд. техн. наук, доц., начальник Управления научно-исследовательских работ.

Главный редактор

*Прейс В.В.*, д-р техн. наук, проф., заведующий кафедрой.

**Члены редакционного совета:**

*Батанина И.А.*, д-р полит. наук, проф., –

отв. редактор серии «Гуманитарные науки»;

*Берестнев М.А.*, канд. юрид. наук, доц., –

отв. редактор серии «Экономические и юридические науки». Часть 2. «Юридические науки»;

*Борискин О.И.*, д-р техн. наук, проф., –

отв. редактор серии «Технические науки»;

*Егоров В.Н.*, канд. пед. наук, доц., –

отв. редактор серии «Физическая культура. Спорт»;

*Заславская О.В.*, д-р пед. наук, проф., –

отв. редактор серии «Педагогика»;

*Качурин Н.М.*, д-р техн. наук, проф., –

отв. редактор серии «Науки о Земле»;

*Понаморева О.Н.*, д-р хим. наук, доц., –

отв. редактор серии «Естественные науки»;

*Сабинина А.Л.*, д-р экон. наук, доц., –

отв. редактор серии «Экономические и юридические науки». Часть 1. «Экономические науки».

**РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:**

Ответственный редактор

*Борискин О.И.*, д-р техн. наук (ТулГУ, г. Тула).

Заместитель ответственного редактора

*Ларин С.Н.*, д-р техн. наук (ТулГУ, г. Тула).

Ответственный секретарь

*Яковлев Б.С.*, канд. техн. наук (ТулГУ, г. Тула).

**Члены редакционной коллегии:**

*Александров А.Ю.*, д-р техн. наук (Ковровская государственная технологическая академия им. В.А. Дегтярева, г. Ковров);

*Баласанян Б.С.*, д-р техн. наук (Государственный инженерный университет Армении, г. Ереван, Армения);

*Васин С.А.*, д-р техн. наук (ТулГУ, г. Тула);

*Дмитриев А.М.*, д-р техн. наук (Московский государственный технический университет «СТАНКИН», г. Москва);

*Запомель Я.*, д-р техн. наук (Технический университет Острова, г. Острада, Чехия);

*Ковалев Р.А.*, д-р техн. наук (ТулГУ, г. Тула);

*Колтунович Т.Н.*, д-р техн. наук (Люблинский технологический университет, г. Люблин, Польша);

*Кристалль М.Г.*, д-р техн. наук (Волгоградский государственный технический университет, г. Волгоград);

*Ларкин Е.В.*, д-р техн. наук (ТулГУ, г. Тула);

*Мельников В.Е.*, д-р техн. наук (Национальный исследовательский университет «МАИ», г. Москва);

*Мещеряков В.Н.*, д-р техн. наук (Липецкий государственный технический университет, г. Липецк);

*Мозжечков В.А.*, д-р техн. наук

(АО «Тулаэлектропривод», г. Тула);

*Распопов В.Я.*, д-р техн. наук (ТулГУ, г. Тула);

*Савин Л.А.*, д-р техн. наук (Орловский государственный технический университет, г. Орел);

*Семилет В.В.*, д-р техн. наук (АО «Конструкторское бюро приборостроения», г. Тула);

*Сорокин П.А.*, д-р техн. наук (Российский университет транспорта «МИИТ», г. Москва);

*Степанов В.М.*, д-р техн. наук (ТулГУ, г. Тула);

*Сычужов А.А.*, канд. техн. наук (ТулГУ, г. Тула);

*Трегубов В.И.*, д-р техн. наук (АО «НПО «СПЛАВ», г. Тула);

*Чуков А.Н.*, д-р техн. наук (ТулГУ, г. Тула);

*Яцун С.Ф.*, д-р техн. наук (Юго-Западный государственный университет, г. Курск).

Сборник зарегистрирован в Федеральной службе по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор). ПИ № ФС77-611104 от 19 марта 2015 г.

Подписной индекс сборника 27851 по Объединённому каталогу «Пресса России».

Сборник включен в «Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы научные результаты диссертаций на соискание учёной степени кандидата наук, на соискание учёной степени доктора наук», утвержденный ВАК Минобрнауки РФ.

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ АНАЛИЗА ДОСТАТОЧНОСТИ СИСТЕМ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ МЕГАПОЛИСОВ НА ОСНОВЕ РАСЧЁТА ТЕПЛОВЫХ КАРТ В УСЛОВИЯХ НЕДОСТАТОЧНОСТИ ДАННЫХ

Е.Г. Гашо, С.В. Гужов, С.В. Макрушин

*Предложен подход к созданию математической модели системы тепловой сети на базе пространственных геоинформационных систем. Рассмотрена реализация алгоритма на основе мегаполисов Новосибирск и Воронеж. Получены графы систем теплоснабжения. Сделаны выводы о целесообразности применения и области использования расчётных тепловых карт.*

*Ключевые слова: система теплоснабжения, прогнозирование, граф, тепловая карта.*

**1. Введение.** Формирование перспективных схем, программ и планов развития систем теплоснабжения крупных городов является комплексной задачей, требующей к привлечению специалистов из областей градостроительства, энергетики, социологии, экологии, климатологии и др. Схемам, разработанным для большинства городов России, присущи два основных недостатка. Первый состоит в низком качестве исходного материала, и, как следствие, результата. Второй заключается в отсутствии адекватной и достаточной математической модели системы тепловой сети, позволяющей анализировать и планировать изменения.

Выбор источника данных при создании математической модели является важнейшим элементом эмпирических исследований. Спецификой систем городского теплоснабжения является необходимость иметь исходные данные с геопространственной привязкой. В частности, необходима информация о фактической застройке и перспективах развития городов и информация о расположении на их территории объектов теплоэнергетической инфраструктуры [1, 2]. В связи с этим в качестве базового источника данных в исследовании выступает геоинформационная система (ГИС). Вопросам формирования массивов исходных данных [3] и их последующей обработки посвящена данная статья.

### **2. Алгоритм создания математической модели на базе геоданных**

Существует несколько открытых массивов геопространственных данных, содержащих подробную информацию об объектах городской застройки на уровне конкретных зданий, и большое количество аналогичных частных баз геоданных, доступ к которым возможен на платной основе. Так как полнота, точность, актуальность информации о зданиях крупных российских городов [4, 5, 6], содержащейся в открытой базе геоданных OpenStreetMap, вполне соответствует поставленным целям, то было принято решение использовать данный бесплатный открытый источник. Кроме открытых геоданных из OpenStreetMap для сбора информации о топологической и пространственной структуре теплоэнергетической инфраструктуры использовалась информация из официальных документов (и проектов официальных документов), описывающих развитие городских теплосетей, в частности из следующих: «Схема теплоснабжения города Нижнего Новгорода на период с 2012 года до 2027 года» (проект), «Электронная модель системы теплоснабжения г. Нижнего Новгорода» (ОАО «Газпром промгаз»), «Схема теплоснабжения городского округа город Воронеж на период до 2030 года», «Схема теплоснабжения городского округа город Воронеж» (проект), «Схема теплоснабжения города Новосибирска до 2030 года» (проект). Из данных источников ис-

пользовалась информация, приведенная на картах-схемах и в сводных списках и таблицах, отражающих состав ключевых объектов теплоснабжения города – ТЭЦ и котельных, работающих в рамках городских сетей теплоснабжения.

Разработанную в рамках исследования технологию формирования блока данных, отвечающих за пространственную модель ключевого драйвера спроса на тепловую энергию, можно представить в виде 6 шагов.

1. Выгрузка информации по всем непромышленным зданиям. Важным аспектом является фильтрация зданий, относящихся к городу, от зданий, находящихся за пределами административных границ города.

2. Извлечение и актуализация для алгоритма следующей информации: этажность здания, площадь здания на местности, центр масс вершин для получения ориентировочного расположения здания и последующего кодирования его в виде одной точки с географическими координатами.

3. Интерполяция этажности и иных атрибутов для зданий, демонстрирующих неточность либо недостаточность исходных данных.

4. Расчёт суммарной площади и иных факторов для подготовки массива исходных данных.

5. Визуализация массива данных в QGIS.

6. Формирование тепловой карты, демонстрирующей пространственное распределение плотности площади непромышленных зданий.

Все шесть шагов, необходимые для построения второго блока данных модели, были выполнены для каждого из двух рассматриваемых городов.

### **3. Результаты создания цифровой модели геопространственных данных о теплоэнергетической инфраструктуре для г. Новосибирски Воронеж**

В соответствии с документами к схеме теплоснабжения города Новосибирска в модели пространственной топологии городских теплосетей Новосибирска отображено 57 узлов, 4 из которых являются ТЭЦ (таблица).

#### ***Координаты, полученные с помощью сервиса геокодирования Яндекс.Карт для ТЭЦ и котельных Новосибирска***

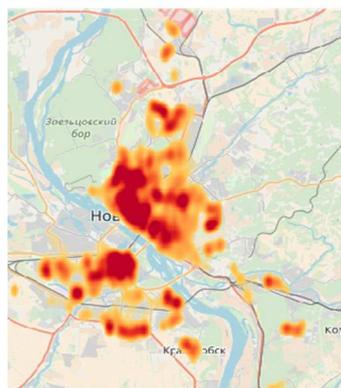
id	Label	lon	lat
0	Аргунский пер., 20	82.833742	54.953954
1	Котельная Новосибирского ЭРЗ филиала ОАО «Желдормаш»/ Новосибирск – 37, а/я 12	83.048781	54.969383
2	КРК цех №1	82.863180	54.952356
3	Мочищенское шоссе, 10	82.903667	55.077112
4	Мочищенское шоссе, 12	82.904449	55.076623
5	НОК	82.935063	54.960907

Граф теплоснабжения на карте города (рис. 1) содержит 54 связи при 57 узлах. Полученные связи были обработаны скриптом на языке Python для подготовки файлов для переноса графа в gexf-файл, т.е. для построения графа теплосети. Для изучения специфики потребления тепла были получены все здания города с помощью OpenStreetMap в геоинформационной системе QGIS (рис. 2).

Для построения данной модели использовались следующие данные о зданиях из OpenStreetMap: тип здания, этажность, координаты. Большую точность информации о жилых домах можно было бы получить при помощи ГИС ЖКХ, так как для большей части жилых зданий не пришлось бы интерполировать их этажность и оценивать площадь здания. К сожалению, на данный момент доступ к этой информации затруднен. Также для построения тепловой карты необходимо найти площадь каждого полигона и его центр. В итоге было получено 56 068 зданий на территории Новосибирска и близ него.



**Рис. 1. Полученный граф теплотсети Новосибирска**



**Рис. 2. Теплокарта плотности застройки Новосибирска**

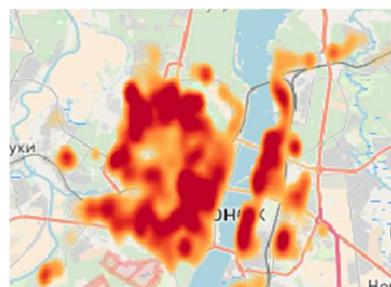
Выделенные тепловой картой зоны (рис. 3) совпадают с областью, где расположено большинство узлов графа теплотсети. Именно в зонах, где сконцентрирован спрос на тепловую энергию, находятся ТЭЦ города (в частности, ТЭЦ-2 на западном побережье). Следовательно модернизация системы теплоснабжения Новосибирска в части создания новых теплогенерирующих мощностей не требуется.

Модель пространственной топологии, сформированная для городских теплотсетей Воронежа, включает 130 узлов. Из них 2 ТЭЦ, остальные – котельные. В соответствии с вышеприведённым алгоритмом получен граф, содержащий 125 связей (рис. 3). Пространственная модель ключевого драйвера спроса на тепловую энергию получена из координат всех зданий города в той же последовательности: получение данных о полигонах из OpenStreetMap, преобразование полученных данных в компактный вид, нанесение объектов на карту в виде точек, построение по полученным данным тепловой карты (рис. 4).

Большая часть теплопотребления находится на западном побережье реки, что коррелирует с графом теплотсети, полученным в предыдущем шаге, т.к. именно в этой зоне наибольшая плотность котельных. Таким образом, тепловая карта плотности застройки Воронежа не противоречит схеме размещения действующих теплогенерирующих мощностей. Следовательно, численность котельных и структура тепловых сетей с точки зрения достаточности по тепловой карте города достаточна.



**Рис.3. Граф теплотсети Воронежа на карте**



**Рис.4. Тепловая карта плотности застройки Воронежа**

**5. Заключение.** Предложенный в статье подход к формированию графов и тепловых карт позволяет провести анализ систем тепловых сетей городов в условиях недостаточности данных. Алгоритм, реализованный на примерах мегаполисов Воронеж и новосибирск, позволил выявить корреляцию между существующей тепловой сетью и потребностью в спросе тепловой энергии, полученной при анализе теплокарты. Данный подход может быть использован также и для прогнозирования изменения спроса на тепловую энергию посредством введения в модель данных о расширении городской застройки и о предполагающейся реновации жилых кварталов.

Работа выполнена при поддержке Российского Научного Фонда, проект № 19-10568: «Исследование общих закономерностей и особенностей развития городских энергосистем в различных социально-экономических и природно-климатических условиях».

### Список литературы

1. Гашо Е.Г. Энергетическая и климатическая стратегия Москвы: поиск разумного симбиоза. Энергосбережение, №2, 2018. С. 4-10.
2. Гашо Е.Г. Приоритеты устойчивого развития Москвы: энергоэффективность, снижение уязвимости, климатическая адаптация. Доклад на конференции «Экологические проблемы Московского региона». 25.10.2017.
3. Гужов С.В. Система энергетического менеджмента: внедрение и управление: монография / С.В. Гужов, Б.М. Мельничук, И.В. Петров. М.: Издательство МЭИ, 2018. 236 с.
4. Гашо Е.Г., Тихоненко Ю.Ф. Энергосбережение в Москве: от принятия Концепции к системе мер в городской целевой программе / Энергосбережение, 2008. № 12. С.2-10.
5. Бушуев В.В., Ливинский П.А. Актуализация энергетической стратегии Москвы на период до 2030 года// Энергетическая политика. 2015. Вып.6.
6. Гашо Е.Г., Гужов С.В., Кролин А.А., Началов А.В. Расчет ущербов электротехнического комплекса московского мегаполиса от опасных климатических изменений // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2018. Вып. 4. С.439-450.

*Гашо Евгений Геннадиевич, канд. техн. наук, доцент, [290461@bk.ru](mailto:290461@bk.ru), Россия, Москва, НИУ «МЭИ»,*

*Гужов Сергей Владимирович, канд. техн. наук, заместитель начальника отдела энергоменеджмента, [guzhovsv@yandex.ru](mailto:guzhovsv@yandex.ru), Россия, Москва, НИУ «МЭИ»,*

*Макрушин Сергей Вячеславович, канд. физ.-мат. наук, вед. науч. сотр., [svmakrushin@fa.ru](mailto:svmakrushin@fa.ru), Россия, Москва, Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации*

### **MATHEMATICAL MODEL FOR THE ANALYSIS OF THE ADEQUACY OF HEAT SUPPLY SYSTEMS FOR MEGACITIES BASED ON THE CALCULATION OF HEAT MAPS IN CONDITIONS OF INSUFFICIENT DATA**

*E.G. Gasho, S.V. Guzhov, S.V. Makrushin*

*An approach to the development of a mathematical model of a heat network system based on spatial geoinformation systems is proposed. The implementation of the algorithm based on megacities Novosibirsk and Voronezh is considered. Graphs of heat supply systems have been obtained. Conclusions are made about the expediency of using and the field of use of design thermal cards.*

*Key words: heat supply system, forecasting, graph, heat map.*

*Gasho Eugeny Gennadievich, candidate of technical sciences, docent, [290461@bk.ru](mailto:290461@bk.ru), Russia, Moscow, NRU "MPEI",*

*Guzhov Sergey Vladimirovich, candidate of technical sciences, Deputy Head of the Energy Management Department, [guzhovsv@yandex.ru](mailto:guzhovsv@yandex.ru), Russia, Moscow, NRU "MPEI",*

*Makrushin Sergey Vyacheslavovich, candidate physics and mathematics, Leading Researcher, [svmakrushin@fa.ru](mailto:svmakrushin@fa.ru), Russia, Moscow, Financial University under the Government of the Russian Federation*