

Составление прогнозного топливно-энергетического баланса котельной в условиях недостаточности данных

канд. техн. наук, доц. Гужов С.В.

д-р техн. наук, доц. Гашо Е.Г.

студент Шепель В.А.

Национальный исследовательский университет "МЭИ", г. Москва

Аннотация. Задача составления прогнозного топливно-энергетического баланса для источников тепловой энергии в условиях недостаточности данных является актуальной особенно для устаревших котельных. Технически изношенные системы сложнее поддаются формульному описанию из-за существенного отклонения теплотехнических характеристик изолирующих конструкций от нормативных значений. Физический износ котельного оборудования приводит к увеличению выбросов парниковых газов в атмосферу. Таким образом, при решении вопросов о целесообразности выделения средств для модернизации источников тепловой энергии, а также для проведения периодических наладочных работ и целью снижения выбросов в атмосферу вредных веществ необходимо опираться на достаточно полную математическую модель котельной и тепловой сети. Однако сформулировать достоверную модель достаточно сложно в силу существенного недостатка данных. Определение состояния каждого из элементов системы представляет трудоёмкую и затратную задачу. Ещё одной чрезвычайно трудоёмкой задачей является определения прогнозного спроса на тепловую энергию муниципальных потребителей и сферы ЖКХ. Физически изношенные здания характеризуются пониженным тепловым сопротивлением, что приводит к увеличению спроса на тепло. Расчёт необходимых объёмов генерации тепловой энергии изношенными котельными в районы города с физически изношенными зданиями существенно затруднён в виду отсутствия целого ряда данных как о состоянии котельной, так и о состоянии сетей, так и о состоянии отапливаемых зданий. В работе показан способ составления предиктивного энергобаланса только посредством статистических методов обработки информации.

Ключевые слова: модернизация, дымовые газы, система теплоснабжения, прогноз теплопотребления, математическое моделирование, регрессионный анализ, мультиколлинеарность, Прогнозирование расхода тепловой энергии

Реализация политики по модернизации старых котельных требует проведение предварительной оценки не только технического и экономического эффекта модернизации. Сложность подобного расчёта состоит в том, что существующие старые котельные часто работают в режимах, далёких от паспортных. Рассмотрим насколько сильно работа данных котельных на мазутном топливе оказывает влияние на текущую экологическую ситуацию а также эффект от перевода источника тепла на современные технологии. Дополнительная актуальность вопроса состоит в снижении экологической нагрузки. С дымовыми газами котельных в воздушный бассейн выбрасывается большое число твердых и газообразных загрязнителей, среди которых такие вредные вещества как зола, оксиды углерода, серы и азота. Помимо этого, в воздушный бассейн попадает огромное количество диоксида углерода и водяных паров. Прогнозирование с инженерной точностью технического и экологического эффектов от модернизации подобных теплоисточников – сложная задача, особенно в условиях существенной недостаточности и частичной недостоверности исходной информации.

Достоверный расчёт целесообразности модернизации позволит повысить качество теплоснабжения, надежность системы, снизить темпы роста тарифов на тепловую энергию, улучшить существующую экологическую ситуацию.

Цель работы состоит в расчёте с заданной точностью технико-экологического эффекта при модернизации существующей морально и физически изношенной системы теплоснабжения городского поселения.

1. Текущая экологическая составляющая

Реализация политики по модернизации старых котельных требует проведение предварительной оценки не только технического и экономического эффекта модернизации. Особый вопрос – снижение экологической нагрузки. Сложность подобного расчёта состоит в том, что существующие старые котельные часто работают в режимах, далёких от паспортных. Рассмотрим насколько сильно работа данных котельных на мазутном топливе оказывает влияние на текущую экологическую ситуацию а также эффект от перевода источника тепла на современные технологии. С дымовыми газами котельных в воздушный бассейн выбрасывается большое число твердых и газообразных загрязнителей, среди которых такие вредные вещества как зола, оксиды углерода, серы и азота. Помимо этого, в воздушный бассейн попадает огромное количество диоксида углерода и водяных паров.

Диоксид серы, или сернистый ангидрид (сернистый газ) приводит к карликовости деревьев и хлорозу (пожелтению или обесцвечиванию) листьев. У человека этот газ раздражает верхние дыхательные пути.

Оксид (NO) и диоксид (NO_2) азота участвует в образовании фотохимического смога в приземном слое атмосферы. При растворении окислов азота в атмосферной влаге образуются кислоты, которые являются одной из главных причин выпадения "кислых" дождей, приводящих к гибели флоры и фауны. У человека – повышает предрасположенность к острым и хроническим респираторным заболеваниям. В стратосфере закись азота инициирует цепочку реакций, приводящих к истончению озонового слоя, что может привести к раковым заболеваниям кожи у людей [1].

Экологический ущерб приносят твердые отходы зола и шлаки [2]. Несмотря на фильтры, которые на изношенном оборудовании могут быть в неработоспособном состоянии, в атмосферу в виде выбросов ТЭС ежегодно поступает несколько млн. тонн мелкодисперсных аэрозолей, являющихся ядрами конденсации для паров воды и формирования дополнительных осадков. Повышенная концентрация у человека вызывает различные респираторные заболевания.

Сажевые частицы не взаимодействуют с кислородом воздуха, но участвуют в формировании смога и способствуют возникновению рака кожи.

Оксиды углерода (CO и CO_2 – углекислый газ) практически не взаимодействуют с другими веществами в атмосфере и время их существования практически не ограничено. Их избыток в воздухе снижает способность гемоглобина эритроцитов переносить кислород, из-за чего у человека замедляются реакции, ослабляется восприятие, появляются головная боль, сонливость, тошнота. При больших концентрациях может произойти обморок, случиться кома.

При сжигании мазута образуется мазутная зола, в состав которой входят оксиды ванадия (VO , V_2O_5), а также оксиды металлов (SiO_2 , MgO , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , Ni_2O_3 и другие оксиды). В качестве контролирующего показателя принят наиболее токсичный пентаксид ванадия. Нормативами качества воздуха определены допустимые пределы содержания вредных веществ как в производственной, так и в жилой зоне населенных пунктов.

В настоящей статье ставится задача оценка технико-экологического эффекта при модернизации устаревшей системы теплоснабжения. Модернизация позволит повысить качество и надежность системы теплоснабжения, удержать действующие тарифы на тепловую энергию, а также значительно улучшить существующую экологическую ситуацию. Основными предпосылками к модернизации является:

- высокий износ тепловых сетей 1970 года ввода;
- высокая степень физического износа существующего теплоэнергетического оборудования (более 70%);
- истекший расчетный срок службы и низкой эффективности работы основного оборудования;
- подключенная часовая тепловая нагрузка потребителей составляет менее 20% от установленной мощности оборудования, что негативно

сказывается на эффективности и безопасности работы котлоагрегатов котельных;

- высокие выбросы вредных веществ в атмосферу в связи с использованием в качестве топлива – мазута.

2. Описание существующей системы теплоснабжения

Площадь территории административного центра в границах муниципального образования составляет 835,7 тыс. га (43% территории МО «Терский район»), из них земли населенных пунктов - 1,47 тыс. га, в том числе рассматриваемое городское поселение – 1,41 тыс. га. Численность постоянного населения на 1 января 2018 года составила 4578 человек и имеет тенденцию к постепенному снижению (табл. 1).

Таблица 1. Динамика изменения численности населения

Год	1970	1979	1989	2002	2009	2013	2016	2017	2018
Численность населения, чел.	7 268	7699	8 309	6 497	5 442	5 170	4 772	4 658	4578

Климат рассматриваемой территории относится к субарктическому району так как он формируется под воздействием Белого моря и континентальной части Кольского полуострова и характеризуются как приближенный к морскому. Самый тёплый месяц – июль со среднесуточной температурой 14,3°C. Абсолютный максимум +32°C. Абсолютный минимум – минус 40°C. Средняя продолжительность безморозного периода составляет 85-90 дней. По климатическим условиям территория поселения относится к строительному климатическому району II-А. Температура воздуха наиболее холодной пятидневки, обеспеченностью 0,92, принимается минус 29°C, а температура воздуха обеспеченностью 0,94 – минус 17°C. Продолжительность отопительного периода в среднем составляет 263 дня. Среднегодовая температура воздуха составляет 0,5°C. Самый холодный месяц - февраль, со среднесуточной температурой минус 11,9°C (табл. 2).

Таблица 2. Значения среднемесячных температур

Месяц	Январь	Февраль	Март	Апрель	Май	Сентябрь	Октябрь	Ноябрь	Декабрь
Среднемесячная температура, °C	-11,5	-11,9	-6,4	-1,5	4,3	7,5	1,4	-4,4	-8,3

Протяженность тепловых сетей составляет 13,2 км (в двухтрубном исчислении). На данный момент в городском поселении эксплуатируется пять котельных общей мощностью 31,5 МВт.

Утвержденные температурные графики работы источников и тепловых сетей составляют 95/70°C и 130/70°C. Однако математическое моделирование показало, что фактические температурные графики от котельных не соответствуют утвержденному температурному графику тепловой сети 95/70°C (рис. 1) в виду ряда причин, к которым в том числе относятся:

- экономия топлива;
- опасность разрушения оборудования источника теплоснабжения и сетей в виду их существенной изношенности;
- ручное управление процессом выработки тепловой энергии.



Рисунок 1. Вычисленный фактический график отпуска тепловой энергии котельной

Тепловая сеть - закрытая двухтрубная. Выводы из котельной - D219 мм (подающий), D219 мм (обратный) обеспечивают нагрузку отопления и ГВС 2,011 Гкал/ч. Прокладка трубопроводов подземная и надземная. Располагаемый напор составляет 24 м, давление в обратном трубопроводе – 30 м. Расход т/мощности на собственные нужды 0,599 Гкал/ч. Потери тепловой мощности в сетях 1,593 Гкал/ч. За отопительный сезон 2018/19гг. нагрузке передано 22,956 тыс.Гкал. В качестве топлива используется мазут (табл. 3). Объём выбросов в атмосферу оценивается [3] около 5.8млн.т./г.

Таблица 3.
График поставок мазута на котельную в отопительном сезоне 2018-19гг.,
т.н.т./мес.

Июль	Авг.	Сен.	Окт.	Ноя.	Дек.	Янв.	Фев.	Март	Апр.	Май	Июнь
34	46,5	78	125	146	172	191	170	158	140	129	64

Обследование выявило следующие недостатки технологии

1. При выгрузке мазута используется пар, и имеются выбросы в атмосферу легких фракций мазута. В связи со значительным снижением качества мазута имеется проблема запахов, а, следовательно, – выбросов легких углеводородов при разгрузке мазута. При подогреве мазута открытым паром содержание влаги в мазуте резко возрастает, что не только вызывает потери пара и конденсата, но и ухудшает качество самого мазута. В результате снижается коэффициент полезного действия КПД котлоагрегатов и надежность работы котельной. При подогреве в открытых резервуарах вода, содержащаяся в мазуте, вызывает вспенивание.

2. Котельная имеет слабую систему очистки дымовых газов. Ряд высокотоксичных компонентов выбрасывается в атмосферу города – бензопирен, мазутная сажа, окислы азота. Установить газоочистку невозможно из-за высокой коррозионной активности уходящих газов.

3. Используется мазут с содержанием серы более 2%. Сера содержится в мазутах в активной и пассивной форме. Активная сера вызывает коррозию трубопроводов, подогревателей в резервуарах, теплообменников и хвостовых поверхностей нагрева при температурах стенки металла ниже температуры точки росы.

Сложность поставленной задачи состоит в:

- I. невозможности использования для прогноза формульных моделей, т.к. на этапе технико-экономического обоснования составлена функциональная 3D модель тепловой сети [4];
- II. доподлинно неизвестны степени износа каждого элемента основного и вспомогательного оборудования источника теплоснабжения, магистральных трубопроводов, ЦТП и сетей потребителей [5], [6], [7];
- III. неизвестны характеристики ограждающих конструкций отапливаемых зданий и степень их износа, что не позволяет спрос при различных климатических явлениях с приемлемой инженерной точностью [8], [9];
- IV. нельзя в полной мере опираться исключительно на отпуск тепла источником в виду увеличившихся затрат на собственные нужды, и потери, а также из-за погрешностей ручного управления котельной [10], [11];
- V. сложности анализа работы теплоисточника по причине его эксплуатации на отличном от рекомендованного графика отпуска тепловой энергии [12] и пр.

Описанные выше факторы со всей наглядностью не позволяют применять для анализа формульные модели. Следовательно необходимо принять систему рассматриваемой котельной как «чёрный ящик» и исследовать его статистическими методами анализа информации.

3. Выбор метода анализа данных для составления регрессионной модели теплопотребления

Рассмотрим несколько основных методов и моделей, используемых в настоящее время в статистическом подходе при планировании нагрузок в теплоэнергетических системах:

- метод экстраполяции — статистический метод, использующий для прогноза выделение и описание тренда;
- корреляционно-регрессионная модель — статистическая модель, осуществляющая прогноз на основе математического описания существующих между переменными зависимостей;
- нейросетевая модель — нелинейная модель, прогнозирование с помощью которой сводится к получению модели зависимости потребления тепловой энергии от внешних факторов, а также ретроспективных данных [13].

Для прогнозирования энергопотребления рассматриваемого города используется корреляционно-регрессионный анализ в связи со следующими аспектами:

- а) метод основан на учете корреляционных (статистических) взаимосвязей между нагрузками отдельных узлов, обусловленных наличием ряда факторов [14];
- б) непригодность метода экстраполяции режимов работы котельной в виду отсутствия ежегодного и ежемесячного подобия климатических факторов [15];
- в) точность прогноза значительно превышает точность прогноза других моделей;
- г) прогнозирование на базе нейросетевой модели является сложной задачей, требующей анализа BigData, отсутствующей в данном случае.

Выбранный корреляционно-регрессионный анализ основывается на проверке гипотезы о степени тесноты связей между входными и выходными параметрами. Для проверки наиболее часто используются линейный коэффициент корреляции Пирсона или коэффициенты корреляции рангов Спирмэна и Кендэла. Линейный коэффициент корреляции Пирсона - измеритель тесноты линейной связи между двумя количественными признаками x и y . Он основан на предположении, что при полной независимости признаков x и y отклонения значений факторного признака от средней ($\bar{x} - x_i$) носят случайный характер и должны случайно сочетаться с различными отклонениями ($\bar{y} - y_i$). При наличии значительного перевеса совпадений или несовпадений таких отклонений делается предположение о наличии связи между x и y .

Коэффициенты корреляции рангов основаны на корреляции не самих значений коррелируемых признаков, а их рангов — порядковых номеров, присваиваемых отдельно каждому индивидуальному значению x и y в ранжированном ряду. Формула расчета коэффициента корреляции рангов Кендэла (τ) для связанных рангов:

$$\tau = \frac{S}{\sqrt{\left(\frac{n \cdot (n-1)}{2} - U_x\right) \cdot \left(\frac{n \cdot (n-1)}{2} - U_y\right)}} \quad (1)$$

где S — фактическая общая сумма баллов при оценке +1 каждой пары рангов с одинаковым порядком изменения и при оценке -1 каждой пары рангов с обратным порядком изменения; $U_x = U_y = 0,5 \cdot \sum [t \cdot (t - 1)]$ - число баллов, корректирующих (уменьшающих) максимальную сумму баллов за счет повторений (объединений) t рангов в каждом ряду.

С помощью рассмотренных коэффициентов можно доказать наличие связи, установить ее направление и степень тесноты, но нельзя определить значимость изучаемого фактора среди других факторов.

Степень соответствия прогнозной модели и реального поведения объекта целесообразно оценивать посредством коэффициента детерминации. При $R^2=1$ можно сделать вывод о наличии функциональной зависимости между входными и выходными переменными; при $R^2=0$ — об её отсутствии. Если $0 < R^2 < 1$, то чем ближе R^2 к 1, тем лучше качество аппроксимации функции к исходным данным. Величина R^2 возрастает при добавлении еще одного регрессора, поэтому при выборе между несколькими регрессионными уравнениями не следует полагаться только на коэффициент детерминации R^2 для исключения чего используют формулу:

$$R^2 = 1 - \frac{ESS/(N-k-1)}{NSS/(N-1)} \quad (2)$$

где в числителе — несмещенная оценка дисперсии ошибок, в знаменателе — несмещенная оценка дисперсии Y ; TSS (Total Sum of Squares) — вся дисперсия или вариация Y , характеризующая степень случайного разброса значений функции регрессии около среднего значения Y ; ESS (Error Sum of Squares) — сумма квадратов остатков регрессии.

Особенностью предлагаемого метода является введение в массив исходных данных фактора «идеализированное теплотребление», которое определяется посредством классического формульного математического аппарата. Данная мера позволяет как повысить точность статистического расчёта, так и наглядно определить отклонение фактического режима эксплуатации объекта от рекомендованного.

4. Прогнозирование расхода тепловой энергии

В качестве тестовой выборки для построения модели использованы данные о потреблении тепловой энергии за каждые 3 часа в период с 01.06.2018 по 31.05.2019. Составляемая регрессионная модель не предполагает описание летнего периода, когда котельные отпускают тепло в режиме ГВС. Подбор параметров и выбор наилучшей модели осуществлялись в среде EXEL. Процесс прогнозирования фактического теплотребления включает в себя следующие этапы:

- а) анализ исходной информации и отсев таких недостоверных данных, как единичные необъяснимые выбросы или провалы теплотребления;

ошибки в размерностях; отсутствие показаний приборов учёта и мониторинга и пр.

- б) определение значений фактической и «идеализированной» выработки тепловой энергии для исследуемой системы теплоснабжения за выбранный период времени;
- с) определение набора факторов, по мнению эксперта оказывающих влияние на значение теплопотребления и отсев некоторых из них по критериям коллинеарности и мультиколлинеарности;
- д) формулирование прогнозной математической функции или группы предиктивных правил;
- е) определение значений всех входных факторов на прогнозируемом временном промежутке, либо диапазонов их значений по принципу: «оптимистичный», «нейтральный», «пессимистичный» прогнозы.
- ф) определение прогнозных значений теплопотребления с учетом всех выбранных факторов и периодов.

В качестве факторных признаков принимаются: Наружная температура воздуха (X_1); Атмосферное давление на уровне станции (X_2); Относительная влажность на высоте 2 м, % (X_3); Направление ветра, в румбах (X_4); Скорость ветра, м/с (X_5); Общая облачность (X_6); Количество всех наблюдающихся облаков (X_7); Температура точки росы на высоте 2м (X_8); Количество выпавших осадков, мм (X_9). В качестве результативного признака принимается суммарный расход тепловой энергии.

Формульный расчёт «идеализированного» отпуска тепловой энергии производится по формуле:

$$Q_{\text{ФОРМ}} = G_{\text{ПОД}} \cdot C_p \cdot (t_{\text{ПОД}} - t_{\text{ОБР}}) \quad (3)$$

где $C_p=1,001 \text{ ккал/кг} \cdot \text{К}$, $G_{\text{ПОД}}$ - расход теплоносителя в подающем трубопроводе кг/ч; $t_{\text{ПОД}}$ и $t_{\text{ОБР}}$ - температура теплоносителя в подающем и обратном трубопроводе.

Нахождение парных коэффициентов корреляции выполняется по t-критерию Стьюдента:

$$t_{\text{НАБЛ}} = \frac{r \cdot \sqrt{n-2}}{\sqrt{1-r^2}} \quad (4)$$

где r – парный коэффициент корреляции, рассчитанный по отобранным для исследования данным, n - количество наблюдений.

Для нахождения $t_{\text{крит}}$ по таблице Стьюдента принят уровень значимости $\alpha=5\%$ (доверительная вероятность 95). Для проверки на статистическую значимость сравним $t_{\text{крит}}=-1,646$ и парные коэффициенты корреляции, вычисленные посредством EXEL. Факторы X_6 , X_9 - статистически не значимы и исключаются из дальнейшего анализа

Проверка предположения мультиколлинеарности входных факторов по методу Фаррара-Глоубера по первому виду статистических критериев:

$$FG = - \left[n - 1 - \frac{2k+5}{6} \right] \ln (\det [R]) \quad (5)$$

где $n=1976$ - количество наблюдений; $k=9$ - количество факторов.

При $v=k/2(k-1)=1$ степенях свободы и уровне значимости $\alpha=0,05$, число степеней свободы $d=9 \cdot (9-1)/2=36$. Табличное значение критерия соответствует значению 50,998.

Расчётное значение:

$$FG = - \left[1976 - 1 - \frac{18+5}{6} \right] \ln(0,00148623) = 6975$$

Поскольку расчётное значение больше табличного, то с принятой надёжностью можно утверждать, что в массиве факторов мультиколлинеарность существует с вероятностью 95%.

Выявим мультиколлинеарность входных факторов по второму виду статистических критериев (критерий Фишера):

$$F_k = (d_{kk} - 1) \frac{n-k}{k-1} \quad (6)$$

где d_{kk} -диагональные элементы матрицы; $n=1976$ - количество наблюдений; $k=9$ - количество факторов.

При $v_1=n-k$ и $v_2=k-1$ степенях свободы и уровне значимости α : $d_1=1976-9=1967$; $d_2=9-1=8$; тогда $F_{\text{ТАБЛ}}$ соответствует величине 2.071.

Если $F_{\text{РАСЧ}} < F_{\text{ТАБЛ}}$, то оснований отклонять гипотезу об отсутствии мультиколлинеарности нет. На основании проведённого анализа выявлена большая взаимосвязь факторов X_1 , X_8 с последующим исключением из расчёта X_8 .

Проверка переменных на мультиколлинеарность по третьему виду статистических критериев (критерий Стьюдента) показала возрастание остаточной дисперсии от 0,70 для $Q=F(X_1)$ до $R^2=0,762$ $Q=F(X_1; X_4; X_5; X_2; X_3; X_7)$. Для проверки правильности отборов факторов вернём в расчёт ранее отброшенные факторы X_6 , X_8 , X_9 . Поскольку значение коэффициента детерминации не изменится $R^2=0,762$, то предикторы отобраны корректно.

Проведя вычисление коэффициентов линейной регрессии определим вид функции:

$$Q=3.11-0.0936 \cdot X_1-0.0010 \cdot X_4+0.0203 \cdot X_5-0.0010 \cdot X_2+0.0042 \cdot X_3+0.0038 \cdot X_7.$$

На основании полученной математической зависимости и вычисленного реального графика отпуска тепловой энергии получены данные об отпуске тепловой энергии за последующий отопительный период. Сделано предположение о соответствии климатических факторов в будущем и текущем календарных годах.



Рисунок 2. Прогнозное значение потребления тепловой энергии нагрузкой котельной за отопительный период с периодом дискретизации 3 ч.

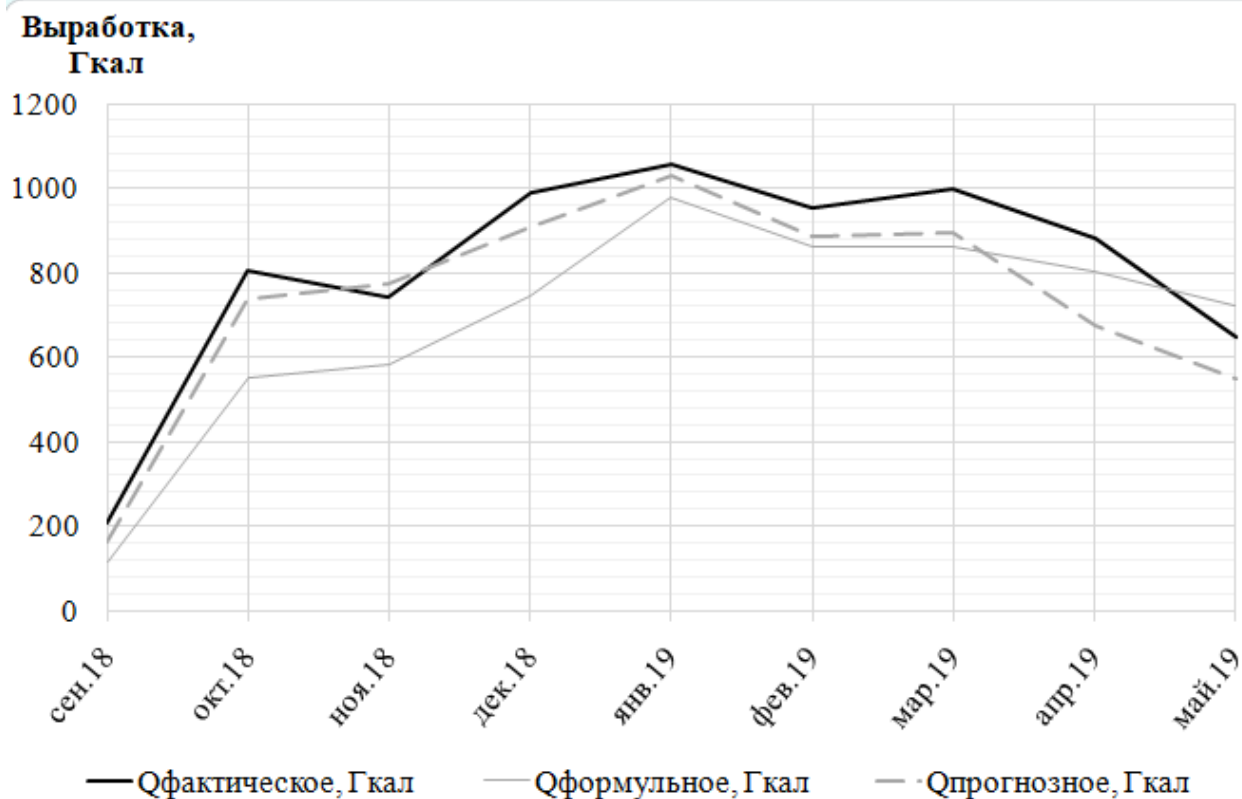


Рисунок 3. Прогнозное значение потребления тепловой энергии нагрузкой котельной за отопительный период с ежемесячным периодом дискретизации

На протяжении всего отопительного периода наблюдается снижение прогнозного отпуска тепловой энергии. Исключением являются месяцы

сентябрь и октябрь, когда теплоисточник намеренно отпускает больше тепла с целью прогрева зданий.

5. Results

Общее снижение в прогнозе с доверительной вероятностью 95% и уровнем значимости 5% составило 529 Гкал, что составляет 13.3% и эквивалентно снижению выбросов на 0.77 млн.т./г. Данный эффект может быть достигнут исключительно за счёт оптимизации режимов работы теплоисточника.

В работе показан способ составления прогнозной функции теплопотребления системой теплоснабжения в условиях существенного недостатка информации о структуре и состоянии сети. Выполнено обоснование набора значащих факторов. Произведено формулирование прогнозной математической функции теплопотребления участком города.

Показано, что формульные модели, применимые при существующем уровне данных дают существенное отличие от фактических и не могут быть применены.

Представлены результаты процесса анализа влияния различных факторов на объем потребляемой тепловой энергии для объекта исследования. В ходе исследования выявлено уменьшение объемов потребления тепла по сравнению с предшествующим периодом за счет ряда параметрических факторов, что подтверждает необходимость как дополнительной настройки режимов, так и модернизации теплоисточника. Показанный математический аппарат позволяет определить степень влияния климатических факторов на общую величину теплопотребления. Необходимо отметить, что выявленная зависимость носит строго индивидуальный характер, присущий только анализируемой системе. Для другой аналогичной системы проверка на коллинеарность и, как следствие, общий вид функции $Q=f(X_i)$ могут отличаться от полученного в статье.

Результаты расчета модели также могут быть использованы для расчета ожидаемого полезного отпуска в последующих периодах, экономической оценки дальнейшей модернизации изношенной системы теплоснабжения, формулирования тарифной политики, оценки эффективности вложений бюджетных или заёмных средств и т.д.

6. Acknowledgments

Статья подготовлена по результатам проекта, выполненного при поддержке Российского научного фонда (уникальный идентификатор гранта РНФ № 16-19-20568).

References

1. Gao J., Kovats S., Vardoulakis S., Wilkinson P., Liu Q. 2018. Public health co-benefits of greenhousegas emissions reduction: A systematic review. *Science of The Total Environment*, Volume 627, pp. 388-402.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.01.193>
2. Cho J., Kim J., Lee S., Koo J. 2016. A bi-directional systematic design approach to energy optimization for energy-efficient buildings. *Energy and Buildings*, Volume 120, pp. 135-144.
<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.03.066>
3. Zheng X., Streimikiene D., Balezentis T., Mardani A., Liao H. 2019. A review of greenhousegasemission profiles, dynamics, and climate change mitigation efforts across the key climate change players. *Journal of Cleaner Production*, Volume 234, pp. 1113-1133.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.06.140>
4. Huang X., Wang Y. 2019. Investigating the effects of 3D urban morphology on the surface urban heat island effect in urban functional zones by using high-resolution remote sensing data: A case study of Wuhan, Central China. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, Volume 152, pp. 119-131
<https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2019.04.010>
5. Gasho E G, Guzhov S V and Krolin A A 2019 On the forecasting of trends of specific mixed loads of electric consumers of microdistricts and cities change in the conditions of inadequate data IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 552 012013 <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/552/1/012013>
6. Larsen S., Hongn M., Castro N., González S. 2019. Comparison of four in-situ methods for the determination of wallsthermal resistance in free-running buildings with alternating heat flux in different seasons. *Construction and Building Materials*, Volume 224, pp. 455-473.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.033>
7. Rasooli A., Itard L. 2019. In-situ rapid determination of walls' thermal conductivity, volumetric heat capacity, and thermal resistance, using response factors. *Applied Energy*, Volume 253, Article 113539.
<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.113539>
8. Deconinck A., Roels S. 2015. A Maximum Likelihood Estimation of the Thermal Resistance of a Cavity Wall from On-site Measurements, *Energy Procedia*, Volume 78, pp. 3276-3281
<https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.11.723>
9. Rasooli A., Itard L., Ferreira C. 2016. A response factor-based method for the rapid in-situ determination of wall'sthermal resistance in existing buildings. *Energy and Buildings*. Volume 119, pp. 51-61.
<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.03.009>
10. Al-Sanea S., Zedan M. 2012. Effect of thermal bridges on transmission loads and thermal resistance of building walls under dynamic conditions. *Applied Energy*. Volume 98, pp. 584-593.
<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.04.038>

11. Ostrowski P., Szelejewski F., Zymelka P. 2019. Assessment of improvement in the energy and exergy efficiency of the gas heat plant after the exhaust gas cooled down below the dew point and the use of recovered heat. *Energy*, Article 116179. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.116179>
12. Brøgger M., Bacher P., Wittchen K. 2019. A hybrid modelling method for improving estimates of the average energy-saving potential of a building stock *Energy and Buildings*, Volume 199, pp. 287-296. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.06.054>
13. Huang S., Tao B., Li J., Yin Z. 2019, On-line heat flux estimation of a nonlinear heat conduction system with complex geometry using a sequential inverse method and artificial neural network, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Volume 143, Article 118491. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.118491>
14. Nouvel R., Mastrucci A., Leopold U., Baume O., Eicker U. 2015. Combining GIS-based statistical and engineering urban heat consumption models: Towards a new framework for multi-scale policy support. *Energy and Buildings*. Volume 107, pp. 204-212. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.08.021>
15. Amasyali K., El-Gohary N. 2018. A review of data-driven building energy consumption. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Volume 81, Part 1, pp. 1192-1205. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.04.095>