

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.** Задачи составления прогнозного топливно-энергетического баланса для источников тепловой энергии в условиях недостаточности данных актуальны при решении вопросов о целесообразности выделения средств для их разности модернизации, проведения периодических наладочных работ, расчёте выбросов в атмосферу вредных веществ. Определение состояния каждого из элементов системы представляет длительную затратную задачу. В работе показан способ составления предиктивного энергопотребления посредством статистических методов обработки информации.*

***Ключевые слова:** модернизация, дымовые газы, система теплоснабжения, прогноз теплотребления, 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

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

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. Описание существующей системы теплоснабжения

Климат рассматриваемой территории относится к субарктическому району. 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. Нагрузка отопления и ГВС 2,011 Гкал/ч. Прокладка трубопроводов подземная и надземная. Расход т/мощности на собственные нужды 0,599 Гкал/ч. Потери тепловой мощности в сетях 1,593 Гкал/ч. За отопительный сезон 2018/19г. нагрузке передано 22,956 тыс. Гкал. В качестве топлива используется мазут. Объем выбросов в атмосферу оценивается около 5,8 млн т/год [1].

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 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.

Сложность поставленной задачи состоит в том, что:

1) невозможно использовать для прогноза формульные модели, т.к. на этапе технико-экономического обоснования составлена функциональная 3D модель тепловой сети [2];

2) доподлинно неизвестны степени износа каждого элемента основного и вспомогательного оборудования источника теплоснабжения, магистральных трубопроводов, ЦТП и сетей потребителей [3];

3) неизвестны характеристики ограждающих конструкций отапливаемых зданий и степень их износа, что не позволяет спрос при различных климатических явлениях с приемлемой инженерной точностью [4];

4) невозможно 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 [5];

5) существуют сложности анализа работы теплоисточника по причине его эксплуатации на отличном от рекомендованного графика отпуска тепловой энергии [6] 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. 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 EXCEL. Процесс прогнозирования фактического теплоснабжения включает в себя следующие этапы:

а) анализ исходной информации и отсева таких недостоверных данных, как единичные необъяснимые выбросы или провалы теплоснабжения; 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;

в) определение набора факторов, по мнению эксперта оказывающих влияние на значение теплоснабжения и отсева некоторых из них по критериям коллинеарности и мультиколлинеарности;

г) формулирование прогнозной математической функции или группы предиктивных правил;

д) определение значений всех входных факторов на прогнозируемом временном промежутке;

е) определение прогнозных значений теплотребления 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 [7]:

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

где $C_p=1,001$ ккал/кг·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:

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

где r – парный коэффициент корреляции, рассчитанный по отобраным 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 EXCEL. 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:

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

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 $d = 9(9-1)/2 = 36$. Табличное значение FG соответствует значению 50,998, расчётное – 6975. Поскольку расчётное значение больше табличного, то с принятой надёжностью мож-

но утверждать, что с вероятностью 95%. в массиве факторов существует мультиколлинеарность.

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

$$F_k = (d_{kk} - 1) \frac{n-k}{k-1} \quad (3)$$

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 $F_{ТАБЛ}$ соответствует величине 2,071.

Если $F_{РАСЧ} < F_{ТАБЛ}$, 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 (рис. 1). Сделано предположение о соответствии климатических факторов в будущем и текущем календарных годах.

На протяжении всего отопительного периода прогнозный отпуск тепловой энергии ниже фактического. Исключением являются месяцы сентябрь и октябрь, когда теплоисточник намеренно отпускает больше тепла с целью прогрева зданий.

Выводы по работе

Общее снижение в прогнозе с доверительной вероятностью 95% и уровнем значимости 5% составило 529 Гкал, что составляет 13.3% и



Рис. 1. Прогнозное значение потребления тепловой энергии нагрузкой котельной за отопительный период с ежемесячным периодом дискретизации

эквивалентно снижению выбросов на 0.77 млн т/год. Данный эффект может быть достигнут исключительно за счёт оптимизации режимов работы теплоисточника.

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

ка. 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.

Библиографический список

1. Филиппов Е.А., Аленов Д.М. Перспективы и проблемы перевода угольных котельных в России на твердое топливо // Иностранный язык в контексте проблем профессиональной коммуникации: матер. II Межд. научн. конф. Томск: Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 2015. С. 20-21.

2. Акулова Я.Н. Система показателей оценки энергоэффективности как фактора экономического роста региональной экономики // Вестник ОГУ. 2014. № 4. С.33-38.

3. Гашо Е.Г., Гужов С.В., Кролин А.А. О прогнозировании трендов изменения удельных смешанных нагрузок электропотребителей микрорайонов и городов в условиях недостаточности данных // Энергетические системы: III Междунар. науч.-техн. конф.: сб. трудов. Белгород, 2018. С. 87-94.

4. Максимюк Е.В., Микшина В.С. Математическое моделирование для поддержки принятия решений в области обеспечения энергетической эффективности // Качество. Инновации. Образование. 2014. № 8. С. 54-63.

5. Папушкин В.Н., Григорьев А.С., Полянцев С.О. Прогнозирование спроса на тепловую мощность в схемах теплоснабжения // Новости Теплоснабжения. 2014. № 8. С. 3-16.

6. Выборнов Д.В., Кляус Б.В., Плужник А.В. Анализ потенциала энергосбережения в зданиях промышленного назначения // Энергетические системы: III Междунар. науч.-техн. конф.: сб. трудов. Белгород, 2018. С. 141-149.

7. Данилов О.Л., Гаряев А.Б., Яковлев И.В. Энергосбережение в теплоэнергетике и теплотехнологиях. М: Изд-во МЭИ, 2010. 424 с.