

О прогнозировании спроса на тепловую энергию системой приточной вентиляции

Рецензия эксперта на статью получена
26.04.2024 [The expert review of the article
was received on April 26, 2024]

Целесообразность применения прогнозного теплопотребления при настройке систем общеобменной вентиляции

Система вентиляции здания является одной из подсистем системы теплоснабжения. Система приточной вентиляции включает элементы подогрева и увлажнения приточного воздуха. Калорифер получает тепловую энергию от автоматизированного индивидуального теплового пункта (АИТП) объекта. Основным элементом АИТП является электронный регулятор — это устройство следит за параметрами теплоносителя в подсистемах. На основе этих данных вырабатываются управляющие команды.

Основным контролируемым параметром в тепловом пункте является температура «прямой» сетевой воды. Регулятор АИТП, как правило, представляет собой часть простой одноконтурной автоматизированной системы регулирования (АСР), которая работает с существенными запаздываниями. Часто реализуют так называемое «погодозависимое регулирование», где применяется АСР с компенсацией «возмущения», в качестве которого выступает температура наружного воздуха.

Автоматизированная система регулирования теплового пункта должна решать следующие задачи:

- поддержание оптимальной температуры теплоносителя;
- минимизация энергопотребления;
- учёт тепловой энергии;
- дистанционное управление и диспетчеризация.

В целях определения основных соотношений между расходами и температурами теплоносителя в системе отопления здания, а также параметров здания как объекта управления исследуется система отопления с зависимым присоединением к источнику тепла на основе автоматизированного теплового пункта.

Для повышения эффективности системы автоматизации каждой подсистемы должна опираться не только на температуру теплоносителя в «обратном» трубопроводе, но и выполнять расчёты спроса в зависимости от условий функционирования объекта. В этой статье рассмотрены особенности расчёта теплового баланса здания школы и возможности прогнозирования спроса на тепловую энергию.

Выбор схемы ИТП

Тепловая нагрузка потребителей значительно изменяется в зависимости от времени суток, погодных условий, тепловлажностных режимов отапливаемых помещений, режима работы оборудования и других факторов. Для обеспечения эффективной работы системы необходимо осуществлять её регулирование на основе принципа связности. При несвязном варианте регулируется каждая нагрузка в отдельности с учётом неравномерности потребления, на абонентские вводы подаётся требуемое в данный момент количество теплоты. При связном регулировании регулируется условная суммарная нагрузка исходя из средней величины потребления по каждой нагрузке (с запасом и без учёта неравномерности потребления).

УДК 621.1.016. Научная специальность: 2.1.3.

О прогнозировании спроса на тепловую энергию системой приточной вентиляции посредством применения упрощённого детерминированного подхода

С. В. Гужов, к.т.н., доцент, кафедра тепломассообменных процессов и установок (ТМПУ), Национальный исследовательский университет «Московский энергетический институт» (НИУ «МЭИ»); **А. А. Арбатский**, к.т.н., генеральный директор НИИ «Энергоэффективных технологий микроклимата»; **Е. В. Крылова**, к.п.н., доцент, заместитель директора по учебной работе Института тепловой и атомной энергетики (ИТАЭ) НИУ «МЭИ»; **А. О. Сорокина**, студент, НИУ «МЭИ»

Настройка автоматизированных систем общеобменной вентиляции для зданий типовой застройки является процессом, требующим дополнительного внимания в процессе эксплуатации. В статье описаны результаты разработки программного обеспечения для определения прогнозного спроса на тепловую энергию объектами массового строительства в городе Москве. Описан реализованный подход по применению детерминированного метода на основе СП 50.13330.2012 «Тепловая защита зданий», а также подход на основе применения нейронных сетей. Рассмотрен пример выполнения прогноза с помощью реализованного онлайн программного продукта для схемы теплоснабжения на примере типового здания школы в Москве. Рассчитанные показатели соответствуют полученным экспертными оценкам. Успешно выполнено тестирование ПО и рассмотрен пример расчёта теплового баланса на имеющихся реальных данных по зданию школы типового проекта 65-426/1 в Москве.

Ключевые слова: общеобменная вентиляция, здание типовой застройки, проектные характеристики, прогнозирование, тепловой баланс, тепловые потери, отопительный период, нейронная сеть.

UDC 621.1.016. The number of scientific specialty: 2.1.3.

On forecasting the demand for thermal energy by a supply ventilation system using a simplified deterministic approach

S. V. Guzhov, PhD, Associate Professor, the Department of Heat and Mass Transfer Processes and Installations (HMTPI), National Research University "Moscow Power Engineering Institute" (NRU "MPEI"); **A. A. Arbatsky**, PhD, General Director of the Research Institute of Energy-Efficient Technologies of Microclimate; **E. V. Krylova**, PhD, Associate Professor, Deputy Director for Academic Affairs of the Institute of Thermal and Nuclear Energy (ITNE) of NRU "MPEI"; **A. O. Sorokina**, student, NRU "MPEI"

Setting up automated general ventilation systems for standard buildings is a process that requires additional attention during operation. The article describes the results of software development for determining the projected demand for thermal energy by mass construction facilities in Moscow. The implemented approach to the application of a deterministic method based on the Code of Practice on Design and Construction (The Code of Practice of Russia) No. 50.13330.2012 "Thermal protection of buildings", as well as an approach based on the use of neural networks, is described. An example of making a forecast using an implemented online software product for a heat supply scheme is considered on the example of a typical school building in Moscow. The calculated indicators correspond to the expert estimates obtained. Software testing was successfully performed and an example of calculating the thermal balance based on available real data on a school building of a typical project No. 65-426/1 in Moscow was considered.

Keywords: general ventilation, standard building, design characteristics, forecasting, heat balance, heat losses, heating period, neural network.

Центральные тепловые пункты по типу работы подразделяют на два типа. **Независимые** — такие схемы подключения теплового пункта характеризуются экономической выгодой (до 40 %), так как в них между оборудованием конечных потребителей и источником тепловой энергии установлены теплообменники тепловых пунктов, которые регулируют количество подаваемого тепла, а также их неоспоримым преимуществом является повышение качества подаваемой воды. **Зависимые** — теплоноситель из теплосетей попадает непосредственно в систему отопления. Такая система достаточно проста (отсутствует необходимость установки дополнительного оборудования). Но данная особенность ведёт к важному недостатку, а именно к невозможности регулирования подачи тепла потребителю.

Методы регулирования систем централизованного теплоснабжения:

1. Качественный — регулирование отпуская теплоты осуществляется за счёт изменения температуры теплоносителя, поступающего в систему отопления здания. Недостатки метода:

- повышение температурного графика для компенсации отбора воды на ГВС;
- колебания температуры воздуха в помещении, связанные с влиянием нагрузки ГВС на работу систем отопления и различным соотношением нагрузок ГВС и отопления у потребителей;
- большая тепловая инерционность регулирования тепловой нагрузки;
- снижение качества теплоснабжения при регулировании температуры сетевой воды по средней за несколько часов температуре наружного воздуха и пр.

2. Количественный — регулирование отпуская теплоты осуществляется посредством изменения расхода теплоносителя, подаваемого к потребителю. Для зависимых схем с элеваторным смешением может приводить к разрегулировке отопительных систем вследствие возрастания гравитационного перепада, возникающего из-за увеличения разности температур воды в радиаторах при снижении её расхода.

3. Качественно-количественный — регулирование осуществляется за счёт одновременного изменения расхода и температуры теплоносителя.

Применение системы автоматики ИТП позволяет повысить подачу тепловой энергии в объект на основе несвязного качественно-количественного регулирования. Дополнительное применение алгоритмов прогнозирования позволяет:

- улучшить экологические показатели объекта за счёт снижения величины теплового загрязнения;

⌘ Набор параметров для типового объекта школа тип «Самолёт». 2020 год

табл. 1

№	Наименование	Значение
1	Этажность здания	3
2	Длина здания, м	82
3	Ширина здания, м	16
4	Длина стен на одном этаже, м	388
5	Высота стен на одном этаже, м	4
6	Температура внутр. воздуха, °C	22
7	Температура наружн. воздуха, °C	-20
8	Дата постройки	01.08.1980
9	Количество помещений с раковинами на этаже	4
10	Дата установки дверей	01.08.2012
11	Число окон в здании	258
12	Длина типового окна, м	1,46
13	Высота типового окна, м	1,8

№	Наименование	Значение
14	Дата установки окон	01.08.2012
15	Число дверей	82
16	Длина типовой двери, м	0,8
17	Высота типовой входной двери, м	2
18	Высота подвала, м	2,8
19	Число шкафов	170
20	Число диванов	4
21	Число столов	714
22	Число навесных шкафчиков	136
23	Макс. число посетителей-мужчин	5
24	Макс. число посетителей-женщин	25
25	Среднее время пребывания посетителей в сутки	0,9

- повысить точность регулирования нагрузок подсистем системы теплоснабжения здания;
- повысить энергетическую эффективность объекта;
- снизить объём потребления тепловой энергии и оптимизировать затраты на теплоснабжение.

Тестирование упрощённого детерминированного подхода

Исследуемым объектом является школа в городе Москве, построенная по типовому проекту 65-426/1. Для выполнения детерминированного расчёта использовался существующий СП 50.13330.2012 [1], разработанный с целью повышения уровня безопасности людей и сохранности материальных ценностей в зданиях.

Минимально необходимый набор исходных данных [2] по объекту приведён в табл. 1.

Расчёт производится для отопительного сезона 2021/2022 [3]. База данных включает получасовые значения следующих климатических показателей [4]:

- температура наружного воздуха [°C] на высоте 2 м над поверхностью земли;
- атмосферное давление [мм рт. ст.], приведённое к среднему уровню моря;
- относительная влажность наружного воздуха [%] на высоте 2 м над поверхностью земли;
- направление ветра [угол] на высоте 10–12 м над земной поверхностью, осреднённое за десятиминутный период, непосредственно предшествовавший сроку наблюдения;
- скорость ветра [м/с] на высоте 10–12 м над земной поверхностью, также осреднённая за десятиминутный период, непосредственно предшествовавший сроку наблюдения;
- процент «заоблачности» небосвода.

Также в число анализируемых данных включены значение дня (рабочий или выходной день) и длительность пребывания мужчин, женщин и детей.

Имеющиеся данные содержат недостатки: часть наблюдений не является полной, а каждое наблюдение содержит параметры за тот же месяц, что и значение теплотребления, которое должно быть спрогнозировано. Это создаёт противоречие с поставленной задачей: не имеет смысла прогнозировать потребление за уже прошедший месяц. В связи с этим следует провести отдельный этап предобработки данных, в ходе которого данные будут приведены к виду, при котором каждое наблюдение будет описывать ситуацию, подходящую для обучения с учителем. То есть новые наблюдения должны содержать данные за прошлый месяц, которые уже известны и сняты, а значение теплотребления, которое можно спрогнозировать, должно определяться за текущий месяц.

В ходе данного преобразования неизбежно будут потеряны данные по каждой из школ: первый месяц наблюдений не будет рассматриваться, так как в этот месяц неизвестно значение показателей за предшествующий месяц; последний месяц будет рассматриваться, однако показатели за него не смогут перейти в следующий месяц. После выполнения преобразования набор содержит 1663 наблюдения, из которых 1603 указаны как обучающие, а 60 — как тестовые. Результаты расчёта приведены в табл. 2.

Анализ полносвязных моделей показывает, что оптимальными являются конфигурации моделей с тремя скрытыми слоями: они достигают лучших результатов, при этом не проигрывая во времени более простым моделям с меньшим числом скрытых слоёв [5].

Результаты детерминированного и стохастического расчёта составляющих теплового баланса*. 2020 год

табл. 2

№	Рассчитываемая величина	Блок детерминированных расчётов	Блок нейросетевого расчёта
1	Трансмиссионные потери через окна, Гкал	174,825	175,699
2	Инфильтрационные потери через окна, Гкал	82,503	88,744
3	Трансмиссионные потери через входную группу, Гкал	122,847	124,690
4	Инфильтрационные потери через входную группу, Гкал	81,981	88,220
5	Теплопотери посредством теплопроводности через ограждающие конструкции, Гкал	229,958	235,707
6	Теплопотери посредством теплопроводности через кровлю, Гкал	304,598	327,854
7	Теплопотери посредством теплопроводности через пол, Гкал	213,715	221,195
8	Теплопотери через системы вентиляции, Гкал	2052,812	2209,647
9	Теплопритоки от людей, Гкал	214,032	223,663
10	Теплопритоки от неизолированных труб системы ГВС рукомоиников, Гкал	91,728	98,722
11	Теплопритоки от неизолированных труб системы ГВС душевых, Гкал	509,418	537,436
12	Теплоприток от систем электроосвещения и силового электроснабжения, Гкал	10,647	11,455
13	Теплоприток от неизолированных трубопроводов ГВС, Гкал	26,754	28,493
14	Теплоприток от неизолированных трубопроводов отопления, Гкал	93,366	100,401

* Для типового объекта школа тип «Самолёт».

Характеристики лучших моделей, обученных на наборе данных с сдвигом, удалением и стандартизированной оценкой

табл. 3

Модель	Время обучения, с	Эпохи	Batch	MAE обуч.	MSE обуч.	MAE валид.	MSE валид.	MAE тест.	MSE тест.
MLP-d32relu-d32relu-mse-8	40,17	238	64	20,57	1185,27	16,26	911,17	15,63	706,81
MLP-d512relu-d32relu-d32relu-mse-8	24,37	96	64	18,94	1029,07	16,63	979,67	14,90	672,94

Использование различного объёма пакетов в целом не даёт значительных отличий в рамках отдельной модели, однако именно те модели, которые были обучены с использованием пакетов объёмом 64, дали лучшие результаты с точки зрения валидационного и тестового множеств, если принимать во внимание показатель средней квадратичной ошибки (Mean Squared Error, MSE), играющий роль функции потерь. Использована классическая искусственная нейронная сеть — многослойный перцептрон (Multilayered Perceptron, MLP).

Характеристики двух моделей — MLP-d32relu-d32relu-mse-8, достигшей лучшей точности на валидационном множестве, и MLP-d512relu-d32relu-d32relu-mse-8, луч-

шей на тестовом множестве, приведены в табл. 3. Каждая составляющая теплового баланса рассчитана со своей погрешностью, показанной на рис. 1.

Наибольшими погрешностями обладают инфильтрационные потери через окна, инфильтрационные потери через входную группу и тепловые потери через системы вентиляции. При этом наибольшими тепловыми потерями являются теплопотери через системы вентиляции и через ограждающие конструкции.

Заключение

Создан рабочий программный продукт по прогнозирующему расчёту составляющих теплового баланса зданий типовых проектов.

Данный продукт позволяет производить расчёты детерминированным и стохастическим способами с применением искусственных нейронных сетей различной конфигурации. В процессе работы успешно выполнены поставленные задачи:

- разработан математический аппарат по определению теплового загрязнения и объёма тепловых потерь в сетях на участке «ТЭЦ — магистраль — ЦТП»;
- выполнено проведение численного эксперимента;
- выполнено формирование объекта dataset;
- произведена отладка программного обеспечения на основе математического аппарата взаимосвязи величины негативного воздействия на окружающую среду объекта генерации и сетей.

Успешно выполнено тестирование программного продукта и рассмотрен пример расчёта теплового баланса на имеющихся реальных данных по зданию школы типового проекта 65-426/1 в Москве. ●

- СП 50.13330.2012. Тепловая защита зданий. Актуализ. ред. СНиП 23-02-2003 / Дата введ.: 01.07.2013.
- Гужов С.В., Арбатский А.А., Торон Д.В. О формировании базы данных цифровой модели системы теплоснабжения здания // Журнал СОК. 2023. № 6. С. 32–35.
- Интегральный индекс [Электр. текст]. НИУ «МЭИ». Режим доступа: tci.mpei.ru. Дата обращ.: 22.04.2024.
- Гужов С.В., Крылова Е.В., Андрюнин С.А. Сравнение отечественных и европейских подходов при расчёте ИТП для здания офисного типа в условиях неадекватности данных // Журнал СОК. 2022. № 7. С. 36–38.
- Варшавский П.Р., Гужов С.В., Сесин А.А., Башлыков М.С. Разработка программных средств для расчёта и прогнозирования интегрального индекса системы теплоснабжения типовых зданий на основе нейросетевых методов // Вестник МЭИ, 2024. № 1. С. 138–146.

References — see page 79.

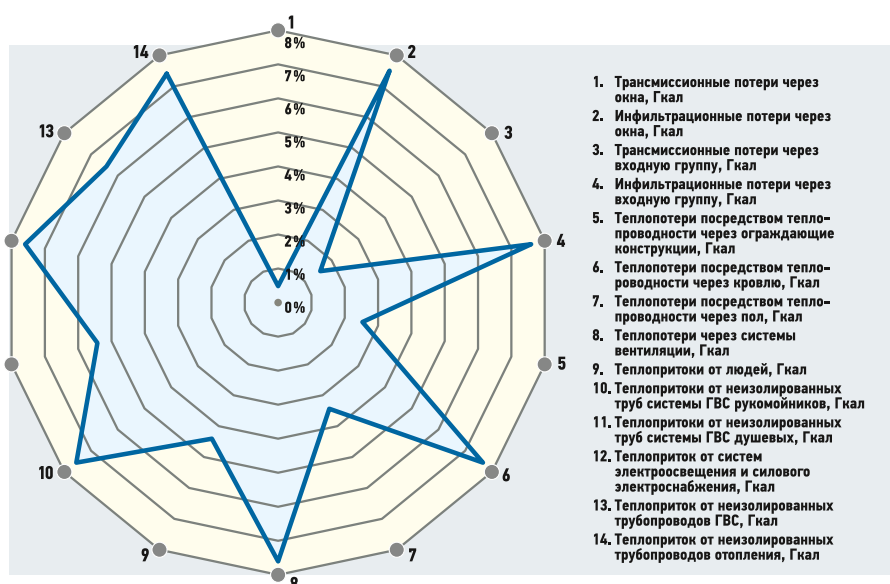


Рис. 1. Погрешности между детерминированным и стохастическим вариантами расчёта для каждой составляющей теплового баланса

On forecasting the demand for thermal energy by a supply ventilation system using a simplified deterministic approach. Pp. 49–51.

Sergey V. Guzhov, PhD, Associate Professor, the Department of Heat and Mass Transfer Processes and Installations (HMTPI), National Research University "Moscow Power Engineering Institute" (NRU "MPEI"); **Andrey A. Arbatsky**, PhD, General Director of the Research Institute of Energy-Efficient Technologies of Microclimate; **Elena V. Krylova**, PhD, Associate Professor, Deputy Director for Academic Affairs of the Institute of Thermal and Nuclear Energy (ITNE) of NRU "MPEI"; **Anna O. Sorokina**, student, NRU "MPEI"

1. SP 50.13330.2012 [The Code of Practice on Design and Construction (The Code of Practice of Russia) No. 50.13330.2012]. *Teplovaja zashita zdaniy* [Thermal protection of buildings]. Aktualiz. red. SNiP 23-02-2003 [Updated version of Building Rules & Regulations (National Codes and Standards of Russia) No. 23-02-2003]. Date of impl.: July 1, 2013. [In Russian]
2. S.V. Guzhov, A.A. Arbatsky, D.V. Torop. *O formirovanii bazy dannykh tsifrovoy modeli sistemy teplosnabzheniya zdaniya* [On the formation of a database of a digital model of the building's heat supply system]. *Zhurnal Santechnik, otoplenie, konditsionirovanie (SOK)* [Journal of Plumbing, Heating, Ventilation]. 2023. No. 6. Pp. 32–35. [In Russian]
3. *Integral'nyy indeks* [Integral index]. NIU "MPEI" [National Research University "Moscow Energy Institute"]. Web-source: tsi.mpei.ru. Access date: April 22, 2024. [In Russian]
4. S.V. Guzhov, E.V. Krylova, S.A. Andryunin. *Sravnenie otechestvennykh i evropejskikh podhodov pri raschjote ITP dlja zdaniya ofisnogo tipa v uslovijakh nedostatochnosti dannykh* [Comparison of domestic and European approaches when calculating an individual heating point for an office building in conditions of insufficient data]. *Zhurnal Santechnik, otoplenie, konditsionirovanie (SOK)* [Journal of Plumbing, Heating, Ventilation]. 2022. No. 7. Pp. 36–38. [In Russian]
5. P.R. Varshavsky, S.V. Guzhov, A.A. Sesin, M.S. Bashlykov. *Razrabotka programmykh sredstv dlja raschjota i prognozirovaniya integral'nogo indeksa sistemy teplosnabzheniya tipovykh zdaniy na osnove nejrosetevykh metodov* [Development of software for calculating and predicting the integral index of the heat supply system of standard buildings based on neural network methods]. *Vestnik MPEI* [Bulletin of the Moscow Energy Institute]. 2024. No. 1. Pp. 138–146. [In Russian]