
НАУЧНЫЕ ПРОБЛЕМЫ АРХИТЕКТУРЫ, ГРАДОСТРОИТЕЛЬСТВА И ЭКОЛОГИИ

SCIENTIFIC PROBLEMS OF ARCHITECTURE, TOWN PLANNING AND ECOLOGY

Известия вузов. Строительство. 2022. № 5. С. 100–115.

ISSN 0536-1052

News of Higher Educational Institutions. Construction. 2022; (5): 100–115.

ISSN 0536-1052

Научная статья

УДК 721.699.86.003.1

DOI: 10.32683/0536-1052-2022-761-5-100-115

ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ АРХИТЕКТУРНО-ПЛАНИРОВОЧНЫХ РЕШЕНИЙ ОБЪЕКТОВ КАПИТАЛЬНОГО СТРОИТЕЛЬСТВА

Елена Петровна Горбанева^{1, 2}, Илона Андреевна Косовцева¹

¹Воронежский государственный технический университет (ВГТУ),
Воронеж, Россия

²Научно-исследовательский институт строительной физики РААСН,
Москва, Россия

Аннотация. Установлены пределы практического применения алгоритмов выделения детерминированной части климатической информации, определяющей тепловые потери за отопительный сезон, и приведен конкретный пример оптимального алгоритма. Сформулирован метод расчета полных тепловых потерь, вызываемых макроскопическими потоками жидкого теплоносителя и воздуха за пределы объектов капитального строительства, за отопительный сезон. Доказано, что набор сформулированных алгоритмов позволяет оптимизировать полученную ранее векторную иерархическую информационную модель энергосбережения полного жизненного цикла проекта и методы обновления и верификации базовой информации модели. Поскольку основные параметры архитектурно-планировочных решений не могут быть изменены на протяжении жизненного цикла, их энергооптимизация является базой энергосбережения проекта. Таким образом, в полной мере реализовать потенциал энергосбережения позволяет интеграция моделей энергетического планирования; оптимизации баланса спроса и предложения энергии; планирования и анализа результатов энергетической модернизации и векторных иерархических информационных моделей полного жизненного цикла проекта. Информационные модели энергосбережения полного жизненного цикла проекта должны учитывать как теплофизические характеристики материалов и конструкций, так и макроскопические потоки тепла в окружающую среду. Климатическая информация должна быть очищена от стохастической компоненты.

Ключевые слова: энергосбережение, жизненный цикл, объекты капитального строительства, оптимизация

Благодарности: работа поддержана проектом № 3.1.7.1 Плана фундаментальных исследований Российской архитектурно-строительной академии на 2021–2023 гг.

© Горбанева Е.П., Косовцева И.А., 2022

и Министерства строительства и коммунального хозяйства Российской Федерации. Исследования, результат которых изложен в данной работе, проводились с использованием оборудования ЦКП имени проф. Ю.М. Борисова ВГТУ, при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ, проект № 075-15-2021-662.

Для цитирования: Горбанева Е.П., Косовцева И.А. Энергетическая оптимизация архитектурно-планировочных решений объектов капитального строительства // Известия вузов. Строительство. 2022. № 5. С. 100–115. DOI: 10.32683/0536-1052-2022-761-5-100-115.

Original article

ENERGY OPTIMIZATION OF ARCHITECTURAL AND PLANNING SOLUTIONS FOR CAPITAL CONSTRUCTION PROJECTS

Elena P. Gorbaneva^{1, 2}, Iona A. Kosovtseva¹

¹Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

²Research Institute of Building Physics RAASN, Moscow, Russia

Abstract. The limits of practical application of algorithms for the division of the deterministic part of climate information determining heat losses during the heating season are determined and a concrete example of the optimal algorithm is given. A method for calculating the total heat losses caused by macroscopic flows of liquid coolant and air outside the ACS during the heating season is formulated. It is proved that a set of formulated algorithms makes it possible to optimize the previously obtained vector hierarchical information model of energy saving of the full life cycle of the project and methods of updating and verifying the basic information of the model. Since the main parameters of architectural and planning solutions cannot be changed throughout the life cycle, their energy optimization is the basis for energy saving of the project. Thus, the integration of energy planning models makes it possible to fully realize the potential of energy saving; optimization of the balance of energy supply and demand; planning and analysis of the results of energy modernization and vector hierarchical information models of the full life cycle of the project. Information models of energy saving of the full life cycle of the project should take into account both the thermal and physical characteristics of materials and structures, and macroscopic heat flows into the environment. Climate information should be cleared of the stochastic component.

Keywords: energy saving, life cycle, capital construction facilities, optimization

Acknowledgments: this research was supported by Project no. 3.1.7.1 within the 2021–2023 Plan of Fundamental Research of the Russian Academy of Architecture and Civil Engineering and Ministry of Civil Engineering and Public Utilities of the Russian Federation. The experimental studies have been carried out using the facilities of the Collective Research Center named after Professor Yu.M. Borisov, Voronezh State Technical University, which is partly supported by the Ministry of Science and Education of the Russian Federation, Project no. 075-15-2021-662.

For citation: Gorbaneva E.P., Kosovtseva I.A. Energy optimization of architectural and planning solutions for capital construction projects. *News of Higher Educational Institutions. Construction*. 2022; (5): 100–115. (In Russ.). DOI: 10.32683/0536-1052-2022-761-5-100-115.

1. Введение. Исчерпание возможностей экстенсивного роста генерации первичной энергии за счет ископаемого топлива [1] и значительная доля энергии, потребляемая в секторе архитектуры, инжиниринга, строительства и эксплуатации (АЕСО) [2], стимулировали постоянный, а в по-

следнее время и быстро растущий интерес исследователей, практиков и политиков к проблеме повышения энергоэффективности полного жизненного цикла проектов АЕСО. В результате исследования энергетических и климатических проблем в обществе сложился консенсус о безальтернативности энергосберегающих методов развития экономики и социальной сферы. Энергосберегающий вектор развития на краткосрочную и среднесрочную перспективу нашел отражение в национальных [3] и наднациональных [4] стратегических программах реализации политики энергоэффективности. В соответствии с энергетической стратегией РФ планируется развитие и распространение прорывных энергоэффективных технологий в секторе жилых, коммерческих и административных зданий. Прогнозируется, что при средних темпах роста валового внутреннего продукта в 2,3–3 % в год средний темп роста энергопотребления благодаря соответствующим мероприятиям составит 0,3–0,6 % [3].

Особую роль в этом контексте имеют объекты капитального строительства, определяющие основу энергоснабжения и спроса экономики и социальной сферы [2, 5, 6] и, следовательно, значительный потенциал для снижения энергопотребления.

Однако реализация этого потенциала тормозится значительными проблемами, возникающими при оптимальном планировании и проведении сценариев устойчивого и энергоэффективного развития [7]. Для преодоления трудностей, образующихся на пути внедрения энергосберегающих решений в практику АЕСО, были разработаны многочисленные модели для различных энергетических приложений, таких как энергетическое планирование; оптимизации баланса спроса и предложения энергии; планирование и анализ результатов энергетической модернизации [8–11]. При этом в зависимости от решаемых задач энергетическое моделирование может быть выполнено на уровне отдельного здания – *Building Energy Modeling (BEM)* или на уровне города (городского района) – *Urban Building Energy Modeling (UBEM)*.

2. Материалы и методы исследования. На основе локальных энергомоделей отдельных зданий интегральные модели городской энергетики строятся двумя альтернативными методами [12]: нисходящие (*top-down*) и восходящие модели (*bottom-up*).

Нисходящие модели на основе макроэкономических и статистических данных формируют энергетические прогнозы и используются для масштабного анализа на широком и агрегированном (в основном политическом) уровне. Восходящие модели формулируют кластеры зданий с аналогичными характеристиками и используются для формирования стратегии энергоэффективности на уровне города (городского района) [13].

Для формирования восходящей энергетической модели объектов капитального строительства требуются источники данных, содержащих информацию пяти типов:

– архитектурно-планировочная (форма и разновидность объекта капитального строительства, геометрические параметры и вид ограждающих конструкций, этажность, количество и тип стен, дверей и окон);

– теплофизическая (коэффициент теплопроводности *U-values* ограждающих конструкций, характеристики тепловых мостов, системы отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха);

- погодные и климатические данные [14];
- типологические графики внутренних нагрузок [15, 16];
- геопространственная позиция [17].

Восходящие энергетические модели зданий дают полезную количественную информацию для повышения эффективности зданий конечных пользователей [18]. Архетипический подход широко используется для понимания и оптимизации интегрального воздействия энергоэффективных стратегий и новых технологий на региональный или национальный строительный фонд [19], вследствие чего его развитию уделяют большое внимание как исследователи, так и практики. Один из наиболее известных проектов *City Building Energy Saver (CityBES)* [20] объединяет механизм моделирования *EnergyPlus* с форматами данных *CityGML* и *GeoJSON* для энергомоделирования застройки районного или городского масштаба. Платформа *CityBES* представляет инструментарий анализа различных сценариев модернизации при интеграции технологий зданий с данными о производительности и стоимости. Другой проект *Urban Modeling Interface* [21] на основе интеграции моделей *Radiance/Daysim* и *EnergyPlus* позволяет оптимизировать энергозатраты городских зданий, дневного освещения. Еще один интегральный проект *CitySim* на основе оптимизации принятия решений позволяет специалистам по энергопланированию и потребителям минимизировать энергопотребление и выбросы [22, 23]. Проект *Urban Renewable Building And Neighborhood Optimization* [24], объединяя платформы *EnergyPlus* и *OpenStudio*, представляет инструментарий моделирования и анализа тепловой и электрической энергии в масштабах кампуса. Наиболее технологически продвинутая платформа *UBEM* [25] Массачусетского технологического института использует механизм моделирования *EnergyPlus* для 83 541 здания путем интеграции официальных наборов данных ГИС и пользовательской библиотеки архетипов зданий.

Все интегральные платформы базируются на восходящих энергетических моделях. Методам энергетического моделирования ОКС, лежащим в основании формирования моделей стратегии энергоэффективности, и посвящена данная работа.

3. Результаты и обсуждение. Технологии энергетического моделирования отдельного объекта базируются на трех категориях моделей:

- «белого ящика» (прямое моделирование или на основе законов физики);
- «черного ящика» (эмпирическое или статистическое моделирование);
- «серого ящика» (смешанное моделирование на основе физики и эмпирики).

Базовый теплофизический параметр для оценки их тепловых потерь, а затем и энергетических характеристик – коэффициент теплопроводности ограждающих конструкций U . В модели «белого ящика» значения коэффициента U определяются экспериментально или рассчитываются теоретически на базе коэффициентов теплопроводности (или параметров теплового сопротивления) материалов, составляющих конструкцию [26]. Лабораторные измерения величины U практически возможны только для стандартизированных строительных элементов [27], поэтому общепринятой практикой является использование теоретических оценок с учетом показателей теплового сопротивления слоев строительных элементов [28].

Физический механизм, приводящий к потерям тепловой энергии в твердой фазе (строительные конструкции, оконные и дверные системы, тепловые мосты и т.п.), – теплопроводность. Поток тепла (т.е. тепловая мощность, переносимая через единицу площади изотропной ограждающей конструкции) выражается по закону Фурье

$$q = -\lambda \int_S \left(\frac{\partial T}{\partial x} i + \frac{\partial T}{\partial y} j + \frac{\partial T}{\partial z} k, dS \right), \quad (1)$$

где λ – коэффициент теплопроводности элемента (для изотропной конструкции, определяемый только материалом, а для ортотропной также и геометрическими характеристиками);

i, j, k – орты декартовой системы координат;

$\partial T/\partial x, \partial T/\partial y, \partial T/\partial z$ – частные производные температуры по переменным декартовой системы;

dS – вектор нормали к площадке, через которую протекает поток тепловой энергии.

В частности, в простейшем случае изотропного материала и одномерного распределения температуры вдоль оси, перпендикулярной границам конструкции (т.е. при выполнении условий $\partial T/\partial y = 0, \partial T/\partial z = 0, \lambda = \text{const}$), уравнение (1) упрощается и после интегрирования приводит к выражению для мощности теплового потока через однородный слой вещества толщиной d

$$P_1 = \lambda S \Delta T / d, \quad (2)$$

где S – площадь контакта конструкции с внешней средой;

ΔT – разность температур помещения и внешней среды.

Теплопроводность материалов, используемых в строительстве, варьируется в весьма широких пределах от величин порядка 10^2 W / mK для металлов до $2 \cdot 10^{-2}$ W / mK для теплоизоляционных материалов [29]. В строительстве часто используются не изотропные материалы, а ортотропные слоистые конструкции (многослойные стеклопакеты, сэндвич-панели, многослойные кровельные панели и т.п.). N -слойная конструкция, состоящая из изотропных слоев толщиной d_i с коэффициентами теплопроводности $\lambda_i (i = 1, 2, \dots, N)$ потока тепла, имеет вид [30]

$$P_N = S \Delta T / \sum_{i=1}^N d_i / \lambda_i. \quad (3)$$

Выделяя в выражениях (2) и (3) параметры, зависящие только от характеристик конструкции, и определяя поверхностную плотность термического сопротивления строительного элемента

$$R_N = \sum_{i=1}^N d_i / \lambda_i, \quad (4)$$

выразим поток тепла через площадь контакта конструкции с внешней средой следующим образом:

$$P_N = R_N S \Delta T. \quad (5)$$

При условии $N = 1$ формулы (2) и (5) совпадают и поэтому индекс N в дальнейшем опущен. Полные потери тепловой энергии через отдельный элемент ограждающей конструкции пропорциональны времени излучения во внешнюю среду (на практике – длительности отопительного сезона):

$$\Delta Q_M = R_M S_M \sum_{j=1}^{N_t} \Delta t_j \Delta T_j, \quad (6)$$

где R_M – значение теплофизического параметра (4) для рассматриваемого элемента ограждающей конструкции;

M – индекс, нумерующий элементы;

N_t – число промежутков Δt_j (в зависимости от подробности описания – недель, суток, часов);

Δt_j – длительность промежутка времени, в течение которого разность внутренней и средней внешней температуры равна ΔT_j .

Если все промежутки равны $\Delta t_j = \Delta t$, то уравнение (6) упрощается и принимает вид

$$\Delta Q_K = R_M S_M \Delta t \sum_{j=1}^{N_t} \Delta T_j. \quad (7)$$

В жидкой и газовой фазах (теплоносителях систем отопления, воздухе систем кондиционирования и т.п.) к теплопроводности добавляются также механизмы естественной и принудительной конвекции и макроскопического переноса вещества за пределы здания и сооружения. Поток энергии в этом случае определяется не геометрическими характеристиками архитектурно-планировочных решений, а конструкцией и параметрами функционирования устройств, в которых реализуется макроскопический перенос жидкостей и газов.

Рассмотрим влияние архитектурно-планировочных решений на тепловые потери через ограждающие конструкции объекта капитального строительства.

Наиболее часто встречающееся в практике здание состоит из примыкающих корпусов, имеющих форму параллелепипедов одинаковой высоты. На примере сооружения, план которого приведен на рис. 1, рассмотрим методы количественного описания тепловых потоков, пропорциональных площадям контакта элементов ограждающих конструкций с внешней средой и числу этих элементов. Потери тепла в этом случае происходят через внешние стены, окна, двери, крыши и подвалы.

Максимальная площадь внешних стен может быть выражена через геометрические параметры здания

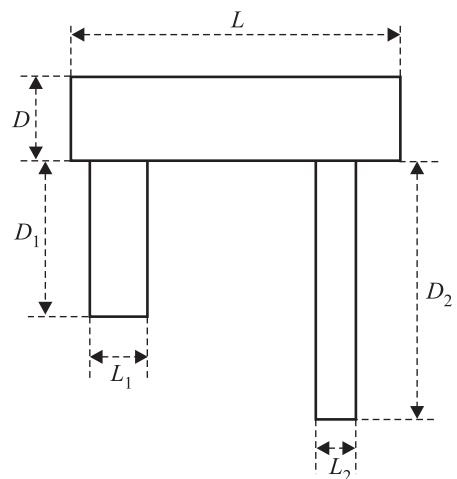


Рис. 1. План объекта капитального строительства

Fig. 1. Capital construction project plan

$$S_{\max} = H \left[2 \sum_{i=0}^K (D_i + L_i) - \sum_{i=1}^K L_i \right]. \quad (8)$$

Здесь H – высота здания;

K – число блоков, пристроенных к основному зданию;

D_i, L_i при значениях $1 \leq i \leq K$ – линейные размеры пристроенных блоков, параллельные D_0, L_0 соответственно (нулевой индекс в уравнении (8) нулеует основной корпус);

D_0, L_0 – длина и ширина основного здания.

Максимальная площадь внешних стен должна быть уменьшена на суммарную площадь окон и дверей и, следовательно, полная площадь внешних стен задается выражением

$$S_t = S_{\max} - \sum_{j=1}^{J_w} n_j^w S_j^w - \sum_{j=1}^{J_d} n_j^d S_j^d, \quad (9)$$

где J_w, J_d – количество типоразмеров окон и дверей соответственно;

n_j^w, n_j^d – число окон и дверей каждого типоразмера;

S_j^w, S_j^d – их площади.

Поскольку температуры внешней среды для стен, дверей, окон и крыши совпадают с температурой наружного воздуха, сильно зависящей от времени года, а для подвала определяются практически постоянной температурой грунта, методы расчета теплового потока для элементов, граничащих с атмосферой и грунтом, качественно отличаются. Рассмотрим вначале алгоритм описания теплового потока для элементов, граничащих с атмосферой. Полная тепловая энергия, излучаемая зданием в окружающую среду, определяется как мощностью теплового потока, так и временем излучения.

Суммируя тепловые потоки по элементам ограждающей конструкции, контактирующим с атмосферой, получаем следующую зависимость потерь энергии от параметров здания и климата в месте его локализации:

$$\Delta Q = \left\{ R_{\text{wall}} \left[2H \sum_{i=1}^K (D_i + L_i) - H \sum_{i=1}^K L_i - S_w - S_D \right] + \sum_{j=1}^{J_w} R_{\text{window}}^j n_j^w S_j^w + \sum_{j=1}^{J_d} R_{\text{door}}^j n_j^d S_j^d + R_{\text{roof}} \sum_{i=0}^K D_i L_i \right\} \sum_{j=1}^{N_t} \Delta t_j \Delta T_j. \quad (10)$$

С практической точки зрения выражение в фигурных скобках формулы (10) представляет собой просто среднюю мощность тепловых потерь, приведенную к единичному интервалу температур. Число членов суммы по частям периода отопительного сезона (неделям, декадам, месяцам) определяется необходимой точностью расчета и доступной климатической информацией. Согласно (10), полная площадь крыши находится равенством

$$S_{\text{roof}} = \sum_{i=0}^K D_i L_i. \quad (11)$$

Зная, что температура грунта слабо зависит от времени излучения, выражение для потока тепла, поглощаемого подвальным помещением, можно упростить

$$\Delta Q_{basement} = R_{basement} \Delta T \sum_{i=0}^K D_i L_i \sum_{j=1}^{N_t} \Delta t_j = R_{basement} \Delta T \Delta t_{tot} S_{roof}. \quad (12)$$

Здесь учтено равенство (11) и тот факт, что сумма $\sum_{j=1}^{N_t} \Delta t_j$ равна полной длительности отопительного периода Δt_{tot} .

Множитель

$$W = \sum_{j=1}^{N_t} \Delta t_j \Delta T_j \quad (13)$$

в выражении (6) для экспозиции излучаемой энергии с практической точки зрения представляет собой интегральную по отопительному периоду приведенную разность температур, не зависит от характеристик объекта оценки и зависит только от региона локализации объекта.

Выразим множитель W через длительности отопительного периода. Для этого подставим разность температуры окружающей среды T_j в j -й промежуток отопительного периода и воздуха в помещении T_0 в формулу (13)

$$\begin{aligned} W &= \sum_{j=1}^{N_t} \Delta t_j (T_0 - T_j) = T_0 \sum_{j=1}^{N_t} \Delta t_j - \sum_{j=1}^{N_t} \Delta t_j T_j = \\ &= T_0 \Delta t_{tot} - \langle T \rangle \Delta t_{tot} = (T_0 - \langle T \rangle) \Delta t_{tot}. \end{aligned} \quad (14)$$

Тогда средняя по полному отопительному сезону температура (T) выражается через температуры в отдельные периоды следующим образом:

$$\langle T \rangle = \sum_{j=1}^{N_t} \Delta t_j T_j / \sum_{j=1}^{N_t} \Delta t_j. \quad (15)$$

При совпадающих значениях интервалов времени $\Delta t_j = \Delta t$ уравнение (15) упрощается

$$\langle T \rangle = \sum_{j=1}^{N_t} T_j / N_t. \quad (16)$$

Приведем пример вычисления средней по отопительному периоду температуры для Воронежской области.

На рис. 2 начало отсчета 1 сентября, конец – 30 мая. Вертикальные штриховые линии отражают границы месяцев; горизонтальная штриховая линия на уровне $t = 8^\circ\text{C}$ – температурную границу отопительного периода. Абсциссы прямоугольника отражают границы периода, а ординаты – комфортную температуру помещения и среднюю температуру окружающей среды.

В соответствии с пунктом 5 Постановления Правительства РФ от 06.05.2011 N 354 (ред. от 27.03.2018, с изм. от 10.07.2018) «О предоставлении коммунальных услуг собственникам и пользователям помещений в многоквартирных домах и жилых домов» (вместе с «Правилами предоставления коммунальных услуг собственникам и пользователям помещений в многоквартирных домах и жилых домов») начало отопительного периода опреде-

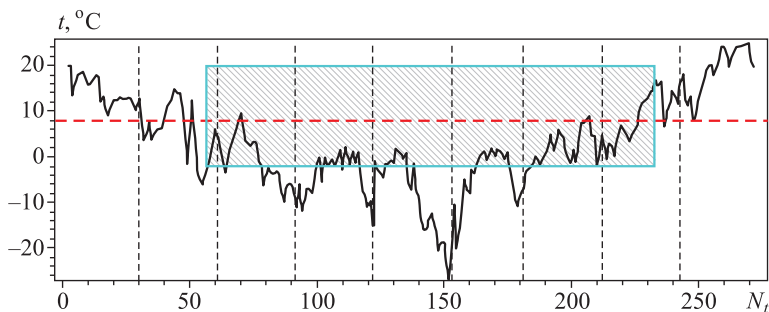


Рис. 2. Зависимость среднесуточной температуры воздуха t (°C) от времени (сутки) N_t по результатам наблюдений в Воронежской области [31]

Fig. 2. Dependence of the average daily air temperature t (°C) from time (day) N_t according to the results of observations in the Voronezh region [31]

ляется органами местного самоуправления при одновременном выполнении двух условий:

- 1) наступление, соответствующее времени года. Обычно сезон стартует в период с 1 по 15 октября;
- 2) среднесуточная температура составляет менее 8 °C в течение пяти дней подряд.

Применение этого алгоритма к результатам многолетних климатических наблюдений в Воронежской области (см. рис. 2) в соответствии с формулой (15) дает значение $\langle T \rangle = -2,09$ °C.

Поскольку метеорологические явления испытывают влияние многочисленных стохастических воздействий, то алгоритм расчета величин, на которых основываются технические и управленческие решения, должен обеспечивать выделение детерминированной информации на фоне шума. Наиболее эффективный алгоритм выделения детерминированной части информации основан на Фурье-анализе результатов наблюдений. При этом во многих практических приложениях достаточную точность дает более простой алгоритм четвертых разностей. Элементы массивов простых разностей J -го порядка определяются рекуррентным соотношением

$$DT_{j+1}^J = DT_{j+1}^{J-1} - DT_j^{J-1}. \quad (17)$$

При начальных условиях $DT_j^0 = T_j$. Детерминированный сигнал вычисляется по формуле

$$T_j^{\text{det}} = T_j - \frac{3}{32}DT_j^4. \quad (18)$$

График зависимости детерминированной части информации, описывающей зависимость температуры воздуха от времени, приведен на рис. 3.

Применение алгоритма определения границ отопительного сезона к детерминированной части многолетних климатических наблюдений в Воронежской области дает значение $\langle T \rangle = -2,11$ °C с погрешностью, менее 3 % совпадающей с результатом обработки первичных данных.

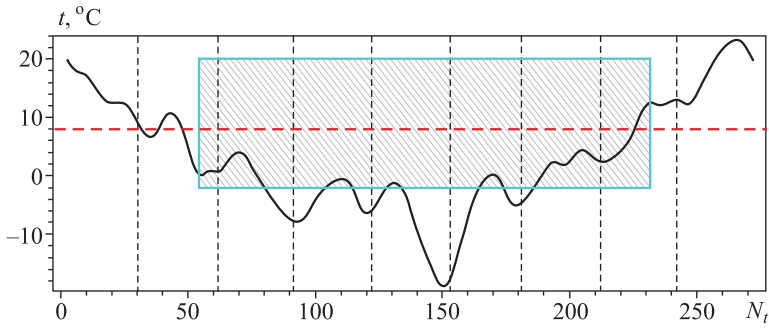


Рис. 3. Детерминированная часть зависимости температуры воздуха t ($^{\circ}\text{C}$) от времени N_t в Воронежской области

Fig. 3. The deterministic part of the dependence of air temperature t ($^{\circ}\text{C}$) on time N_t in the Voronezh region

Потери тепловой энергии, связанные с макроскопическими потоками жидкого теплоносителя и воздуха за пределы здания, не зависят от характеристик его периметра, а определяются мощностью потоков

$$\Delta Q_{\text{macro}} = c_{\text{gas}} \sum_{i=1}^{N_{\text{con}}} n_i P_i \sum_{j=1}^{N_t} \Delta t_j \Delta T_j + c_{\text{water}} P_{\text{water}} \sum_{j=1}^{N_t} \Delta t_j \Delta T_j^w, \quad (19)$$

где $c_{\text{gas}} = 1,002$ кДж/кг·К, $c_{\text{water}} = 4,2$ кДж/кг·К – удельные теплоемкости воздуха и воды соответственно;

N_{con} , n_i – число типов установок кондиционирования воздуха и количество установок каждого типа, используемых в здании;

P_i – мощность массового потока каждой установки;

P_{water} – средняя мощность массового потока теплоносителя в течение отопительного сезона;

ΔT_j^w – разность температуры теплоносителя на выходе из здания и на входе в нагревательную установку.

Аналогично уравнениям (7) и (15) при постоянном значении интервалов $\Delta t_j = \Delta t$ уравнение (19) также упрощается

$$\Delta Q_{\text{macro}} = \Delta t \left(c_{\text{gas}} \sum_{i=1}^{N_{\text{con}}} n_i P_i \sum_{j=1}^{N_t} \Delta T_j + c_{\text{water}} P_{\text{water}} \sum_{j=1}^{N_t} \Delta T_j^w \right). \quad (20)$$

Уравнения (19) и (20) позволяют дополнить построенную в [31, 32] векторную иерархическую информационную модель энергосбережения полного жизненного цикла проекта модулями, описывающими макроскопические потоки тепла. Базовая библиотека типов добавочного модуля описывает набор мощностей массового потока воздуха актуальных на момент оценки установок кондиционирования воздуха (табл. 1).

В табл. 1 первая колонка имеет целочисленный формат, вторая – текстовый, третья – формат действительного числа. Атрибут «Наименование» не обрабатывается при реализации алгоритма, а служит только для упрощения взаимодействия с персоналом, эксплуатирующим систему. Число $N_{\text{con}}^{\text{tot}}$ и содержание компонентов вектора типов обуславливается технологическими

Таблица 1. Структура вектора типов дополнительного модуля информационной модели энергоэффективности

Table 1. Structure of the vector of types of the additional module of the energy efficiency information model

№ типа	Наименование	Мощность потока, kg/s
1	Наименование 1	P_1
2	Наименование 2	P_2
...
N_{con}^{tot}	Наименование N_{con}^{tot}	$P_{N_{con}^{tot}}$

Таблица 2. Структура вектора количества установок кондиционирования дополнительного модуля информационной модели энергоэффективности

Table 2. Structure of the vector of the number of air conditioning units of the additional module of the energy efficiency information model

№ типа	Наименование	Количество установок
1	Наименование 1	n_1
2	Наименование 2	n_2
...
N_{con}	Наименование N_{con}	$n_{N_{con}}$

возможностями промышленности и не связано с конкретным проектом. Вследствие этого обновление и верификация вектора типов выполняется независимо от технических решений ОКС.

На основе вектора типов строится вектор количества установок кондиционирования каждого типа, структура которого приведена в табл. 2.

Множества номеров и наименований табл. 2 являются подмножествами соответствующих данных табл. 1, вследствие чего выполняется условие $N_{con}^{tot} \geq N_{con}$.

4. Выводы. Развитие энергетики – главная предпосылка развития экономики и качества жизни человечества. Потенциал экстенсивного роста производства первичной энергии на базе углеводородного сырья, долгое время бывшего основой экономического роста, полностью исчерпан. Альтернативные источники энергии в краткосрочной и среднесрочной перспективе не смогут обеспечить потребности экономики. Поэтому императивом развития является энергосбережение, значительный потенциал которого сосредоточен в сфере АЕСО. Оптимальная реализация этого потенциала требует разработки моделей энергетического планирования; баланса спроса и предложения энергии; энергоэффективной модернизации, что и составило цель данной работы.

Показано, что базой энергоэффективности капитального строительства являются энергосберегающие архитектурно-планировочные решения ОКС, основные параметры которых не могут быть изменены на протяжении полного жизненного цикла проекта. В работе изложены методы количественного

описания тепловых потерь через ограждающие конструкции объекта во внешнюю среду, базирующиеся на параметрах архитектурно-планировочных решений, теплофизических свойствах материалов и конструкций и климатических характеристиках региона локализации объекта. Сформулированы методы выделения нестохастической части климатической информации, устанавливающей тепловые потери за отопительный сезон, и приведен конкретный пример формирования климатического массива данных. Выражен алгоритм расчета полных тепловых потерь за отопительный сезон, определяемых макроскопическими потоками жидкого теплоносителя и воздуха за пределы ОКС. На основе полученных алгоритмов построена векторная иерархическая информационная модель энергосбережения полного жизненного цикла проекта, описывающая макроскопические потоки тепла в окружающую среду и методы обновления и верификации базовой информации модели.

Выполненные исследования позволяют перейти к этапу интеграции информационной модели энергосбережения за счет учета потоков, определяемых геометрическими и теплофизическими параметрами стен, крыш, подвальных помещений, окон, дверей и техническими характеристиками установок кондиционирования воздуха и отопления. Далее после учета влияния тепловых мостов на энергопотери станет возможным построение информационной модели экономических последствий мероприятий, направленных на энергосбережение.

Список источников

1. BP Statistical Review of World Energy. 2021. July. URL: <https://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/statistical-review-of-world-energy.html>.
2. Building and Climate Change by Environmental and Energy Study Institute. URL: <http://www.eesi.org/>.
3. Энергетическая стратегия Российской Федерации на период до 2035 года. Утверждена распоряжением Правительства Российской Федерации от 9 июня 2020 г. № 1523-р.
4. EU, Directive (EU) 2018/844 of the European Parliament and of the Council of 30 May 2018 amending Directive 2010/31/eu on the energy performance of buildings and Directive 2012/27/eu on energy efficiency // Official Journal of the European Union. 61.
5. *Santamouris M.* Energy and climate in the urban built environment. Routledge. 2013.
6. Energy for Europe by European Commission. URL: <https://ec.europa.eu/energy/en>.
7. *Lund H.* Renewable energy strategies for sustainable development // Energy. 2007. Vol. 32, Issue 6. P. 912–919.
8. *Reinhart C.F., Davila C.C.* Urban building energy modeling – a review of a nascent field // Build. Environ. 2016. Vol. 97. P. 196–202.
9. *Hong T., Piette M.A., Chen Y., Lee S.H., Taylor-Lange S.C., Zhang R., Sun K., Price P.* Commercial building energy saver: an energy retrofit analysis toolkit // Appl. Energy. 2015. No. 159. P. 298–309.
10. *Moghadam S.T., Delmastro C., Corgnati S.P., Lombardi P.* Urban energy planning procedure for sustainable development in the built environment: A review of available spatial approaches // J. Clean. Prod. 2017. Vol. 165. P. 811–827.
11. *Suganthi L., Samuel A.A.* Energy models for demand forecasting – a review // Renew. Sustain. Energy Rev. 2012. Vol. 16, no. 2. P. 1223–1240.

12. Hong T., Chen Y., Luo X., Luo N., Lee S.H. Ten questions on urban building energy modeling // *Build. Environ.* 2020. Vol. 168. P. 106508.
13. Abbasabadi N., Ashayeri M. Urban energy use modeling methods and tools; a review and an outlook for future tools // *Build. Environ.* 2019. P. 106270.
14. Ferrando M., Causone F. An overview of urban building energy modelling (ubem) tools // *Build. Simul.* 2020. Vol. 16. P. 3452–3459.
15. Johnston D. A physically-based energy and carbon dioxide emission model of the uk housing stock, Ph.D. thesis, Leeds Metropolitan University, 2018.
16. Lim H., Zhai Z.J. Review on stochastic modeling methods for building stock energy prediction // *Build. Simul.* 2017. Vol. 10. P. 607–624.
17. Ali U., Shamsi M.H., Hoare C., O'Donnell J. Gis-based residential building energy modeling at district scale, in: BSO 2018: 4th IBPSA-England Conference on Building Simulation and Optimization, Cambridge, United Kingdom, 11–12 September 2018, International Building Performance Simulation Association, 2018.
18. Hong T., Piette M.A., Chen Y., Lee S.H., Taylor-Lange S.C., Zhang R., Sun K., Price P. Commercial building energy saver: an energy retrofit analysis toolkit // *Appl. Energy.* 2015. No. 159. P. 298–309.
19. Reinhart C.F., Davila C.C. Urban building energy modeling – a review of a nascent field // *Build. Environ.* 2016. Vol. 97. P. 196–202.
20. Chen Y., Hong T., Piette M.A. Automatic generation and simulation of urban building energy models based on city datasets for city-scale building retrofit analysis // *Appl. Energy.* 2017. No. 205. P. 323–335.
21. Reinhart C., Dogan T., Jakubiec J.A., Rakha T., Sang A. Umi-an urban simulation environment for building energy use, daylighting and walkability // 13th Conference of International Building Performance Simulation Association. Chambéry, France, 2013.
22. Walter E., Kämpf J.H. A verification of citysim results using the bestest and monitored consumption values // *Proceedings of the 2nd Building Simulation Applications conference*, no. CONF, Bozen-Bolzano University Press, 2015. P. 215–222.
23. Vermeulen T., Kämpf J.H., Beckers B. Urban form optimization for the energy performance of buildings using citysim, Tech. rep, EPFL Solar Energy and Building Physics Laboratory (LESO-PB), 2013.
24. Polly B., Kutscher C., Macumber D., Schott M., Pless S., Livingood B., Van Geet O. From zero energy buildings to zero energy districts, (National Renewable Energy Laboratory, No. NREL/CP-5500-66292, NREL, Golden, CO, USA, 2016.
25. Davila C.C., Reinhart C.F., Bemis J.L. Modeling Boston: a workflow for the efficient generation and maintenance of urban building energy models from existing geospatial datasets // *Energy.* 2016. Vol. 117. P. 237–250.
26. Corrado V., Ballarini I., Madrazo L., Nemirovskij G. Data structuring for the ontological modelling of urban energy systems: The experience of the SEMANCO project // *Sustainable Cities and Society.* 2015. Vol. 14. P. 223–235.
27. Lidelöw S., Örn T., Luciani A., Rizzo A. Energy-efficiency measures for heritage buildings: A literature review // *Sustain. Cities Soc.* 2019. Vol. 45. P. 231–242.
28. Amal A.Al-Shargabi, Abdulbasit Almhafdy, Dina M.Ibrahim, Francisco Chiclana. Buildings' energy consumption prediction models based on buildings' characteristics: Research trends, taxonomy, and performance measures // *Journal of Building Engineering.* 2022. Vol. 54, no. 15. P. 104577.
29. Мохова Н.М., Мокина Ю.О., Симченко О.Л. Сравнительный анализ наиболее эффективных теплоизоляционных материалов стен жилых зданий, применяемых в строительстве // *Сб. материалов XXXI Респ. выст.-сес. студ. инновац. проектов и XL Науч.-техн. конф. молодежи АО «ИЭМЗ «Купол».* Ижевск, 2021. С. 95–99.

30. Прогноз и архив погоды. URL:<http://weatherarchive.ru/>.
31. *Gorbaneva E., Mishchenko A.* BIM-technologies to optimize the catching-up schedule for the implementation of the construction schedule plan, taking into account external stochastic impacts // *Real estate: economic, management.* 2022. No. 1. P. 1–12.
32. *Мищенко А.В., Горбанева Е.П.* Реализация BIM полного жизненного цикла объекта недвижимости // *Изв. вузов. Строительство.* 2021. № 11. С. 95–109.

References

1. BP Statistical Review of World Energy. 2021. July. URL: <https://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/statistical-review-of-world-energy.html>.
2. Building and Climate Change by Environmental and Energy Study Institute. URL:<http://www.eesi.org/>.
3. Energy strategy of the Russian Federation for the period up to 2035. Approved by the Decree of the Government of the Russian Federation No. 1523-r dated June 9, 2020. (In Russ.).
4. EU, Directive (EU) 2018/844 of the European Parliament and of the Council of 30 May 2018 amending Directive 2010/31/eu on the energy performance of buildings and Directive 2012/27/eu on energy efficiency. *Official Journal of the European Union.* 61.
5. *Santamouris M.* Energy and climate in the urban built environment. Routledge. 2013.
6. Energy for Europe by European Commission. URL:<https://ec.europa.eu/energy/en>.
7. *Lund H.* Renewable energy strategies for sustainable development. *Energy.* 2007; 32(6): 912–919.
8. *Reinhart C.F., Davila C.C.* Urban building energy modeling—a review of a nascent field. *Build. Environ.* 2016; 97: 196–202.
9. *Hong T., Piette M.A., Chen Y., Lee S.H., Taylor-Lange S.C., Zhang R., Sun K., Price P.* Commercial building energy saver: an energy retrofit analysis toolkit. *Appl. Energy.* 2015; (159): 298–309.
10. *Moghadam S.T., Delmastro C., Corgnati S.P., Lombardi P.* Urban energy planning procedure for sustainable development in the built environment: A review of available spatial approaches. *J. Clean. Prod.* 2017; 165: 811–827.
11. *Suganthi L., Samuel A.A.* Energy models for demand forecasting – a review. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2012; 16 (2): 1223–1240.
12. *Hong T., Chen Y., Luo X., Luo N., Lee S.H.* Ten questions on urban building energy modeling. *Build. Environ.* 2020; 168: 106508.
13. *Abbasabadi N., Ashayeri M.* Urban energy use modeling methods and tools; a review and an outlook for future tools. *Build. Environ.* 2019. 106270.
14. *Ferrando M., Causone F.* An overview of urban building energy modelling (ubem) tools. *Build. Simul.* 2020; 16: 3452–3459.
15. *Johnston D.* A physically-based energy and carbon dioxide emission model of the uk housing stock, Ph.D. thesis, Leeds Metropolitan University, 2018.
16. *Lim H., Zhai Z.J.* Review on stochastic modeling methods for building stock energy prediction. *Build. Simul.* 2017; 10: 607– 624.
17. *Ali U., Shamsi M.H., Hoare C., O'Donnell J.* Gis-based residential building energy modeling at district scale, in: BSO 2018: 4th IBPSA-England Conference on Building Simulation and Optimization, Cambridge, United Kingdom, 11–12 September 2018, International Building Performance Simulation Association, 2018.

18. Hong T., Piette M.A., Chen Y., Lee S.H., Taylor-Lange S.C., Zhang R., Sun K., Price P. Commercial building energy saver: an energy retrofit analysis toolkit. *Appl. Energy*. 2015; (159): 298–309.
19. Reinhart C.F., Davila C.C. Urban building energy modeling—a review of a nascent field. *Build. Environ.* 2016; 97: 196–202.
20. Chen Y., Hong T., Piette M.A. Automatic generation and simulation of urban building energy models based on city datasets for city-scale building retrofit analysis. *Appl. Energy*. 2017; (205): 323–335.
21. Reinhart C., Dogan T., Jakubiec J.A., Rakha T., Sang A. Umi-an urban simulation environment for building energy use, daylighting and walkability, in: 13th Conference of International Building Performance Simulation Association. Chambéry, France, 2013.
22. Walter E., Kämpf J.H. A verification of citysim results using the bestest and monitored consumption values. Proceedings of the 2nd Building Simulation Applications conference, no. CONF, Bozen-Bolzano University Press, 2015. P. 215–222.
23. Vermeulen T., Kämpf J.H., Beckers B. Urban form optimization for the energy performance of buildings using citysim, Tech. rep, EPFL Solar Energy and Building Physics Laboratory (LESO-PB), 2013.
24. Polly B., Kutscher C., Macumber D., Schott M., Pless S., Livingood B., Van Geet O. From zero energy buildings to zero energy districts. National Renewable Energy Laboratory, No. NREL/CP-5500-66292, NREL, Golden, CO, USA, 2016.
25. Davila C.C., Reinhart C.F., Bemis J.L. Modeling Boston: a workflow for the efficient generation and maintenance of urban building energy models from existing geospatial datasets. *Energy*. 2016; 117: 237–250.
26. Corrado V., Ballarini I., Madrazo L., Nemirovskij G. Data structuring for the ontological modelling of urban energy systems: The experience of the SEMANCO project. *Sustainable Cities and Society*. 2015; 14: 223–235.
27. Lidelöv S., Örn T., Luciani A., Rizzo A. Energy-efficiency measures for heritage buildings: A literature review. *Sustain. Cities Soc.* 2019; 45: 231–242.
28. Amal A.Al-Shargabi, Abdulbasit Almhafdy, Dina M.Ibrahim, Francisco Chiclana. Buildings' energy consumption prediction models based on buildings' characteristics: Research trends, taxonomy, and performance measures. *Journal of Building Engineering*. 2022; 54(15): 104577.
29. Mokhova N.M., Mokina Yu.O., Simchenko O.L. Comparative analysis of the most effective thermal insulation materials of the walls of residential buildings used in construction. Collection of materials of the XXXI Republican exhibition-session of student innovative projects and the XL Scientific and Technical Conference of the youth of JSC "IEMZ «Dome». Izhevsk, 2021. P. 95–99. (In Russ.).
30. Weather forecast and archive. URL:<http://weatherarchive.ru/>. (In Russ.).
31. Gorbaneva E., Mishchenko A. BIM-technologies to optimize the catching-up schedule for the implementation of the construction schedule plan, taking into account external stochastic impacts. *Real estate: economic, management*. 2022; (1): 1–12.
32. Mishchenko A.V., Gorbaneva E.P. Implementation of BIM of the full life cycle of a real estate object. *Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo = News of Higher Educational Institutions. Construction*. 2021; (11): 95–109. (In Russ.).

Информация об авторах

Е.П. Горбанева – кандидат технических наук, доцент, egorbaneva@vgasu.vrn.ru

И.А. Косовцева – старший преподаватель, ilona.kosovceva@vgasu.vrn.ru

Information about the authors

E.P. Gorbaneva – PhD, Ass. Professor, egorbaneva@vgasu.vrn.ru

I.A. Kosovtseva – Senior Lecturer, ilona.kosovceva@vgasu.vrn.ru

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article. The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 23.03.2022
Одобрена после рецензирования 22.04.2022
Принята к публикации 29.04.2022

The article was submitted 23.03.2022
Approved after reviewing 22.04.2022
Accepted for publication 29.04.2022