DOI: 10.34031/2618-7183-2021-4-3-23-40

Жуйков С.В.*, архитектор,
Южно-Уральский государственный университет, Россия
*Ответственный автор E-mail: zhuikov@susu.ru

ЭКСЕРГЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ЗДАНИЯ КАК КЛЮЧЕВОГО ЭЛЕМЕНТА СИСТЕМЫ ТЕПЛООБЕСПЕЧЕНИЯ

Аннотация: в работе выполнено исследование комплексного влияния погодных-климатических факторов и их изменчивости на нужды энергии и эксергии при создании теплового комфорта в доме с различными инженерно-архитектурными характеристиками. Подтверждено, что даже для домов с относительно низкими теплотехническими характеристиками, построенными в соответствии с нормативными документами, роль солнечной радиации в формировании теплового баланса, особенно в начале и в конце отопительного сезона, является важной. Исследования показали, что вследствие совместного влияния внешних метеорологических факторов, при улучшении теплотехнических характеристик домов, корреляция между потребностью энергии для создания благоприятного микроклимата и температурой наружного воздуха существенно ухудшается. Определено, что при этом значение достоверности аппроксимации снижается от 1 (при линейной зависимости) к 0,55 и ниже (при максимально возможных на сегодняшний день улучшенных теплотехнических характеристиках дома). Такое положение существенно корректирует режимы работы и характеристики СТ. В частности это обуславливает необходимость усовершенствования системы автоматического регулирования СТ. А это, в свою очередь увеличивает инвестиционную составляющую системы. Разработан метод расчета потребностей эксергии для создания теплового комфорта внутри дома путем учета с помощью теории вероятностей влияния случайного характера метеорологических факторов в пределах отопительного периода, на основе которого в условиях региона показано и расчетным путем подтверждено, что при определении сезонных потребностей эксергии на теплообеспечение дома использование стационарного подхода приводит к занижению результатов на 12...28% по сравнению с динамическим подходом.

Ключевые слова: здание, эксергия, анализ, строительство, система, элемент

Введение

Обычно погодные-климатические условия не являются благоприятными для человеческого организма [4]. В результате были созданы соответствующие ограждающие конструкции и прочие инженерные системы, которые защищают от неблагоприятных условий и обеспечивают создание теплового комфорта внутри помещения [10]. При этом дом является основным элементом этой системы. Именно через дом, как через своеобразный фильтр, осуществляется влияние погодных-климатического фактора и СТ на микроклимат внутри помещения [5].

Для обеспечения благоприятных условий внутри домов потребляется значительная часть энергоресурсов, которые и сегодня, в основном, базируются на традиционных ископаемых видах топлива и вызывают значительную долю выбросов парниковых газов и другие виды негативной антропогенной нагрузки на окружающую среду [7].

За последние десятилетия появился целый ряд концепций создания домов: дома с низким потреблением энергии (low energy building), пассивные дома (passive house), дома с нулевым использованием энергии (zero energy building), «умные» здания (smart building), биоклиматическая архитектура (биоклиматических архитектура), низкоэксергетические дома (low exergy building) [1]. Одной из основных особенностей этих концепций является существенное снижение затрат энергии на климатизацию за счет целого спектра инженерно-архитектурных решений (повышение тепловой защиты и снижение воздухопроницаемости ограждающих конструкций, утилизация теплоты вытяжного воздуха, использование возобновляемых источников энергии и энергоэффективных технологий, внедрение компьютерных технологий, объемно-планировочные решения и т. п.) [3].

Методы и материалы

Потребности энергии для теплообеспечения дома можно определить на основе энергетического баланса воздуха внутри помещения, которое в общем виде можно записать как

$$\dot{E}n_{in} + \dot{E}n_{out} - dEn_{stored} = 0. \quad (1)$$

где $\dot{E}n_{in}$, $\dot{E}n_{out}$ – соответственно входной и выходной поток энергии через контрольную поверхность, Вт;

dEn_{stored} – изменение энергии контрольного объема воздуха, Вт.

Формулу (1) можно записать также в виде

$$\dot{Q}_{trans} + \dot{E}n_{inf} + \dot{E}n_{vent} + \dot{Q}_{int} + \dot{Q}_{sol} + \dot{Q}_{dem} - dEn_{stored} = 0, \quad (2)$$

где $\dot{Q}_{trans}$ – поток теплоты через ограждающие конструкции за счет теплопередачи, Вт;

$\dot{E}n_{inf}$ – затраты энергии на нагрев инфильтрационного воздуха, Вт;

$\dot{E}n_{vent}$ – затраты энергии на нагрев вентиляционного воздуха, Вт;

$\dot{Q}_{int}$ – внутренние тепловыделения в помещении, Вт;

$\dot{Q}_{sol}$ – поступление солнечной радиации в помещение, Вт;

$\dot{Q}_{dem}$ – потребности энергии в форме теплоты для компенсации потерь, Вт.

Эксергетический баланс дома (помещения), который рассматривается как контрольный объем, согласно можно записать в виде

$$\dot{E}_{in} + \dot{E}_{out} - \dot{E}_{stored} - \dot{E}_{irrev} = 0, \quad (3)$$

где $\dot{E}_{in}$, $\dot{E}_{out}$ – соответственно входная и выходная (отрицательное значение) Эксергия, Вт;

$\dot{E}_{stored}$ – увеличение или уменьшение (отрицательное значение) эксергии системы, Вт;

$\dot{E}_{irrev}$ – потери эксергии из-за необратимости в системе, обусловленные тепловыми потоками и смешиванием веществ при разных температурах, Вт.

В свою очередь сумму $\dot{E}_{in} + \dot{E}_{out}$ можно записать в виде

$$\dot{E}_{in} + \dot{E}_{out} = \sum_j \dot{Q}_j \left(1 - \frac{T_0}{T_j}\right) + \sum_i \dot{m}_{in_i} e_{in_i} + \sum_k \dot{m}_{out_k} e_{out_k}, \quad (4)$$

где $\dot{Q}_j$ – j -й тепловой поток, Вт, в (положительное значение) или из (отрицательное значение) контрольного объема при температуре T_j ;

T_0 – температура внешней среды, относительно которой определяется эксергия теплового потока, К;

$\dot{m}_{in_i}$, $\dot{m}_{out_k}$ – соответственно массовый расход входного i -го потока и исходного k -го потока вещества в и из системы, кг/с;

e_{in_i} , e_{out_k} – соответственно удельная эксергия входного i -го потока и исходного k -го потока вещества в и из системы, кДж / кг.

Потребности эксергии для обеспечения теплом дома невозможно определить из уравнения эксергетического баланса, поскольку слагаемое, определяющее эти потребности, дополнительно включает потери эксергии.

Потребности энергии для теплообеспечения дома определяются как количество энергии необходимой для поддержания комфортного микроклимата внутри помещения [19]. Аналогично потребность эксергии

для теплообеспечения дома также есть необходимое для поддержания комфортного микроклимата количество эксергии [11]. Но эксергия, подаваемая в помещение, имеет разные значения. Например, она может подаваться при помощи системы отопления с различными температурами теплоносителя. Для поддержания температуры воздуха внутри помещения 18°C определенная часть подведенной эксергии теряется [20]. Причем при разных температурах теплоносителя в системе отопления эти потери будут разными [9]. В отличие от случая подачи избыточной энергии, избыточная подача эксергии в помещение не вызывает перегрева помещения. В данном случае имеет место увеличение потерь эксергии при передаче теплоты от среды с более высокой температурой к среде с более низкой температурой [6].

Согласно потребности в эксергии для создания соответствующего теплового комфорта определяется как минимальное количество работы, необходимое для обеспечения соответствующей потребности в энергии [13]. При этом минимальное количество работы соответствует случаю, когда энергия подается с минимально возможным качеством [12]. То есть для определения потребности эксергии необходимо определить качество соответствующей потребности в энергии [8].

Упрощенный метод по расчету потребностей в эксергии разработан в работе, где предусмотрено, что энергетические потребности для обеспечения теплом дома характеризуются эксергией, соответствующей оперативной температуре расчетной зоны (внутри дома) [14]. При небольшой разнице между температурой воздуха и средне радиационной температурой внутри помещения оперативную температуру можно заменить температурой внутреннего воздуха T_{in} . В результате имеем следующую формулу для определения потребности эксергии для создания теплового комфорта в доме

$$\dot{E}_{ltm} = \dot{Q}_{dem} \left(1 - \frac{T_0}{T_{in}}\right) = \frac{\dot{Q}_{dem}}{T_{in}} (T_{in} - T_0). \quad (5)$$

На первом этапе исследований использован квазистационарный подход. Процессы аккумуляции энергии отвергнуты, а энергетический баланс дома составлен для суточного промежутка времени $\tau_n = 24$ часа как стационарный процесс

$$Q_{trans}(\tau_n) + E_{n_{inf}}(\tau_n) + E_{n_{vent}}(\tau_n) + Q_{int}(\tau_n) + Q_{sol}(\tau_n) + Q_{dem}(\tau_n) = 0, \quad (6)$$

где $\tau_k = 24$ ч – промежуток времени, в пределах которого внешние, погодные условия принимаются неизменными.

Если в формуле $Q_{dem}(\tau_n) < 0$ – случай, когда приход энергии (за счет солнечной радиации и внутренних тепловыделений) в контрольный объем помещения больше выход, то принимается, что $Q_{dem}(\tau_n) = 0$. Хотя в общем случае избыточные поступления энергии можно аккумулировать для использования к периоду их нехватки.

Соответственно потребности эксергии для теплообеспечения дома на промежутке времени τ_n будем определять по формуле

$$E_{dem}(\tau_n) = Q_{dem}(\tau_n) \left(1 - \frac{T_0(\tau_n)}{T_{in}}\right) \quad (7)$$

Тогда суммарные за период значения составляющих энергетического баланса, потребностей энергии или эксергии для создания теплового комфорта внутри дома будут определяться по формуле

$$Y_X^{year} = \sum_{k=1}^N Y_X(\tau_n) \quad (8)$$

где Y – общее обозначение энергии или эксергии, Вт·ч;

X – общее обозначение индекса составляющих энергетического баланса или потребности эксергии;

K – номер суток;

N – количество суток в отопительном сезоне.

Средоточенные в многолетнем разрезе сезонные значения составляющих энергетического баланса, потребностей энергии или эксергии, Вт·ч, на теплообеспечения дома будут определяться по формуле:

$$Y_{X_{aver}}^{year} = \frac{\sum_{j=1}^Z Y_{X_j}^{year}}{Z}, \quad (9)$$

где j – номер года;

Z – количество лет.

Изменчивость полученных показателей как внутри сезона, так и в многолетнем разрезе предложено оценить с помощью коэффициента, рассчитываемого по формуле:

$$CV_{Y_X} = \frac{\sigma_{Y_X}}{Y_{X_{aver}}}, \quad (10)$$

где σ_{Y_X} – среднее квадратичное отклонение анализируемого параметра.

Результаты и обсуждения

Выполним численное исследование влияния изменения теплотехнических характеристик дома на потребности энергии и эксергии для его теплообеспечения. Для этого рассмотрим трехэтажный дом с общей отапливаемой площадью 300 м². Выходные теплотехнические параметры таковы: усредненное значение приведенного сопротивления теплопередаче непрозрачных ограждений равно 1,5 (м²·К)/Вт; значение приведенного сопротивления теплопередаче прозрачных ограждений составляет 0,5 (м²·К)/Вт; кратность воздухообмена принята равной 0,6 ч⁻¹; внутренние тепловыделения уровне 2,5 Вт/м²; температура воздуха внутри здания принимается постоянной и равной 18°C; доля остекления южного фасада составляет 50%, западного и восточного 30%, северного 20%. Теплотехнические характеристики менялись в соответствии с данными, приведенными в табл. 1. Для удобства энергетические и эксергетические показатели отнесенные к 1 м² отапливаемой площади.

Таблица 1

Изменение теплотехнических характеристик при проведении числовых исследований

Table 1

Changes in thermal engineering characteristics during numerical studies

Характеристики дома	Низкие теплотехнические характеристики. Дом типа 1	Повышенные теплотехнические характеристики. Дом типа 2
Усредненное значение приведенного сопротивления теплопередаче непрозрачных ограждений, (м ² ·К)/Вт	1,5	4,5
Приведенное сопротивление теплопередаче прозрачных ограждений, (м ² ·К)/Вт	0,5	1,0
Коэффициент пропускания солнечной энергии прозрачными ограждениями	0,4	0,7
Вентиляция	За счет инфильтрации	Механическая с эффективностью рекуперации 0,9

На рис. 1. и 2. показаны графики изменения в многолетнем разрезе потребностей энергии и эксергии для теплообеспечения дома с низкими и повышенными теплотехническими характеристиками (табл. 1). При этом ось абсцисс показывает относительное отклонение годовых потребностей соответствующего показателя $Y_{X_j}^{year}$ от его усредненного в многолетнем сечении значения $Y_{X_{aver}}^{year}$.

Рис. 1. Изменение в многолетнем разрезе потребностей энергии для теплообеспечения дома:

а) – с низкими теплотехническими характеристиками;

б) – с повышенными характеристиками

Fig. 1. Change in the long-term section of energy needs for heat supply of the house:

а) – with low thermal characteristics;

б) – with increased characteristics

Рис. 2. Изменение в многолетнем разрезе потребностей эксергии для теплообеспечения дома:

а) – с низкими теплотехническими характеристиками;

б) – с повышенными характеристиками

Fig. 2. Change in the long-term section of exergy needs for heat supply of the house:

а) – with low thermal technical characteristics;

б) – with increased characteristics

Как видно из полученных данных, при повышении теплотехнических характеристик дома имеет место рост изменчивости годовых потребностей энергии и эксергии. При низких теплотехнических характеристиках дома суммарные за отопительный период потребности энергии в отдельные годы отличаются от их очагового в многолетнем сечении значения на 25% (рис. 1., а). При повышенных теплотехнических характеристиках данное отклонение уже составляет 45% (рис. 1., б). Изменчивость потребностей эксергии в многолетнем сечении возрастает по сравнению с изменчивостью потребностей энергии. Это обусловлено тем, что потребности эксергии имеют нелинейную (квадратичную) зависимость от одного из основных факторов – температуры наружного воздуха, который определяет эту изменчивость [18]. Так при низких теплотехнических характеристиках дома отклонения суммарных за отопительный период потребностей эксергии от их очагового в многолетнем сечении значения составляют 55% (рис. 2., а). Если теплотехнические характеристики дома повысить, то согласно результатам исследований, данные отклонения возрастают до 80% (рис. 2., б).

На рис. 3 и 4 показаны изменения в многолетнем сечении суммарных за отопительный период составляющих энергетического баланса для дома в соответствии с низкими и высокими теплотехническими характеристиками. Кроме того, на этих графиках показаны числовые значения усредненных в многолетнем разрезе, а также коэффициентов вариации, составляющих энергетического баланса дома.

Из рис. 3 и 4 видно, что при повышении теплотехнических характеристик дома в пределах технической возможности усредненное в многолетнем сечении значение суммарной за отопительный сезон потребности энергии снижается от $Q_{dem_{aver}}^{year} = 181 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^2$ до $Q_{dem_{aver}}^{year} = 26 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^2$, то есть в семь раз, что является довольно существенным. Кроме того, результаты исследований показывают довольно значительный рост коэффициента вариации сезонных потребностей энергии – от $CV_{Q_{dem}} = 0,115$ до $CV_{Q_{dem}} = 0,190$.

Проанализируем изменение других составляющих энергетического баланса дома.

Сезонные потери энергии за счет теплопередачи в среднем снижаются от $Q_{trans_{aver}}^{year} = 164 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^2$ (для здания с низкими теплотехническими характеристиками) к $Q_{trans_{aver}}^{year} = 66 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^2$ (для здания с повышенными теплотехническими характеристиками). Вместе с тем коэффициент вариации этой составляющей баланса остается неизменным и составляет $CV_{Q_{trans}} = 0,079$. Это объясняется тем, что данные теплотери зависят от одного параметра, вызывающие изменчивость – разности температур внутреннего и наружного воздуха, который является линейным относительно приведенного сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций. При такой зависимости увеличение теплотехнических характеристик дома (повышение приведенного сопротивления теплопередаче) не вызывает роста коэффициента вариации теплотери при теплопередаче.

Суммарные за отопительный сезон затраты энергии на нагрев вентиляционного воздуха в доме с низкими теплотехническими характеристиками составляют в среднем $56 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^2$, а для дома с повышенными теплотехническими характеристиками – $5 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^2$. Такое существенное уменьшение обусловлено тем, что в первом случае вентиляция осуществляется за счет инфильтрации (что является характерным для большинства существующих домов России), а во втором – за счет принудительной с коэффициентом эффективности утилизатора теплоты вытяжного воздуха равного 0,9 (табл. 1). Увеличение коэффициента вариации расхода энергии на нагрев вентиляционного воздуха по сравнению с коэффициентом вариации потери энергии за счет теплопередачи для дома с низкими теплотехническими характеристиками обусловлено следующим. Потребности энергии на нагрев инфильтрационного воздуха имеют нелинейную, почти квадратичную зависимость от разности температур внутреннего и наружного воздуха через физику явления естественной инфильтрации и зависимости плотности воздуха от температуры наружного воздуха. В результате, для дома с низкими теплотехническими характеристиками (дом типа 1), где используется естественная вентиляция, коэффициент вариации расхода энергии на нагрев вентиляционного воздуха составляет $CV_{Q_{inf}} = 0,145$, а для дома типа 2, где используется механическая вентиляция, которая уже имеет линейную зависимость от разности температур внутреннего и наружного воздуха $CV_{Q_{vent}} = 0,087$.

Что же касается данных по поступлениям солнечной радиации в помещение, то имеем следующие результаты исследований. В первом случае (то есть для дома типа 1 – с низкими теплотехническими характеристиками) суммарный за отопительный сезон усредненное значение этой величины составляет $26 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^2$ с коэффициентом вариации в многолетнем разрезе $CV_{Q_{sol}} = 0,066$. Для дома типа 2 (с повышенными теплотехническими характеристиками) сезонное значение поступление солнечной энергии в помещение в среднем выросло до $32 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^2$ за счет увеличения коэффициента пропускания солнечной энергии прозрачными ограждениями (табл. 1), а коэффициент вариации немного снизился до $CV_{Q_{sol}} = 0,061$.

Сезонные внутренние тепловыделения являются неизменными как в многолетнем сечении, так и для типов домов и составляют $14 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^2$.

Если в комплексе проанализировать приведенные на рис. 3. и 4 данные, то рост коэффициента вариации в многолетнем разрезе потребностей энергии для теплообеспечения дома при повышении его теплотехнических характеристик обусловлено ростом доли составляющих приходной части энергетического баланса (а именно за счет солнечной радиации и внутренних тепловыделений), которые с другой стороны характеризуются относительно низкой изменчивостью.

Рис. 3. Изменение в многолетнем разрезе суммарных за отопительный период составляющих энергетического баланса дома с низкими теплотехническими характеристиками
Fig. 3. The change in the long-term section of the total components of the energy balance of a house with low thermal characteristics for the heating period

На рис 5 показаны изменения в многолетнем сечении сезонных потребностей эксергии для дома в соответствии с низкими и высокими теплотехническими характеристиками. На этих графиках также представлено значение средоточенных в многолетнем сечении сезонных потребностей эксергии, а также значение их коэффициентов вариации. Из приведенных данных видно, что суммарный за отопительный период нужды эксергии для теплообеспечения дома значительно ниже, чем потребность в энергии. Например, для дома с низкими теплотехническими характеристиками данные потребности эксергии составляют $E_{dem_{aver}}^{year} = 12,7 \text{ кВт} \cdot \text{ч}/\text{м}^2$, в то время, когда аналогичные потребности энергии для этого же доме уровне $E_{dem_{aver}}^{year} = 181 \text{ кВт} \cdot \text{ч}/\text{м}^2$ (см. рис. 3). Как уже указывалось выше, это как раз и определяет появление в последнем десятилетии новой концепции домов – низкоэксергетических домов (low exergy building). Данная концепция указывает на необходимость обеспечения соответствующих параметров микроклимата внутри помещений низкоэксергетическими источниками.

Рис. 4. Изменение в многолетнем разрезе суммарных за отопительный период составляющих энергетического баланса здания с повышенными теплотехническими характеристиками

Fig. 4. The change in the long-term section of the total components of the energy balance of a building with increased thermal characteristics for the heating period

Из рис. 5. также видно, что при повышении теплотехнических характеристик дома согласно данным табл. 1. сезонные потребности эксергии для создания благоприятного микроклимата существенно снижаются от $E_{\text{dem, aer}}^{\text{year}} = 12,7 \text{ kJ} \cdot \text{h} / \text{m}^2$ до $E_{\text{dem, aer}}^{\text{year}} = 1,9 \text{ kJ} \cdot \text{h} / \text{m}^2$. Это обусловлено снижением соответствующих потребностей энергии (см. рис. 3. и 4.).

Рис. 5. Изменение в многолетнем разрезе суммарных за отопительный период потребностей эксергии для теплообеспечения дома:

1 – с низкими теплотехническими характеристиками;

2 – с повышенными теплотехническими характеристиками

Fig. 5. Change in the long-term section of the total exergy needs for the heating period for the heat supply of the house:

1 – with low thermal characteristics;

2 – with increased thermal characteristics

Как показывают данные на рис. 5, рост теплотехнических характеристик дома вызывает повышение изменчивости в многолетнем разрезе сезонных потребностей эксергии для его теплообеспечения, о чем указывает изменение коэффициента вариации данного параметра от $CV_{E_{dem}^{year}} = 0,224$ до $CV_{E_{dem}^{year}} = 0,304$.

Вместе с тем E_{dem} видим, что увеличение коэффициента вариации сезонных потребностей эксергии меньше чем для случая потребностей энергии (от $CV_{Q_{dem}^{year}} = 0,115$ до $CV_{Q_{dem}^{year}} = 0,190$). Если сравнить

значение коэффициента вариации для сезонных потребностей энергии с этим же показателем для сезонных потребностей эксергии, то можно увидеть, что для тех же характеристик дома изменчивость потребностей эксергии больше. Для дома с низкими теплотехническими характеристиками, эти коэффициенты

соответственно составляют $CV_{Q_{dem}^{year}} = 0,115$ и $CV_{Q_{dem}^{year}} = 0,224$, а для дома с повышенными dem

теплотехническими характеристиками – $CV_{Q_{dem}^{year}} = 0,190$ и $CV_{Q_{dem}^{year}} = 0,304$. Это объясняется тем, что

потребности эксергии имеют квадратичную зависимость от одного из основных факторов изменчивости – разности температур внутреннего и наружного воздуха. В то время, когда потребности энергии линейно зависят от данного фактора изменчивости.

Тенденции по повышению теплотехнических характеристик дома и максимально возможного использования теплоэнергетического потенциала внешнего климата также вносят соответствующие коррективы в так называемые графики тепловой нагрузки. По данным графикам определяют, в частности, параметры и режимы работы СТ домов и целых жилых массивов [17].

Для примера, на рис. 6. показаны типовые графики тепловых нагрузок района города. Расчетные теплопотери промышленных зданий (кривая 1) составляют 500 МВт. Вогнутый характер кривой 1 объясняется учетом инфильтрации. Часть теплопотерь промышленных зданий, а именно 100 МВт компенсируется внутренними тепловыделениями (линия 2), поэтому расчетная потребность теплоты на отопление промышленных зданий меньше расчетных теплопотерь зданий и составляет 400 МВт (кривая 3). По этой же причине отопление промышленных зданий должно включаться в работу при наружной температуре менее + 4°C. При наружных температурах выше +4°C теплопотери промышленных зданий компенсируются внутренними тепловыделениями.

График затрат энергии на вентиляцию промышленных и общественных зданий имеет излом при расчетной наружной температуре вентиляции -15°C (линия 4 на рис. 6). График потерь на отопление жилых

и общественных зданий показан на рис. 6. линией 5. Суммарный график потребностей теплоты на отопление и вентиляцию по району в целом (кривая 6 на рис. 6) имеет две точки излома: одну при расчетной наружной температуре для вентиляции, другую – при температуре включения системы отопления промышленных зданий.

Рис. 6. Примеры графиков зависимости тепловой нагрузки от температуры наружного воздуха:

- 1 – потери энергии, обусловленные теплопередачей и нагревом инфильтрационного воздуха в промышленных зданиях;
- 2 – внутренние тепловыделения в промышленных зданиях;
- 3 – потребность в энергии, обусловленные теплопередачей и нагревом инфильтрационного воздуха в промышленных зданиях с учетом внутренних тепловыделений;
- 4 – затраты энергии на нагрев вентиляционного воздуха промышленных и общественных зданий;
- 5 – потери энергии, обусловленные теплопередачей и нагревом инфильтрационного воздуха в жилых и общественных зданиях;
- 6 – суммарные потребности энергии для теплообеспечения жилых, общественных и промышленных зданий

Fig. 6. Examples of graphs of the dependence of the heat load on the outdoor air temperature:

- 1 – energy losses due to heat transfer and heating of infiltration air in industrial buildings;
- 2 – internal heat dissipation in industrial buildings;
- 3 – energy demand caused by heat transfer and heating of infiltration air in industrial buildings, taking into account internal heat emissions;
- 4 – energy costs for heating the ventilation air of industrial and public buildings;
- 5 – energy losses caused by heat transfer and heating of infiltration air in residential and public buildings;
- 6 – total energy requirements for heat supply of residential, public and industrial buildings

Из рис. 6. видим, что потребность энергии для теплообеспечения домов определяется только температурой наружного воздуха и эта зависимость имеет линейный характер. Как показывает анализ, такая методология построения графиков тепловой нагрузки базируется на упрощенных подходах и оправдана для домов, построенных согласно стандартам, регламентирующим относительно низкие теплозащитные характеристиками ограждающих конструкций и в полной мере не учитывают роль солнечной радиации и внутренних тепловыделений при формировании теплового режима.

На рис. 7 расчетными точками показана зависимость потребностей тепловой нагрузки двух типов дома с теплотехническими характеристиками, приведенными в табл. 1, от температуры окружающей среды. Также на рис. 7. приведены соответствующие прямые линейных регрессий и значения достоверности аппроксимации линейной зависимости потребностей тепловой нагрузки от температуры внешней среды. Видим, что, действительно, для здания с относительно низкими теплотехническими характеристиками зависимость тепловой нагрузки от температуры внешней среды можно считать линейной. Достоверность аппроксимации в этом случае составляет $R^2=0,96$. Для дома с повышенными теплотехническими характеристиками корреляционная связь потребностей энергии на теплообеспечение и температуры внешней среды достаточно низкий – достоверность аппроксимации равна $R^2=0,55$. С учетом предварительного анализа такой разброс рас-

четных точек обусловлен существенной долей таких составляющих энергетического баланса здания как внутренние тепловыделения и приход солнечной радиации (см. рис. 3. и 4). При одной и той же температуре внешней среды, за счет приходной части теплового баланса, потребность в тепловой нагрузке может довольно существенно отличаться. Это значительно влияет на параметры и режимы работы СТ и должно учитываться.

Для предложенных в исследованиях характеристиках дома (табл. 1), коэффициент изменчивости потребностей энергии внутри сезона возрастает от 0,44...0,65 до 0,62...0,90, а потребностей эксергии – от 0,60...1,00 до 0,79...1,22.

Существенное ухудшение линейной корреляции между тепловой нагрузкой и температурой наружного воздуха при повышении теплотехнических характеристик здания существенно влияет на дополнительные затраты, обусловленные несоответствием режимов работы СТ, что работает по линейному графику, действительным тепловым режимам здания [15]. Если СТ не обеспечивает соответствующих условий внутри помещения (недогрева), то потребитель пытается самостоятельно создать такие условия путем использования подручных, как правило, менее эффективных устройств или средств (чаще всего с помощью электрического нагрева) [16]. Очевидно, что дополнительные затраты при недогреве помещения больше дополнительных затрат при перегреве. Как показывают результаты анализа, при изменении отношения неравноценности дополнительных затрат, связанных с недогревом и перегревом помещения, в пределах 1,2...2, для дома с повышенными теплотехническими характеристиками (табл. 1) ежегодные расходы на теплообеспечение дома могут увеличиваться до 25% (рис. 8). Для дома с относительно низкими теплотехническими характеристиками (табл. 1) данный рост ежегодных расходов не превышает 5 % (рис. 8).

Рис. 7. Зависимость потребностей в тепловой нагрузке СТ от температуры наружного воздуха:
1 – дом с низкими теплотехническими характеристиками;
2 – дом с повышенными теплотехническими характеристиками

Fig. 7. Dependence of the requirements for the thermal load of the ST on the outdoor air temperature:
1 – a house with low thermal characteristics;
2 – a house with increased thermal characteristics

Отношение неравноценности затрат при недогреве и перегреве помещения
Рис. 8. Зависимость возможных дополнительных ежегодных расходов при отклонении потребностей энергии от линейной зависимости:

1 – дом с низкими теплотехническими характеристиками;

2 – дом с повышенными теплотехническими характеристиками

Fig. 8. The dependence of possible additional annual expenses when the energy needs deviate from the linear dependence:

1 – a house with low thermal characteristics;

2 – a house with increased thermal characteristics

Пионерными исследованиями по обоснованию выбора стационарного или динамического подхода считаются работы итальянских исследователей Ангелотти (Angelotti) и Капуто (Caputo). Ими была оценена разница между эксергетическими характеристиками процессов нагрева и охлаждения, определенными в соответствии с использованием стационарного и динамического подхода для двух типичных климатических зон Италии [2]. При этом, для первого подхода были использованы в одном случае расчетные температуры отопления и охлаждения, а во втором – средние месячные температуры для самого холодного (январь) и самого теплого месяца (июль). Эксергетическая эффективность по динамическому методу определялась путем ячейки этого параметра, рассчитанного для каждого часа в течение месяца. В работах показано, что эксергетическая эффективность процесса нагрева, определенная по стационарному подходу на основе усредненных значений температуры, а не расчетной, является достаточно близким к этому параметру, рассчитанного по динамическому подходу. Относительно оценки процесса охлаждения, то, при использовании стационарного подхода можно использовать только расчетные температуры окружающей среды, что, в свою очередь, приводит к 40% погрешности по определению эксергетической эффективности по сравнению с динамическим подходом. Позже эти же авторы еще раз подтверждают полученные выводы, и указывают о целесообразности использования динамического подхода при оценке процессов охлаждения помещений и анализе более теплых климатических зон.

В работе выполнена оценка разницы между значениями эксергии воздух внутри помещений, полученных для различных статистических характеристик окружающей среды (среднего значения, моды и медианы) – стационарный метод, и значениями этой же эксергии, но рассчитанных на основе динамического подхода. При этом показано, что использование стационарного подхода приводит к существенному занижению эксергии внутреннего воздуха по сравнению с динамическим подходом. В жарком и влажном климате (Бангкок, Таиланд) значения эксергии сухого воздуха на 93% (для теплого периода года) и 89% (для холодного периода года) ниже значения эксергии воздуха, определенного на основе динамического подхода. В холодном климате (Де-Билт, Нидерланды) значения эксергии сухого воздуха, рассчитанное на основе стационарного метода есть на 5,8% (для теплого сезона) и 14,5% (для холодного сезона) меньше по сравнению со значением этого параметра, определенного с использованием динамического подхода. Для климатической зоны морского побережья (Лиссабон, Португалия) занижение с такого же оценки составляют 82,8% и 23,4% для теплого и холодного сезонов соответственно.

Джансен (Jansen) сделала сравнение с определения потребностей эксергии для отопления на основе стационарного (с использованием среднемесячных значений температуры внешней среды) и динамического (с использованием получасовых характеристик) методов. Результате такого оценивания показали, что для климата Нидерландов эксергетическая потребности на отопление, рассчитанные по динамическому подходу, является на 14...17% выше за те же эксергетическая потребности, но определение

по стационарным методом. Для других климатических районов получены следующие погрешности: 11% (Стокгольм, Швеция), 15% (Берлин, Германия), 34% (Мадрид, Испания).

В данной работе предложен общий методологический подход по обоснованию выбора метода оценки эксергетических характеристик СТ дома – стационарного или динамического.

Выше доказано, что для домов с относительно низкими теплотехническими характеристиками потребности энергии на создание благоприятного теплового комфорта в холодный период года могут быть выражены линейной функцией (см. рис. 7). Если ввести новую переменную $\Delta T(\tau_n) = T_{in} - T_0(\tau_n)$, где температура внутреннего воздуха T_{in} принята постоянной, то можно понять, что потребность в энергии также является линейной функцией относительно этого аргумента – разности температур внутреннего и наружного воздуха $\Delta T(\tau_n)$

$$Q_{dem}(\Delta T(\tau_n)) = k\Delta T(\tau_n) + b, \quad (11)$$

где k и b - коэффициенты.

Согласно (7) с учетом (11), потребности эксергии для теплообеспечения дома на промежутке времени τ_n можно выразить квадратичной функцией относительно разности температур $\Delta T(\tau_n)$

$$E_{dem}(\Delta T(\tau_n)) = (k\Delta T(\tau_n) + b) \left(\frac{\Delta T(\tau_n)}{T_{in}} \right) = \frac{k}{T_{in}} \Delta T^2(\tau_n) + \frac{b}{T_{in}} \Delta T(\tau_n) \quad (12)$$

Можно предположить, что разница температур ΔT является случайной величиной, которую можно формализовать с помощью теории вероятностей и математической статистики. Тогда, следуя динамического подхода, суммарный за отопительный период нужды эксергии $E_{dem}^{dyn,year}$ для создания теплового комфорта внутри дома можно определить по формуле

$$E_{dem}^{dyn,year} = \int_{\Delta T_{min}}^{\Delta T_{max}} E_{dem}(\Delta T) f(\Delta T) d\Delta T \quad (13)$$

где $f(\Delta T)$ – закон распределения разности температур как случайной величины, который будет тот же самый, что и для функционально связанной потребности эксергии; ΔT_{min} , ΔT_{max} – соответственно минимальное и максимальное значения разности температур в пределах отопительного периода, К.

В соответствии со стационарного подхода суммарный за отопительный период нужды эксергии $E_{dem}^{steady,year}$ будут признаваться по формуле:

$$E_{dem}^{steady,year} = E_{dem}(\Delta T_{aver}) = E_{dem} \left[\int_{\Delta T_{min}}^{\Delta T_{max}} \Delta T f(\Delta T) d\Delta T \right] \quad (14)$$

где ΔT_{aver} – усредненное за отопительный период значение разности температур внутреннего и наружного воздуха, К.

Итак, если проанализировать формулу (13) с учетом (12), то можно понять, что именно через квадратичную зависимость потребностей эксергии от разницы температур ΔT значение этого параметра, полученное по формуле (13), будет отличаться от значения, рассчитанного при помощи (14).

Относительное отклонение χ значение потребности эксергии $E_{dem}^{steady,year}$ (стационарный подход) от значения $E_{dem}^{dyn,year}$ (динамический подход) предлагается определить по формуле

$$\chi = \frac{E_{dem}^{dyn,year} - E_{dem}^{steady,year}}{E_{dem}^{dyn,year}} 100\%. \quad (15)$$

На рис. 9 приведено распределение суточной разницы температур $\Delta T(\tau_n)$ в пределах одного отопительного периода для условий г. Иваново, а также зависимость суточных потребностей энергии дома типа 1 (см. табл. 1) от этой же разницы. Из рис. 9,а видим, что, действительно параметр $\Delta T(\tau_n)$ можно

считать как такой, что подчиняется теории вероятностей – его изменение можно формализовать с помощью кривой распределения Пирсона типа I и даже нормальным законом. Также, с рис. 9,б видно, суточные потребности энергии заданного дома можно выразить линейной функцией (11), где $k = 21,5617$, $b = 104,771$.

Считая, что функция распределения разности температур $\Delta T(\tau_n)$ определяется кривой распределения Пирсона I типа (что обусловлено спецификой ряда $\Delta T(\tau_n)$ за ограничения максимально возможного значения $\Delta T(\tau_n)=10$ K), теоретически определено, что суммарный за отопительный период нужды эксергии $E_{dem}^{steady,year}$, рассчитанные по стационарным подходом, есть на 15 % меньше потребности эксергии $E_{dem}^{dyn,year}$, исчисленные по динамическим подходом. Если считать, что функция распределения разницы температур $\Delta T(\tau_n)$ определяется нормальным законом, то получим 19-процентное отклонение (в меньшую сторону) стационарного метода от динамического.

Рис. 9. Распределение суточной разницы температур $\Delta T(\tau_n)$, как случайной величины, в пределах отопительного периода для условий г. ваноно (а) и зависимость суточных потребностей в энергии дома типа 1 (табл. 1.) от этой же разницы (б)

Fig. 9. Distribution of the daily temperature difference $\Delta T(\tau_n)$, as a random variable, within the heating period for the conditions of the city of Vanovo (a) and the dependence of the daily energy needs of a type 1 house (Table 1) on the same difference (b)

Потребности эксергии по стационарным и динамическим подходам для дома типа 1 (см. табл. 1.) также был оценен на основе статистической обработки данных. При этом, данные потребности в первом случае определялись с использованием формулы (14), где ΔT_{aver} принималось равным средним за отопительный период статистическому значению разности температур внутреннего и наружного воздуха, К. А во втором случае – с помощью формул (7) и (8) (на рис. 2 и 5 приведены результаты по определению потребностей эксергии по динамическим подходом). Полученные результаты приведены на рис. 10.

Итак, видим, что, действительно, для всех лет суммарный за отопительный период нужды эксергии $E_{dem}^{steady,year}$ рассчитаны по стационарному подходу и существует меньше потребности эксергии $E_{dem}^{dyn,year}$, исчисленные по динамическому подходу. Причем эта разница меняется для разных лет от 12 до 28%.

Стоит указать, что поскольку потребности энергии на теплообеспечение дома с относительно низкими теплотехническими характеристиками являются линейными относительно разности температур внутреннего и наружного воздуха, то, для определения сезонных значений этого показателя достаточно использовать стационарный подход (по формуле аналогичной (14)), что и имеет место на практике.

Рис. 10. Годовые статистические значения нужд эксергии, определенных по стационарным и динамическим подходам, и их относительное отклонение:

- 1 – потребности эксергии $E_{dem}^{dyn,year}$, рассчитанные по динамическим методом;
- 2 – потребности эксергии $E_{dem}^{steady,year}$, рассчитанные по стационарным методом;
- 3 – относительное отклонение χ

Fig. 10. Annual statistical values of exergy needs determined by stationary and dynamic approaches, and their relative deviation:

- 1 – exergy needs $E_{dem}^{dyn,year}$, calculated by dynamic method;
- 2 – exergy needs $E_{dem}^{steady,year}$, calculated by stationary method;
- 3 – relative deviation of χ

Следовательно, предложенный метод, основанный на применении методов теории вероятностей и математической статистики для оценки эксергетических характеристик при теплообеспечении дома, может быть использован для обоснования выбору стационарной или динамического подхода при реализации эксергетического оценивания.

Выводы

Существенные снижения потребностей в энергии и эксергии на теплообеспечение зданий при существующих тенденциях повышения их теплотехнических характеристик сопровождается ростом изменчивости этих потребностей как внутри отопительного периода, так и в многолетнем разрезе. В свою очередь, это обуславливает рост неопределенности критериев принятия техникотехнологических решений в этих системах.

Отдельной задачей на сегодняшний день является выбор метода определения эксергетических характеристик (в частности потребностей эксергии) для теплообеспечения дома (динамического или стационарного), а также обоснование параметров окружающей среды, в отношении которых можно осуществлять эксергетический оценивания. Параметры рабочих тел СТ (особенно на конечных участках технологического процесса), а также характеристики внутреннего воздуха являются достаточно близкими к параметрам окружающей среды, которые в свою очередь все время меняются. Причем, это изменение имеет вероятностную природу. Соответственно и эксергетические характеристики СТ, будучи чувствительными к параметрам окружающей среды, также изменяются случайным образом.

Стационарный подход является более простым, но приводит к неточности по определению значений эксергетических потоков. Динамический подход является более сложным, но его применение обеспечивает точность при применении эксергетических методов анализа.

Литература

1. Chen A.Y., Chu J.C. TDVRP and BIM integrated approach for in-building emergency rescue routing // *Journal of Computing in Civil Engineering*. 2016. № 30 (5). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CP.1943-5487.0000522](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CP.1943-5487.0000522)
2. Cornaro C., Saponi D., Bucci F., Pierro M., Giammanco C. Thermal performance analysis of an emergency shelter using dynamic building simulation // *Energy and Buildings*. 2015. № 88. P. 122 – 134. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.11.055>
3. Domingo J., Barbero R., Iranzo A., Cuadra D., Servet J., Marcos M.A. Analysis and optimization of ventilation systems for an underground transport interchange building under regular and emergency scenarios // *Tunneling and Underground Space Technology*. 2011. № 26 (1). P. 179 – 188. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2010.07.001>
4. Fadli F., Kutty N., Wang Z., Zlatanova S., Mahdjoubi L., Boguslawski P., Zverovich V. Extending indoor open street mapping environments to navigable 3D citygml building models: Emergency response assessment. In *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences – ISPRS Archives*. 2018. Vol. 42. P. 241 – 247. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-4-161-2018>
5. Jiang H., Su L., Zhang W. (2014). Analysis of emergency evacuation path and its demonstration application in highly-crowded building. In *Proceedings of the 9th International Conference on Computer Science and Education, ICCSE 2014* (P. 372 – 375). <https://doi.org/10.1109/ICCSE.2014.6926488>
6. Ma G., Tan S., Shang S. The evaluation of building fire emergency response capability based on the CMM // *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2019. № 16 (11). <https://doi.org/10.3390/ijerph16111962>
7. Marich M., Horan T.A., Schooley B. Implications of time-critical information services on emergency response its architecture: Scenario-building and market package analysis // In *Association for Information Systems: 12th Americas Conference On Information Systems, AMCIS*. 2006. Vol. 1. P. 229 – 238.
8. Nam G., Hong W. Analysis of the current state in order to maintain the function of the communication buildings for maintaining function in emergency // *International Journal of Applied Engineering Research*. 2014. № 9 (23). P. 18191 – 18198.
9. Oh N., Okada A., Comfort L.K. Building Collaborative Emergency Management Systems in Northeast Asia: A Comparative Analysis of the Roles of International Agencies // *Journal of Comparative Policy Analysis: Research and Practice*. 2014. № 16 (1). P. 94 – 111. <https://doi.org/10.1080/13876988.2013.863639>
10. Pan Y., Yuan S., Xie D., Gao Y. Current status and suggestions on post-earthquake emergency safety assessment of buildings in China // *Tumu Gongcheng Xuebao/China Civil Engineering Journal*. 2017. № 50 (5). P. 19 – 26.
11. Poursha M., Khoshnoudian F., Moghadam A.S. Assessment of modal pushover analysis and conventional nonlinear static procedure with load distributions of federal emergency management agency for high-rise buildings // *Structural Design of Tall and Special Buildings*. 2010. № 19 (3). P. 291 – 308. <https://doi.org/10.1002/tal.487>
12. Semenyutina A., Lazarev S., Melnik K. Assessment of reproductive capacity of representatives of ancestral complexes and especially their selection of seed in dry conditions // *World Ecology Journal*. 2019. № 9 (1). P. 1 – 23. <https://doi.org/https://doi.org/10.25726/NM.2019.66.65.001>
13. Shi B., Yang W., Chen X. (2013). A game-theoretic analysis on dividing the limited budget between building emergency facilities and preparing resources. In *ICTIS 2013: Improving Multimodal Transportation Systems – Information, Safety, and Integration – Proceedings of the 2nd International Conference on Transportation Information and Safety* (P. 2323 – 2329).
14. Singh A.K., Kaur S. Analysis of emergency evacuation of building using PEPA. *Lecture Notes in Computer Science (Including Subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, 20158956, P. 456 – 459. https://doi.org/10.1007/978-3-319-14977-6_51
15. Tserng H.P., You J.-Y., Chang C.-Y., Hsiung K.-H. Comparison analysis of emergency evacuation between computer simulations and real exercises for large-space buildings // *Journal of the Chinese Institute of Engineers, Transactions of the Chinese Institute of Engineers, Series A*. 2012. № 35 (6). P. 779 – 792. <https://doi.org/10.1080/02533839.2012.701914>
16. Yang Z., Liao Q., Liu D., Lin G., Peng S., Xu Y. (2018). Emergency Ancillary Service Provided by Electric Vehicles for Building Integrated Energy System under the Malfunction of Energy Supply // In *International Conference on Innovative Smart Grid Technologies, ISGT Asia 2018* (P. 970 – 975). <https://doi.org/10.1109/ISGT-Asia.2018.8467922>
17. Ying Z., Zi-Min Z., Jian C. (2017). EvacAgent: A building emergency evacuation simulation model based on agent // In *ACM International Conference Proceeding Series (Part F128531)*. <https://doi.org/10.1145/3080845.3080872>

18. Zeng Y., Sreenan C.J., Sitanayah L., Xiong N., Park J.H., Zheng G. An emergency-adaptive routing scheme for wireless sensor networks for building fire hazard monitoring // *Sensors*. 2011. № 11 (3). P. 2899 – 2919. <https://doi.org/10.3390/s110302899>
19. Zeng Y., Xiong N., Park J.H., Zheng G. An emergency-adaptive routing scheme for wireless sensor networks for building fire hazard monitoring // *Sensors*. 2010. № 10 (6). P. 6128 – 6148. <https://doi.org/10.3390/s100606128>
20. Zhu Q., Hu M., Xu W., Lin H., Du Z., Zhang Y., Zhang F. 3D building information model for facilitating dynamic analysis of indoor fire emergency // *Wuhan Daxue Xuebao (Xinxi Kexue Ban)/Geomatics and Information Science of Wuhan University*. 2014. № 39 (7). P. 762 – 766+872. <https://doi.org/10.13203/j.whugis20130257>

References

1. Chen A.Y., Chu J.C. TDVRP and BIM integrated approach for in-building emergency rescue routing. *Journal of Computing in Civil Engineering*. 2016. 30 (5). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CP.1943-5487.0000522](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CP.1943-5487.0000522)
2. Cornaro C., Saporì D., Bucci F., Pierro M., Giammanco C. Thermal performance analysis of an emergency shelter using dynamic building simulation. *Energy and Buildings*. 2015. 88. P. 122 – 134. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.11.055>
3. Domingo J., Barbero R., Iranzo A., Cuadra D., Servet J., Marcos M.A. Analysis and optimization of ventilation systems for an underground transport interchange building under regular and emergency scenarios. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2011. 26 (1). P. 179 – 188. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2010.07.001>
4. Fadli F., Kutty N., Wang Z., Zlatanova S., Mahdjoubi L., Boguslawski P., Zverovich V. Extending indoor open street mapping environments to navigable 3D citygml building models: Emergency response assessment. In *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences – ISPRS Archives*. 2018. 42. P. 241 – 247. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-4-161-2018>
5. Jiang H., Su L., Zhang W. Analysis of emergency evacuation path and its demonstration application in highly-crowded building. In *Proceedings of the 9th International Conference on Computer Science and Education, ICCSE 2014*. P. 372 – 375. <https://doi.org/10.1109/ICCSE.2014.6926488>
6. Ma G., Tan S., Shang S. The evaluation of building fire emergency response capability based on the CMM. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2019. 16 (11). <https://doi.org/10.3390/ijerph16111962>
7. Marich M., Horan T.A., Schooley B. Implications of time-critical information services on emergency response its architecture: Scenario-building and market package analysis. In *Association for Information Systems: 12th Americas Conference On Information Systems, AMCIS*. 2006. 1. P. 229 – 238).
8. Nam G., Hong W. Analysis of the current state in order to maintain the function of the communication buildings for maintaining function in emergency. *International Journal of Applied Engineering Research*. 2014. 9 (23). P. 18191 – 18198.
9. Oh N., Okada A., Comfort L.K. Building Collaborative Emergency Management Systems in Northeast Asia: A Comparative Analysis of the Roles of International Agencies. *Journal of Comparative Policy Analysis: Research and Practice*. 2014. 16 (1). P. 94 – 111. <https://doi.org/10.1080/13876988.2013.863639>
10. Pan Y., Yuan S., Xie D., Gao Y. Current status and suggestions on post-earthquake emergency safety assessment of buildings in China. *Tumu Gongcheng Xuebao/China Civil Engineering Journal*. 2017. 50 (5). P. 19 – 26.
11. Poursha M., Khoshnoudian F., Moghadam A.S. Assessment of modal pushover analysis and conventional nonlinear static procedure with load distributions of federal emergency management agency for highrise buildings. *Structural Design of Tall and Special Buildings*. 2010. 19 (3). P. 291 – 308. <https://doi.org/10.1002/tal.487>
12. Semeniyutina A., Lazarev S., Melnik K. Assessment of reproductive capacity of representatives of ancestral complexes and especially their selection of seed in dry conditions. *World Ecology Journal*. 2019. 9 (1). P. 1 – 23. <https://doi.org/https://doi.org/10.25726/NM.2019.66.65.001>
13. Shi B., Yang W., Chen X. (2013). A game-theoretic analysis on dividing the limited budget between building emergency facilities and preparing resources. In *ICTIS 2013: Improving Multimodal Transportation Systems – Information, Safety, and Integration – Proceedings of the 2nd International Conference on Transportation Information and Safety*. P. 2323 – 2329.
14. Singh A.K., Kaur S. Analysis of emergency evacuation of building using PEPA. *Lecture Notes in Computer Science (Including Subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, 20158956, P. 456 – 459. https://doi.org/10.1007/978-3-319-14977-6_51

15. Tserng H.P., You J.-Y., Chang C.-Y., Hsiung K.-H. Comparison analysis of emergency evacuation between computer simulations and real exercises for large-space buildings. *Journal of the Chinese Institute of Engineers, Transactions of the Chinese Institute of Engineers, Series A*. 2012. 35 (6). P. 779 – 792. <https://doi.org/10.1080/02533839.2012.701914>
16. Yang Z., Liao Q., Liu D., Lin G., Peng S., Xu Y. (2018). Emergency Ancillary Service Provided by Electric Vehicles for Building Integrated Energy System under the Malfunction of Energy Supply. In *International Conference on Innovative Smart Grid Technologies, ISGT Asia 2018*. P. 970 – 975. <https://doi.org/10.1109/ISGT-Asia.2018.8467922>
17. Ying Z., Zi-Min Z., Jian C. (2017). EvacAgent: A building emergency evacuation simulation model based on agent. In *ACM International Conference Proceeding Series (Part F128531)*. <https://doi.org/10.1145/3080845.3080872>
18. Zeng Y., Sreenan C.J., Sitanayah L., Xiong N., Park J.H., Zheng G. An emergency-adaptive routing scheme for wireless sensor networks for building fire hazard monitoring. *Sensors*. 2011. 11 (3). P. 2899 – 2919. <https://doi.org/10.3390/s110302899>
19. Zeng Y., Xiong N., Park J.H., Zheng G. An emergency-adaptive routing scheme for wireless sensor networks for building fire hazard monitoring. *Sensors*. 2010. 10 (6). P. 6128 – 6148. <https://doi.org/10.3390/s100606128>
20. Zhu Q., Hu M., Xu W., Lin H., Du Z., Zhang Y., Zhang F. 3D building information model for facilitating dynamic analysis of indoor fire emergency. *Wuhan Daxue Xuebao (Xinxi Kexue Ban)/Geomatics and Information Science of Wuhan University*. 2014. 39 (7). P. 762 – 766+872. <https://doi.org/10.13203/j.whugis20130257>

Zhuykov S.V., Architect,*

South Ural State University, Russia

*Corresponding author E-mail: zhuikov@susu.ru

EXERGETIC ANALYSIS OF A BUILDING AS A KEY ELEMENT OF A HEAT SUPPLY SYSTEM

Abstract: the study of the complex influence of weather and climatic factors and their variability on the needs of energy and exergy when creating thermal comfort in a house with various engineering and architectural characteristics is carried out. It is confirmed that even for houses with relatively low thermal characteristics built in accordance with regulatory documents, the role of solar radiation in the formation of the heat balance, especially at the beginning and end of the heating season, is important. Studies showed that due to the combined influence of external meteorological factors, with the improvement of the thermal characteristics of houses, the correlation between the energy demand for creating a favorable microclimate and the outdoor air temperature significantly worsens. It is determined that in this case, the value of the approximation reliability decreases from 1 (with a linear dependence) to 0.55 and lower (with the maximum possible improved thermal characteristics of the house today). This position significantly corrects the operating modes and characteristics of the ST. In particular, this makes it necessary to improve the automatic control system of ST. And this, in turn, increases the investment component of the system. A method was developed for calculating exergy needs to create thermal comfort inside the house by taking into account, using the probability theory, the influence of the random nature of meteorological factors within the heating period, on the basis of which, in the conditions of the region, it is shown and calculated that when determining the seasonal exergy needs for the heat supply of the house, the use of a stationary approach leads to an underestimation of the results by 12...28% compared to the dynamic approach.

Keywords: building, exergy, analysis, construction, system, element.

Для цитирования: Жуйков С.В. Эксергетический анализ здания как ключевого элемента системы теплообеспечения // Строительные материалы и изделия. 2021. Том 4. № 3. С. 23 – 40. DOI: 10.34031/2618-7183-2021-4-3-23-40

For citation: Zhuykov S.V. Exergetic analysis of a building as a key element of a heat supply system. *Construction Materials and Products*. 2021. 4 (3). P. 23 – 40. DOI: 10.34031/2618-7183-2021-4-3-23-40

Поступила в редакцию 18 марта 2021 г.

Принята в доработанном виде 12 апреля 2021 г.

Одобрена для публикации 22 мая 2021 г.

Received: March 18, 2021.

Revised: April 12, 2021.

Accepted: May 22, 2021.