

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 697.11

DOI: 10.22227/1997-0935.2025.9.1373-1385

Математическая модель процесса потокораспределения в инженерных системах здания

Никита Юрьевич Саввин*Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова (БГТУ им. В.Г. Шухова);
г. Белгород, Россия*

АННОТАЦИЯ

Введение. В условиях современного строительства, где требования к энергоэффективности и устойчивости растут с каждым годом, необходимость в интегрированном подходе к моделированию субъектов инженерных систем (ИС) становится особенно актуальной.

Материалы и методы. Для разработки математической модели жизненного цикла (ЖЦ) ИС здания использовался способ составления замкнутого ориентированного графа. Проведена математическая и графическая обработка полученных результатов.

Результаты. Представлен подход к моделированию процессов деградации и восстановления ИС, учитывающий зависимость от времени и текущего состояния для снижения затрат на текущий и плановые ремонты. Установлена взаимосвязь каждой ИС как полноценного комплекса. Выявлены проблемы, оказывающие влияние на работоспособность ИС зданий. Для моделирования динамики изменения производительности системы предложен коэффициент, учитывающий мгновенное ухудшение и постепенное ухудшение $K_{уш}$. Приведено практическое прогнозирование результатов исследования на ЖЦ комплекса ИС объекта капитального строительства.

Выводы. Полученные результаты могут быть использованы с целью проектирования ИС здания и оценки их функциональности на протяжении всего ЖЦ здания. Разработана математическая модель потокораспределения в ИС здания. Предложен уникальный коэффициент, учитывающий вероятность возникновения различного типа негативных воздействий. В перспективе предложенная система позволит отказаться от расчета ежегодных ожидаемых убытков, вызванных опасностями, и вместо этого сосредоточиться на оценке совокупного воздействия нескольких опасностей в контексте жизненного цикла инженерных систем.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: математическая модель, инженерные системы, проектирование, оптимизация, устойчивое развитие, коэффициент ущерба, программный комплекс, жизненный цикл

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Саввин Н.Ю. Математическая модель процесса потокораспределения в инженерных системах здания // Вестник МГСУ. 2025. Т. 20. Вып. 9. С. 1373–1385. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.9.1373-1385

Автор, ответственный за переписку: Никита Юрьевич Саввин, n-savvin@mail.ru.

Mathematical model of the flow distribution process in building engineering systems

Nikita Yu. Savvin*Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov (BSTU named after V.G. Shukhov);
Belgorod, Russian Federation*

ABSTRACT

Introduction. In the context of modern construction, where the requirements for energy efficiency and sustainability are growing every year, the need for an integrated approach to modelling the subjects of engineering systems is becoming especially relevant.

Materials and methods. To develop a mathematical model of the life cycle of building engineering systems, a method for compiling a closed directed graph was used. Mathematical and graphical processing of the obtained results was carried out.

Results. An approach to modelling the processes of degradation and restoration of engineering systems is presented, taking into account the dependence on time and the current state to reduce the costs of routine and scheduled repairs. The relationship of each engineering system as a full-fledged complex is established. Problems affecting the operability of building engineering systems are identified. In order to model the dynamics of system performance change, a coefficient considering instantaneous deterioration and gradual deterioration C_{loss} is proposed. A practical forecast of the research results for the life cycle of a complex of engineering systems of a capital construction project is presented.

Conclusions. The obtained results can be used to design building engineering systems and assess their functionality throughout the entire life cycle of the building. A mathematical model of flow distribution in the engineering systems of the building was developed. A unique coefficient is proposed that takes into account the probability of occurrence of various types of negative impacts. In the future, the proposed system will allow to abandon the calculation of annual expected losses caused by hazards and instead focus on assessing the combined impact of several hazards in the context of the life cycle of engineering systems.

KEYWORDS: mathematical model, engineering systems, design, optimization, sustainable development, damage coefficient, software package, life cycle

FOR CITATION: Savvin N.Yu. Mathematical model of the flow distribution process in building engineering systems. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2025; 20(9):1373-1385. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.9.1373-1385 (rus.).

Corresponding author: Nikita Yu. Savvin, n-savvin@mail.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Одним из ключевых факторов социально-экономического прогресса страны является гарантированное предоставление социальных услуг, включая жилищно-коммунальные. К ним относятся водоснабжение (горячее и холодное), теплоснабжение, электроснабжение и другое. Требования к качеству предоставления жилищно-коммунальных услуг установлены на высоком уровне. Для их выполнения следует обеспечить не только необходимую прочность конструкций зданий и сооружений, но и бесперебойную работу инженерных систем (ИС). С целью надежной и безопасной эксплуатации объектов требуется осуществлять постоянный мониторинг технического состояния ИС [1, 2].

Согласно данным, представленным в статье [3], средний уровень физического износа коммунальной инфраструктуры в стране имеет существенные значения: котельных — 55 %, сетей водопровода — 65 %, канализации и тепловых сетей — 63 %, электрических сетей — 58 %, водопроводных насосных станций — 65 %, канализационных насосных станций — 57 %, очистных сооружений водопровода — 54 % и канализации — 56 %. В отдельных муниципальных образованиях степень износа коммунальной инфраструктуры достигает 70–80 % и ежегодно увеличивается на 2–3 %. Приблизительно 30 % основных фондов коммунального хозяйства полностью исчерпали свой нормативный срок службы. Это обстоятельство затрудняет планирование и реализацию необходимых мероприятий по технической эксплуатации объектов ИС и конструкций зданий и сооружений. Своевременное принятие мер позволит прогнозировать оставшийся ресурс каждого объекта и предотвратить достижение им критического состояния.

Современное строительство все больше характеризуется цифровизацией каждого этапа жизненного цикла (ЖЦ) объекта капитального строительства (ОКС). Распространение данных и услуг создает возможности для реализации самоорганизующихся, адаптивных и частично автономных гибких производственных систем, что особенно важно в условиях сокращения ЖЦ продукции и ее растущей вариативности [4, 5]. В результате повышаются эффективность и устойчивость производства, например, за счет минимизации времени переналадок и оптимизации использования ресурсов и энергии [6]. Учитывая эти тенденции, производственные системы становятся более сложными, поскольку состоят из множества взаимосвязанных компонентов. Для эффективного управления такой сложностью

все большее значение приобретает концепция цифрового двойника, представляющего собой виртуальную копию ОКС.

В статье [7] рассматривается классический метод оценки изношенности элементов здания. В работе В.А. Соколова [8] предложено разделение технического состояния элементов ОКС на пять категорий с соответствующей вероятностью. Такой подход дает возможность прогнозировать вероятность появления негативных событий в конструкциях. Предложена модель идентификации причин возникновения дефектов строительных конструкций различного типа [9]. Один из основных элементов модели — база нечетких знаний для определенных типов дефектов конструкций зданий и сооружений, при формировании которой применяются знания и опыт строителей-экспертов. Коллективом исследователей предлагается генетический алгоритм, осуществляющий связь между реальными причинами появления дефектов на этапе ЖЦ — эксплуатация и результатами принятия решений системой [10]. Предлагается унифицировать инженерные задачи, позволяющее многие виды работ выполнять параллельно, интегративно, тем самым сокращая время производства [11]. В данном контексте труд [12] представляет интерес тем, что каждая отдельная модель обеспечивает возможность повторного использования репозитория моделей одного проекта в других проектах. Такой подход удобен при рассмотрении эволюции одной инженерной системы, но вызовет коллизии при проектировании комплекса систем. Аналогичные исследования приведены в работах [13–16], они сфокусированы на отдельных составляющих инженерной системы. Для решения указанной проблемы необходимо применение технологии информационного моделирования (Building Information Modeling — BIM) на каждом этапе ЖЦ ОКС с мониторингом функциональности ИС. В прошедшие годы появилось множество определений этой концепции [17, 18]. В работе [19] используется определение, расширяющее базовые данные модели и взаимосвязи за счет возможностей имитации, активного сбора сведений и синхронизации. Особый интерес представляет цикл публикаций [20–23], посвященных разработке цифрового двойника для существующих ИС производственного назначения. Эти труды объединяет наличие постоянной взаимосвязи с помощью автоматизированного анализа структур информационной модели в различных состояниях и представление их в общей базе данных на основе графов.

Однако эти исследования, как правило, имеют частный индивидуальный подход, учитывают инфраструктуру конкретного региона или страны и неприменимы для других условий эксплуатации. Кроме того, в большинстве работ получены обобщенные результаты, которые не рассматривают полноценную комплексную систему и разработку методики по снижению воздействия негативных воздействий на функциональность ИС здания. Следовательно, актуальна разработка математической модели ЖЦ инженерных систем здания.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

При проектировании инженерной инфраструктуры первостепенное значение имеет обеспечение ее функциональной целесообразности. Постоянный рост числа потребителей и изменение их характеристик приводят к увеличению требований к системам жизнеобеспечения и, как следствие, к трансформации критериев их эксплуатации и управления. Управляемыми параметрами инженерных сетей являются характеристики и конфигурация отдельных подсистем (газоснабжение, водоснабжение, электроснабжение, канализация и другое). Регулирование параметров и структуры возможно посредством воздействия на активные элементы и распределительные сети. Об изменениях в параметрах и структуре потребителей можно судить по динамике показателей потребления энергоресурсов [24].

В настоящее время наблюдается повышенный интерес к анализу последствий на протяжении всего жизненного цикла (Life Cycle Consequence analysis — LCCA) [25–27]. В условиях многочисленных угроз данный анализ может стать важным

инструментом для принятия эффективных и взвешенных решений. Он позволяет минимизировать риски и повысить производительность критически важных объектов, что, в свою очередь, способствует снижению потенциального ущерба и усилению их устойчивости за счет повышения способности противостоять сбоям. Кроме того, LCCA дает возможность оценить воздействие ремонтных работ на участок сети. Для построения математической модели необходимо установить взаимосвязь с каждой инженерной системой.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Основная цель оперативного управления инженерными сетями заключается в адаптации структуры и параметров управляемых подсистем для компенсации изменений в структуре и параметрах потребителей. При этом компенсация должна осуществляться с минимальными потерями, которые могут быть выражены в энергетических, стоимостных или надежных показателях, при строгом соблюдении соответствующих ограничений. На рис. 1 представлена структура процесса оперативного управления потокораспределением в инженерных сетях.

Потокораспределение в ИС зданий — это критически важный аспект проектирования, который обеспечивает эффективное распределение ресурсов, таких как энергия, воздух, вода и другие. Эффективное управление потоками в таких системах требует использования математических моделей и алгоритмов, способных учитывать множество взаимодействующих переменных в реальном времени. Одним из наиболее эффективных подходов к этой задаче служит применение замкнутых ориентированных



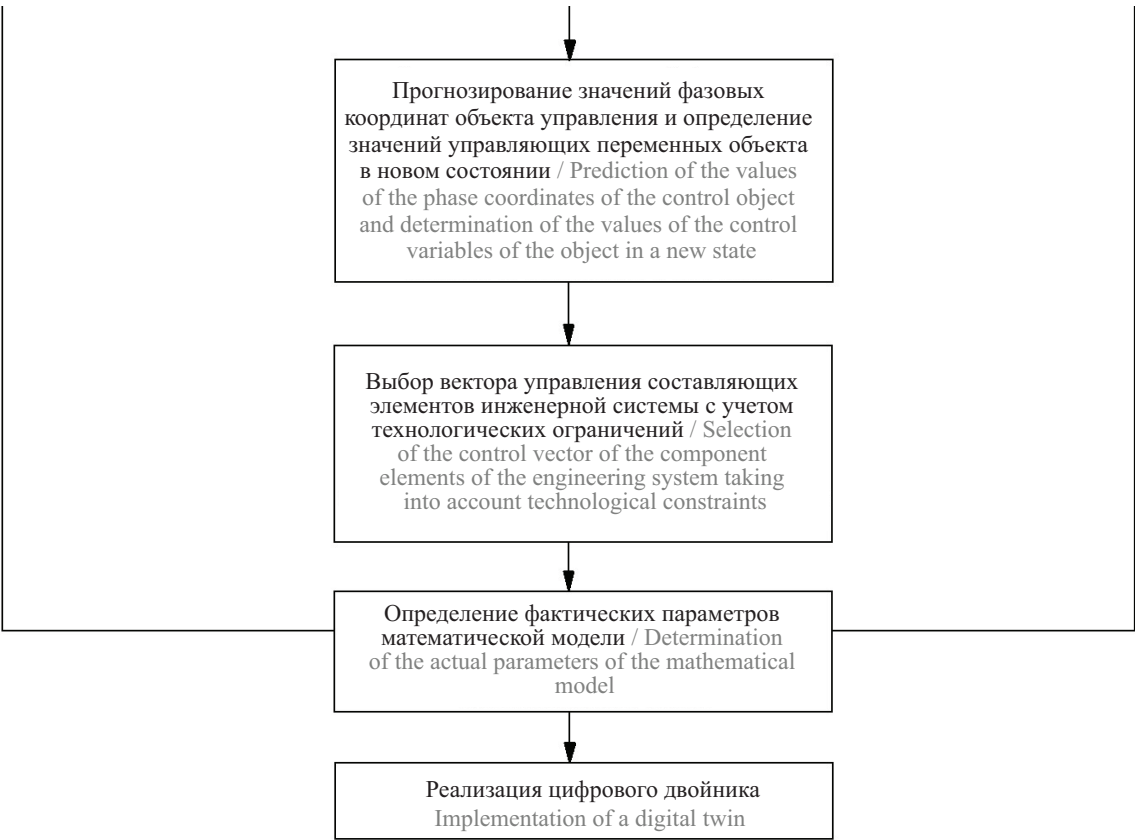


Рис. 1. Структура процесса оперативного управления потокораспределением в инженерных сетях
Fig. 1. Structure of the process of operational management of flow distribution in engineering networks

графов, которые визуализируют процессы распределения потоков. Структура управления инженерными системами построена на двух основных этапах.

Первый этап посвящен планированию распределения потоков энергоносителей. При этом учитывается доминирующее влияние некоторых факторов в определенный период времени. Оптимальным решением на этом этапе является достижение максимального объема подачи энергоносителей при одно-временной минимизации эксплуатационных затрат.

Второй этап направлен на стабилизацию всех (в идеальном случае) или подавляющего большинства фазовых параметров объекта (давление, температура, расход и т.д.). Эта стабилизация должна обеспечить минимальное отклонение этих параметров от расчетных или плановых значений.

Процесс потокораспределения в ИС можно представить в виде математической модели с учетом следующих начальных и граничных условий:

1. Инженерная система здания представляет собой сложную интегрированную систему, включающую множество взаимосвязанных параметров трех основных типов: потребители, источники и линии связи.
2. Каждая система i характеризуется двумя зависящими друг от друга динамически изменяемыми величинами: мощностью потребления q_i и мощностью потерь Q_i с учетом ряда допущений и направ-

ления движения. Потери мощности представляют собой разность мощностей всего технологического оборудования и затраченной мощности.

3. К источникам газо-, водо- и электроснабжения относятся, соответственно, компрессорные, насосные и трансформаторные станции.
4. Линии связи, обеспечивающие передачу энергоносителей между источниками и потребителями, включают трубопроводы, кабельные линии, вентиляционные шахты и другое. Важный аспект функционирования системы — зависимость потерь мощности от уровня потребления: с увеличением потребления потери также возрастают.
5. Потребители (нагрузка для электроэнергии) представляют собой участки, потребляющие различные типы энергоносителей.
6. При моделировании ИС здания необходимо учитывать характер взаимодействия между каждым элементом.
7. Общий объем энергоносителей, поступающих в систему, должен быть равен суммарному объему, потребляемому всеми потребителями.

Таким образом, можно записать в векторной форме мощность потребления q_i и мощность потерь Q_i для количества систем, равных $i = 1, \dots, n$:

$$\vec{q} = (q_1, q_2, \dots, q_n); \tag{1}$$

$$\vec{Q} = (Q_1, Q_2, \dots, Q_n). \quad (2)$$

Уравнения (1) и (2) формируют математическую модель, которая отражает взаимосвязь между параметрами и структурой системы потокораспределения. Ввиду высокой степени взаимосвязанности участков в современных инженерных сетях для обеспечения их согласованной работы требуется опора на данную модель. Подобная задача корреляции всех компонентов ИС не может быть решена без применения специализированного программного обеспечения.

Инженерную систему здания можно описать математически с помощью связанного ориентированного графа, представленного на рис. 2.

Цель составления орграфа — оценка приведенных энергозатрат для обеспечения безопасного и стабильного функционирования комплекса всех ИС здания.

Граф построен на основе теоретико-графового представления взаимосвязей между элементами ИС здания. Составление ориентированного графа базируется на общепринятых стандартах и правилах проектирования инженерных систем (рис. 3), определяющих структуру взаимосвязей внутри ИС зданий.

На любом участке представленного графа имеются местные сопротивления. Поэтому с учетом их выражение расчета зависимости $Q_i(q_i)$ будет иметь вид:

$$Q_i(q_i) = \sum_{j=1}^{m_i} Q_{ij}^n(q_i) - \sum_{j=1}^{n_i} Q_{ij}^a(q_i) \quad (3)$$

при

$$i = 1, \dots, n, \quad (4)$$

где Q_{ij}^n и Q_{ij}^a — связанные переменные j -го участка i -й ветви; m_i — количество линий связи; n_i — количество подсистем.

Следовательно, суммарная переменная, определяемая всеми параметрами i -й ветви, выражается формулой:

$$Q_i^n(q_i) = \sum_{j=1}^{m_i} Q_{ij}^n(q_i). \quad (5)$$

Для удобства выполним аппроксимацию выражения (5) с учетом местных сопротивлений и, поскольку все процессы динамически изменяемые, с учетом коэффициента нелинейности получим:

$$Q_{ij}^n = \text{sgn} q_{ij} r_{ij} |q_{ij}|^{\kappa_{ij}}, \quad (6)$$

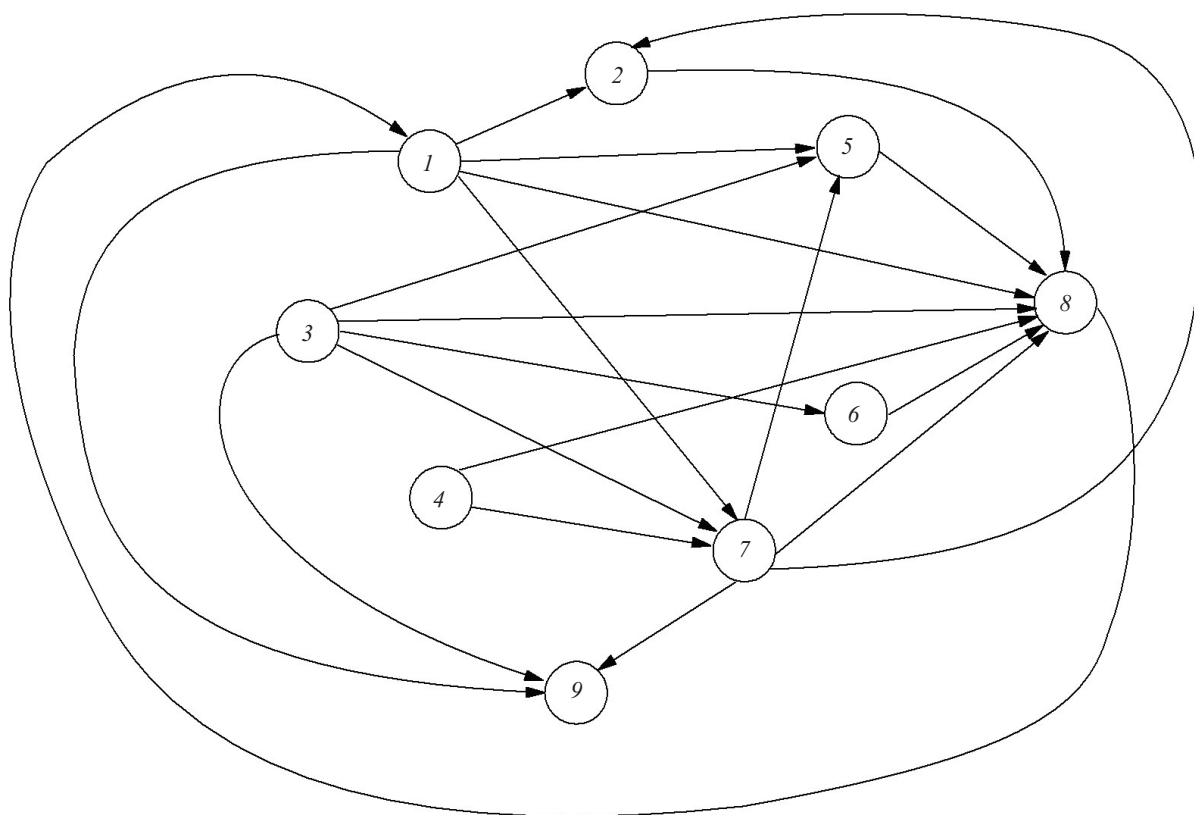


Рис. 2. Связный ориентированный граф (оргграф) инженерных систем здания: 1 — электроэнергия; 2 — вентиляция; 3 — водоснабжение; 4 — газоснабжение; 5 — кондиционирование; 6 — водоотведение; 7 — теплоснабжение; 8 — системы безопасности; 9 — отопление

Fig. 2. Connected directed graph of building engineering systems: 1 — electric power; 2 — ventilation; 3 — water supply; 4 — gas supply; 5 — air conditioning; 6 — water disposal; 7 — heat supply; 8 — security systems; 9 — heating

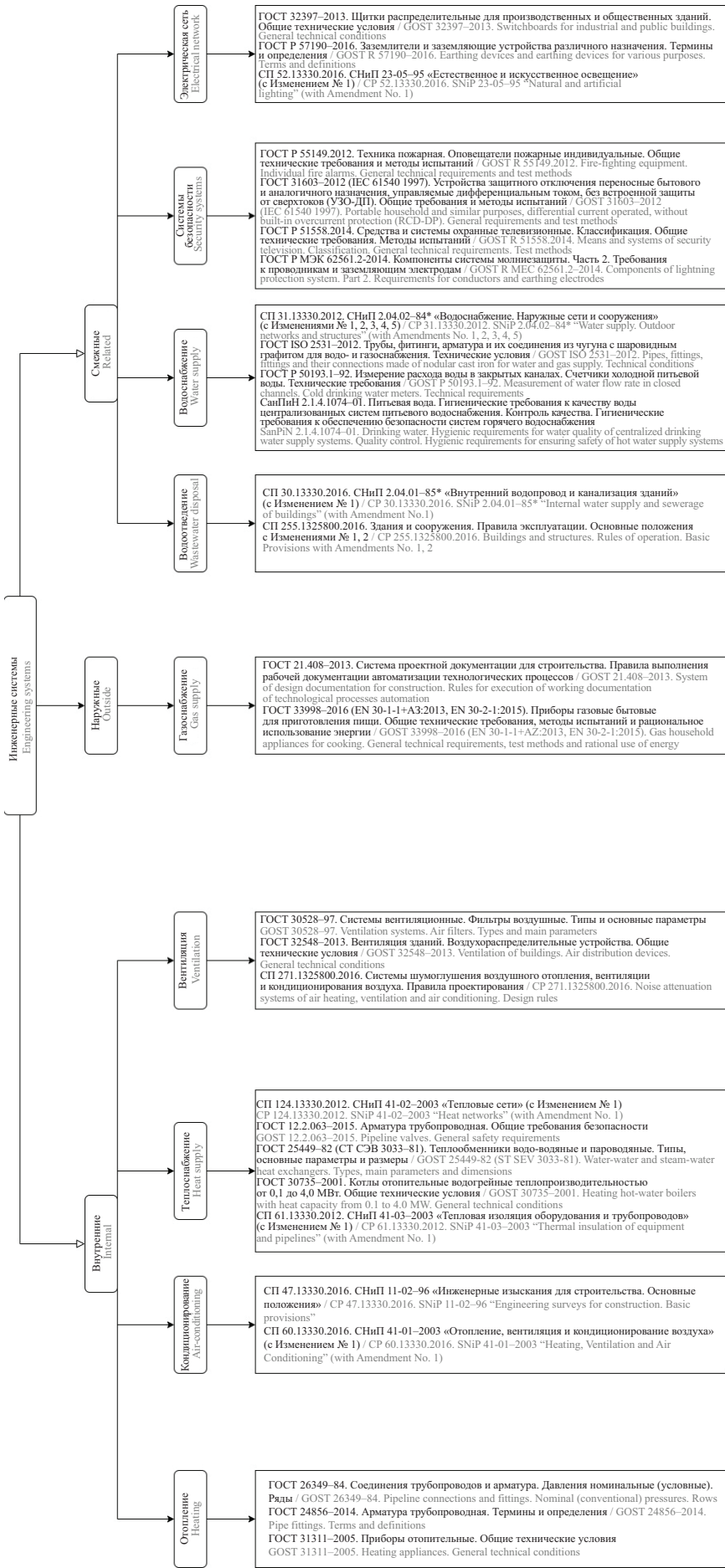


Рис. 3. Классификация инженерных систем здания
Fig. 3. Classification of building engineering systems

где $r_{ij} > 0$ и $\kappa_{ij} \geq 1$ — коэффициент местного сопротивления и коэффициент нелинейности j -го участка i -й ветви. Данные коэффициенты определяются с помощью компьютерного моделирования с корректировкой на экспериментальные результаты.

Таким образом, предложенные уравнения отражают взаимосвязь между параметрами, переменными и геометрической структурой сети, а также лежат в основе анализа и синтеза сетей.

В реальных условиях эксплуатации ИС здания имеются известные параметры объемов потребления и технологические параметры участков (диаметр трубопроводов, протяженность, сечение проводов, материал коммуникаций и т.д.), с помощью которых синтез сети сводится к определению векторов последовательной и параллельной переменной. В свою очередь, определение этих переменных напрямую зависит от решения математической модели с учетом внешних возмущений в системе нелинейных уравнений:

$$f_{\omega} = \sum_{j=1}^{m_{\omega}} Q_{\omega j}^n(q_{\omega}) - \sum_{i=1}^{n_r} h_{\omega j}^a(q_{\omega}) + \sum_{i=v}^e b_{\omega i} \left(\sum_{j=1}^{m_i} Q_{ij}^n(q_i) - \sum_{j=1}^{n_i} Q_{ij}^a(q_i) \right), \quad (7)$$

где ω — какое-либо по счету внешнее возмущение с учетом $\omega = v, \dots, e$; $b_{\omega i}$ — коэффициент какого-либо внешнего возмущения в i -й ветви.

Температурные изменения учтены путем введения поправочных коэффициентов, характеризующих зависимость потерь мощности от температуры. Изменения температуры влияют на теплопроводность материалов, электрическое сопротивление проводников и гидравлическое сопротивление трубопроводных магистралей. Эти эффекты учитываются введением коэффициента $b_{\omega i}$, рассчитываемые с использованием компьютерных моделей и уточняемые на основе экспериментальных данных.

Особый интерес представляет оценка достоверности графа с точки зрения электроцепей. Ориентированные графы соответствуют стандартам электротехнических расчетов, например, эквивалентные схемы замещения для расчета токов короткого замыкания, падения напряжения и перегрузок. Параметры электрической нагрузки (мощности и сопротивления) рассчитываются согласно паспортным характеристикам оборудования и измерениям реальной работы систем. В настоящем исследовании применяется принцип укрупненного представления электрической системы, где каждая ветвь включает суммарные величины мощности и сопротивления, характерные для всей группы подключенных устройств.

Параметры, такие как мощность и сопротивление, представлены как средние величины по каждому участку инженерной системы. Процесс усреднения осуществляется путем деления общего

потока мощности на количество параллельных ветвей или последовательно соединенных элементов, входящих в одну линию связи. Формулы (5), (6) используют среднее арифметическое значение для аппроксимации и приведения графика зависимостей к виду, удобному для практических расчетов.

Зачастую при решении нелинейной системы уравнений получается несколько корней. В условиях неравномерного распределения энергоносителей, линейности уравнений связи и того, что расход теплоносителей всегда положителен в нормальном режиме работы, решение всегда будет иметь единственный корень.

В случаях, когда $f_{\omega} = 0$, инженерная система находится в одной из двух стадий ЖЦ — проектирование или утилизация.

В области моделирования факторов, влияющих на работоспособность ИС зданий, актуальны следующие общие проблемы:

1. Отсутствие единой терминологии. Описания взаимодействий опасных событий в основном носят качественный характер, что затрудняет формализацию и стандартизацию подходов к их анализу.

2. Недостаток количественных методов оценки последствий. Существующие методы не всегда полностью учитывают специфику взаимодействия различных типов опасностей и их воздействие на компоненты инженерных систем.

3. Высокая вычислительная сложность. Использование рекурсивных аналитических формул для учета усугубления последствий при взаимодействии опасных событий может потребовать значительных вычислительных ресурсов, особенно в случаях частых событий в ограниченные промежутки времени.

4. Неполное моделирование процессов восстановления. Текущие исследования ремонта объектов сосредоточены на функциональном восстановлении, не учитывая взаимосвязь между мгновенным и постепенным разрушением и ремонтом.

5. Отсутствие универсального подхода к сравнению последствий. В настоящее время для сравнения последствий различных опасных событий часто используется экспертная оценка, которая не всегда гарантирует объективность и воспроизводимость результатов.

Таким образом, требуется разработка инновационных методов и подходов, направленных на преодоление существующих ограничений и обеспечение более точной и надежной оценки рисков, связанных с взаимодействием опасных событий.

Для решения этой задачи предлагается интегрировать в методологии расчета коэффициент ущерба $K_{\text{ущ}}$. Коэффициент ущерба в ЖЦ ИС здания отражает взаимозависимость между воздействием различных факторов на эксплуатацию и состояние этих систем на протяжении всего срока их службы. Другими словами, коэффициент ущерба количе-

ственно определяет степень повреждений или снижения функциональности инженерной системы.

Постоянная эволюция среды, функционирование которой обеспечивается инженерными сетями, влечет за собой изменение параметров и случайного характера процессов потребления энергетических ресурсов в этих сетях. В связи с этим для получения прогнозов с минимальной ошибкой требуется применение адаптивных алгоритмов, позволяющих формировать модель, адекватно отражающую исследуемый процесс на каждом этапе вычисления прогноза. Следовательно, возникает необходимость разработки методики оценки состояния ИС в конкретный момент времени, т.е. осуществления мониторинга их работоспособности в течение всего срока службы. Для этого следует определить коэффициент ущерба в числовом выражении. Он представляет собой сумму произведений вероятностей возникновения негативных событий, затрагивающих целостность функционирования системы на любом участке инженерной сети. Формула для его нахождения выглядит следующим образом:

$$K_{\text{ущ}}(t) = \sum_{i=1}^N A_i(t) \cdot B_i(t) \cdot C_i(t) \cdot D_i(t), \tag{8}$$

где $A_i(t)$ — вероятность возникновения аварийной ситуации вследствие негативного воздействия окружающей среды; $B_i(t)$ — вероятность установки бракованного оборудования из выпущенной партии; $C_i(t)$ — вероятность осуществления некачественного ремонта, повлекшего нарушение целостности оборудования или сокращение его производительности; $D_i(t)$ — вероятность возникновения аварийной ситуации в результате непредвиденных обстоятельств (человеческий фактор).

Необходимые вероятности определяются из официальных отчетов соответствующих министерств ЖКХ, энергетики или отчетов страховых компаний.

Рассмотрим практическое применение на примере реального объекта — Центральной областной библиотеки г. Белгорода для иллюстрации аналитической методики оценки ЖЦ инженерной системы, подверженной воздействию нескольких опасных

факторов. При расчете суммарного ожидаемого ущерба для такой системы необходимо учитывать взаимодействие всех опасных факторов в течение всего срока службы. Для этого предлагается арифметическое суммирование ожидаемых последствий от воздействия каждого фактора с учетом коэффициента ущерба. Расчет эффективного срока службы системы производится по формуле:

$$E = \sum_{i=1}^{\infty} P(i, T) \sum_{j=1}^i P(K_{\text{ущ}}), \tag{9}$$

где P — производительность, т. у. т.; i — случайный фактор, воздействующий на какой-либо участок инженерной сети; j — участок инженерной системы.

В свою очередь, производительность инженерной системы определяется как:

$$P = \frac{S}{Z}, \tag{10}$$

где S — количество энергии, необходимое для поддержания функционирования комплекса инженерных систем здания, Дж; Z — общие затраты в процессе эксплуатации инженерных систем, руб.

На рис. 4 представлена схема, демонстрирующая влияние многочисленных опасных факторов на характеристики ИС. Схема показывает снижение и восстановление характеристик с учетом как коэффициента ущерба, так и без его учета.

Предложенный графический метод анализа воздействия факторов на ИС здания опирается на стохастический марковский процесс с дискретными состояниями и временем. Такой подход позволяет оценить вероятность нахождения системы в каждом из возможных состояний работоспособности после каждого негативного события. Полученные вероятностные оценки могут быть интегрированы с моделями системных последствий, что даст возможность определить последствия воздействия на систему в любой момент времени в течение всего срока ее эксплуатации.

Финальным этапом является разработка алгоритма (рис. 5), обеспечивающего бесперебойную цикличность процесса потокораспределения в ин-

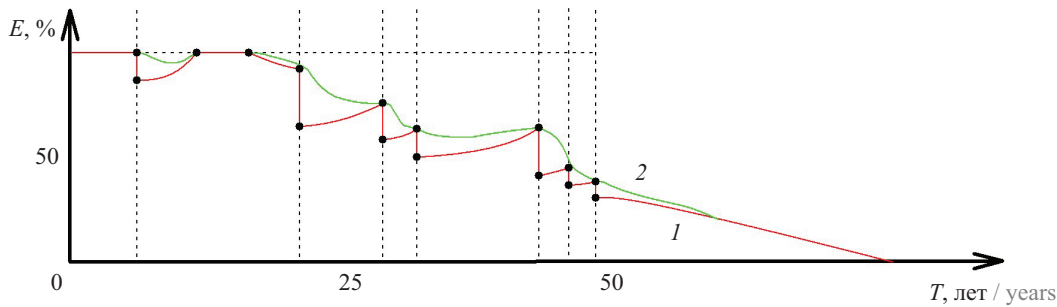


Рис. 4. Жизненный цикл инженерных систем здания: 1 — без учета коэффициента ущерба; 2 — с учетом коэффициента ущерба

Fig. 4. Life cycle of building engineering systems: 1 — without taking into account the damage coefficient; 2 — taking into account the damage coefficient

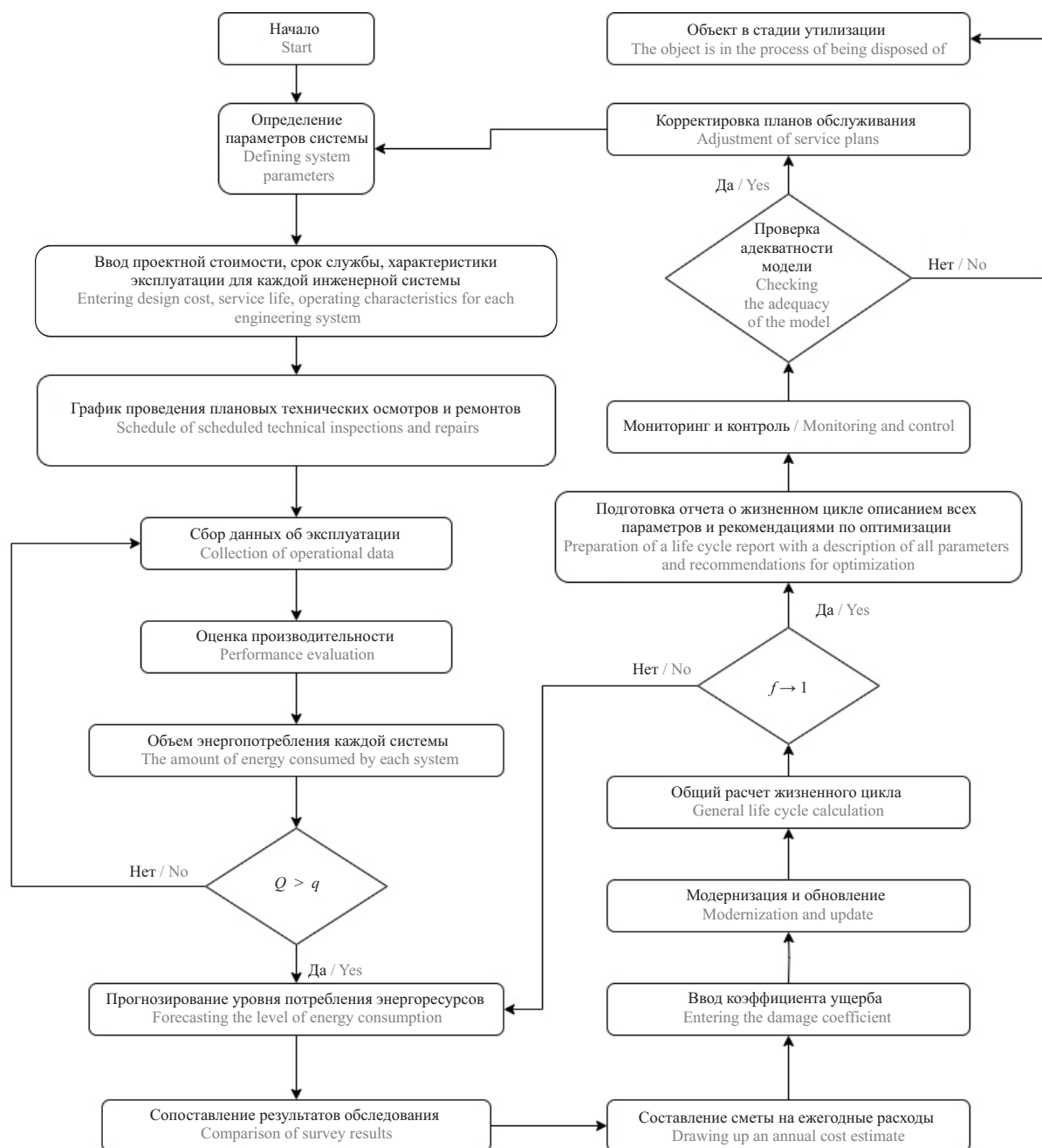


Рис. 5. Алгоритм жизненного цикла работы инженерных систем

Fig. 5. Algorithm of the life cycle of engineering systems

женерных системах здания, т.е. решение оргграфа, изображенного на рис. 2.

Приведенный график (рис. 5) представляет собой обобщенную модель, демонстрирующую динамику функционирования ИС во времени. При оценке затрат на восстановление после чрезвычайных ситуаций целесообразно применять точную шкалу, основанную на степени воздействия на работоспособность и восстановительные возможности системы. В подобных случаях система может быть классифицирована по уровням функциональности, от полной работоспособности до полного выхода из строя.

Применение замкнутых ориентированных графов в моделировании потокораспределения в ИС зданий значительно упрощает процесс проектирования и повышения эффективности работы систем. Разработанный алгоритм может использоваться для решения ключевых задач и оптимизации процессов, что позволит достигать высоких уровней надежности и эффективности в управлении инженерными системами. Исследование в данной области предоставляет возможности для дальнейших разработок и совершенствования технологий, направленных на устойчивое использование ресурсов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

В результате проведенного исследования обоснована актуальность разработки математической модели процесса потокораспределения в ИС на протяжении всего ЖЦ. С помощью предлагаемого подхода снижается уровень неопределенности при планировании эксплуатационных воздействий на здания и сооружения, а также создаются предпосылки автоматизации сложной логической обработки экспериментальных и экспертных данных.

Предложенные зависимости обеспечивают эффективное моделирование процессов деградации и восстановления состояния ИС с учетом временного фактора и текущего состояния. При этом вычислительные затраты существенно снижаются по сравнению с существующими методами. Ключевым достоинством рассмотренной математической модели является учет сложных взаимосвязей между различными типами опасностей. Она позволяет оценить последствия постепенного улучшения состояния инженерных систем в результате ремонтных работ, а также учитывать неопределенности, свя-

занные с взаимодействием процессов износа и восстановления в различных состояниях оборудования и линий связи. Это принципиальное преимущество по сравнению с имеющимися методологиями, которые не учитывают подобные неопределенности.

В долгосрочной перспективе предложенная система позволит отказаться от расчета ежегодных ожидаемых убытков, вызванных опасностями, и сосредоточиться на оценке комплексного воздействия множества опасностей в контексте ЖЦ ИС.

Благодаря своей гибкости модель может быть адаптирована для оптимизации стратегий управления рисками до возникновения событий для различных критически важных объектов, которые сталкиваются с повторяющимися разными опасностями в течение длительного периода принятия решений. Таким образом, она обеспечивает системный подход к оценке рисков, который может быть использован для обоснования управленческих решений на протяжении всего ЖЦ ИС. Данный подход может найти практическое применение в компаниях, на балансе которых имеются здания и сооружения.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Michalski W. Critiques of life cycle assessment. Worcester Polytechnic Institute, 2015.
2. Taheri-Rad A., Khojastehpour M., Rohani A., Khoramdel S., Nikkhah A. Energy flow modeling and predicting the yield of Iranian paddy cultivars using artificial neural networks // *Energy*. 2017. Vol. 135. Pp. 405–412. DOI: 10.1016/j.energy.2017.06.089
3. Солдатенко Т.Н. Модель остаточного ресурса инженерных систем с высоким уровнем износа // *Инженерно-строительный журнал*. 2012. № 6 (32). С. 64–72. DOI: 10.5862/MCE.32.10. EDN PDZKGZ.
4. Galasso C., McCloskey J., Pelling M., Hope M., Bean C.J., Cremen G. et al. Editorial. Risk-based, Pro-poor Urban Design and Planning for Tomorrow's Cities // *International Journal of Disaster Risk Reduction*. 2021. Vol. 58. P. 102158. DOI: 10.1016/j.ijdrr.2021.102158
5. Cremen G., Galasso C., McCloskey J. Modelling and quantifying tomorrow's risks from natural hazards // *Science of The Total Environment*. 2022. Vol. 817. P. 152552. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.152552
6. Gill J.C., Malamud B.D. Reviewing and visualizing the interactions of natural hazards // *Reviews of Geophysics*. 2014. Vol. 52. Issue 4. Pp. 680–722. DOI: 10.1002/2013RG000445
7. Уткин В.С., Уткин Л.В. Экспертный метод определения физического износа зданий // *Промышленное и гражданское строительство*. 2000. № 1. С. 48. EDN ZEXRXH.
8. Соколов В.А. Построение решения для оценки технического состояния конструктивных систем зданий и сооружений с использованием вероятност-

ных методов распознавания // *Инженерно-строительный журнал*. 2010. № 6 (16). С. 48–57. EDN MWNNMH.

9. Солдатенко Т.Н. Модель идентификации и прогноза дефектов строительной конструкции на основе результатов ее обследования // *Инженерно-строительный журнал*. 2011. № 7 (25). С. 52–61. EDN OIYPSP.

10. Shtovba S., Rotshtein A., Pankevich O. Fuzzy Rule Based System for Diagnosis of Stone Construction Cracks of Buildings // *International Series in Intelligent Technologies*. 2002. Pp. 401–411. DOI: 10.1007/978-94-010-0324-7_28

11. Гарина Е.П., Коробова Я.В., Цыбуцкина И.Е., Писарева В.А. Методические основы формирования организационно-экономических систем на примере отдельного проекта // *Экономика и предпринимательство*. 2025. № 2 (175). С. 1287–1290. DOI: 10.34925/EIP.2025.175.2.238. EDN IFXLIC.

12. Сухомлин В.А., Гапанович Д.А. Эталонная модель модельно-ориентированной системной и программной инженерии (model-based systems and software engineering — MBSSE) и ее связь с процессными стандартами системной инженерии // *International Journal of Open Information Technologies*. 2024. Т. 12. № 1. С. 144–155. EDN PURCDJ.

13. Сборщиков С.Б., Лазарева Н.В. Реинжиниринг организационной структуры и бизнес-процессов инвестиционно-строительной деятельности. Их место в общей системе корпоративного регулирования // *Вестник МГСУ*. 2024. Т. 19. № 2. С. 294–306.

DOI: 10.22227/1997-0935.2024.2.294-306. EDN IELZVM.

14. Ковалев С.П. Применение цифровых двойников в автоматизированном управлении высокотехнологичным промышленным производством // Мехатроника, автоматизация, управление. 2024. Т. 25. № 4. С. 211–220. DOI: 10.17587/mau.25.211-220. EDN AUJZZK.

15. Лосев Ю.Г., Лосев К.Ю. Целостность и иерархичность структур данных в жизненном цикле объектов малоэтажного жилищного строительства // Строительство и архитектура. 2024. Т. 12. № 1 (42). С. 4. DOI: 10.29039/2308-0191-2023-12-1-4-4. EDN GNBOEP.

16. Дорошин И.Н., Халиулина О.В., Якупова Ю.М. Управление проектами промышленных и гражданских объектов на основе технологий информационного моделирования // Перспективы науки. 2024. № 1 (172). С. 122–126. EDN JYFQZP.

17. Sjarov M., Lechler T., Fuchs J., Brossog M., Selmaier A., Faltus F. et al. The Digital Twin Concept in Industry — A Review and Systematization // 2020 25th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA). 2020. Pp. 1789–1796. DOI: 10.1109/etfa46521.2020.9212089

18. Negri E., Fumagalli L., Macchi M. A review of the roles of digital twin in CPS-based production systems // Procedia Manufacturing. 2017. Vol. 11. Pp. 939–948. DOI: 10.1016/j.promfg.2017.07.198

19. Talkhestani B.A., Jung T., Lindemann B., Sahlab N., Jazdi N., Schloegl W. et al. An architecture of an intelligent digital twin in a cyber-physical production system // At — Automatisierungstechnik. 2019. Vol. 67. Issue 9. Pp. 762–782. DOI: 10.1515/auto-2019-0039

20. Braun D., Riedhammer M., Jazdi N., Schloegl W., Weyrich M. A methodology for the detection of functional relations of mechatronic components and assemblies in brownfield systems // Procedia CIRP. 2022. Vol. 107. Pp. 119–124. DOI: 10.1016/j.procir.2022.04.020

21. Talkhestani B.A., Braun D., Schloegl W., Weyrich M. Qualitative and quantitative evaluation of reconfiguring an automation system using Digital Twin // Procedia CIRP. 2020. Vol. 93. Pp. 268–273. DOI: 10.1016/j.procir.2020.03.014

22. Jazdi N., Talkhestani B.A., Maschler B., Weyrich M. Realization of AI-enhanced industrial automation systems using intelligent Digital Twins // Procedia CIRP. 2021. Vol. 97. Pp. 396–400. DOI: 10.1016/j.procir.2020.05.257

23. Hermann F., Chen B., Ghasemi G., Stegmaier V., Ackermann T., Reimann P. et al. A digital twin approach for the prediction of the geometry of single tracks produced by laser metal deposition // Procedia CIRP. 2022. Vol. 107. Pp. 83–88. DOI: 10.1016/j.procir.2022.04.014

24. Серая Д.С., Козыренко Н.Е. Новаторство в современной архитектуре // Новые идеи нового века : мат. Междунар. науч. конф. ФАД ТОГУ. 2013. Т. 2. С. 152–158. EDN QCUXPD.

25. Fonseca D.J., Navaresse D.O., Moynihan G.P. Simulation metamodeling through artificial neural networks // Engineering Applications of Artificial Intelligence. 2003. Vol. 16. Issue 3. Pp. 177–183. DOI: 10.1016/S0952-1976(03)00043-5

26. Akiyama M., Frangopol D.M., Ishibashi H. Toward life-cycle reliability-, risk- and resilience-based design and assessment of bridges and bridge networks under independent and interacting hazards: emphasis on earthquake, tsunami and corrosion // Structure and Infrastructure Engineering. 2020. Vol. 16. Issue 1. Pp. 26–50. DOI: 10.1080/15732479.2019.1604770

27. Саввин Н.Ю., Гарбузов Д.Д. Исследование эффективности охлаждения пластинчатого теплообменника конденсатора промышленной холодильной машины при различных скоростях вращения вентиляторов // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2023. № 10. С. 42–56. DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-10-42-56. EDN FLWLIB.

Поступила в редакцию 5 марта 2025 г.

Принята в доработанном виде 5 июня 2025 г.

Одобрена для публикации 25 июня 2025 г.

ОБ АВТОРЕ: **Никита Юрьевич Саввин** — кандидат технических наук, доцент кафедры теплогазоснабжения и вентиляции; **Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова (БГТУ им. В.Г. Шухова)**; 308012, г. Белгород, ул. Костюкова, д. 46; РИНЦ ID: 1108836, Scopus: 57219992792, ResearcherID: AAR-3129-2021, ORCID: 0000-0001-6379-6825; n-savvin@mail.

REFERENCES

1. Michalski W. *Critiques of life cycle assessment*. Worcester Polytechnic Institute, 2015. (rus.).
2. Taheri-Rad A., Khojastehpour M., Rohani A., Khoramdel S., Nikkhah A. Energy flow modeling and predicting the yield of Iranian paddy cultivars using artificial neural networks. *Energy*. 2017; 135:405-412. DOI: 10.1016/j.energy.2017.06.089
3. Soldatenko T.N. Model of the residual life of engineering systems with a high level of wear. *Magazine of Civil Engineering*. 2012; 6(32):64-72. DOI: 10.5862/MCE.32.10. EDN PDZKGZ. (rus.).
4. Galasso C., McCloskey J., Pelling M., Hope M., Bean C.J., Cremen G. et al. Editorial. Risk-based, Pro-poor Urban Design and Planning for Tomorrow's Cities. *International Journal of Disaster Risk Reduction*. 2021; 58:102158. DOI: 10.1016/j.ijdr.2021.102158
5. Cremen G., Galasso C., McCloskey J. Modelling and quantifying tomorrow's risks from natural hazards. *Science of The Total Environment*. 2022; 817:152552. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.152552
6. Gill J.C., Malamud B.D. Reviewing and visualizing the interactions of natural hazards. *Reviews of Geophysics*. 2014; 52(4):680-722. DOI: 10.1002/2013RG000445
7. Utkin V.S., Utkin L.V. Expert method for determining the physical deterioration of buildings. *Industrial and Civil Engineering*. 2000; 1:48. EDN ZEXRXH. (rus.).
8. Sokolov V.A. Construction of a solution for assessing the technical condition of structural systems of buildings and structures using probabilistic recognition methods. *Magazine of Civil Engineering*. 2010; 6(16):48-57. EDN MWNNMH. (rus.).
9. Soldatenko T.N. Model for identification and prediction of defects in a building structure based on the results of its inspection. *Magazine of Civil Engineering*. 2011; 7(25):52-61. EDN OIYPSP. (rus.).
10. Shtovba S., Rotshtein A., Pankevich O. Fuzzy Rule Based System for Diagnosis of Stone Construction Cracks of Buildings. *International Series in Intelligent Technologies*. 2002; 401-411. DOI: 10.1007/978-94-010-0324-7_28
11. Garina E.P., Korobova Y.V., Tsybutsinina I.E., Pisareva V.A. Methodological foundations for the formation of organizational and economic systems using the example of a separate project. *Economy and Entrepreneurship*. 2025; 2(175):1287-1290. DOI: 10.34925/EIP.2025.175.2.238. EDN IFXLIC. (rus.).
12. Sukhomlin V.A., Gapanovich D.A. Model-based systems and software engineering (MBSSE) reference model and its relationship to systems engineering process standards. *International Journal of Open Information Technologies*. 2024; 12(1):144-155. EDN PURCDJ. (rus.).
13. Sborshikov S.B., Lazareva N.V. Reengineering of the organizational structure and business processes of investment and construction activities. Their place in the general system of corporate regulation. *Vestnik MGSU [Monthly Journal on Construction and Architecture]*. 2024; 19(2):294-306. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.2.294-306. EDN IELZVM. (rus.).
14. Kovalyov S.P. Leveraging digital twin in automated high-tech production management. *Mechatronics, Automation, Control*. 2024; 25(4):211-220. DOI: 10.17587/mau.25.211-220. EDN AUJZZK. (rus.).
15. Losev Yu., Losev K. Integrity and hierarchy of data structures in the life cycle of low-rise housing construction. *Construction and Architecture*. 2024; 12(1):42:4. DOI: 10.29039/2308-0191-2023-12-1-4-4. EDN GNBOEP. (rus.).
16. Doroshin I.N., Khaliulina O.V., Yakupova Yu.M. Project management of industrial and civil facilities based on information modeling technologies. *Science Prospects*. 2024; 1(172):122-126. EDN JYFQZP. (rus.).
17. Sjarov M., Lechler T., Fuchs J., Brossog M., Selmaier A., Faltus F. et al. The Digital Twin Concept in Industry — A Review and Systematization. *2020 25th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA)*. 2020; 1789-1796. DOI: 10.1109/etfa46521.2020.9212089
18. Negri E., Fumagalli L., Macchi M. A review of the roles of digital twin in CPS-based production systems. *Procedia Manufacturing*. 2017; 11:939-948. DOI: 10.1016/j.promfg.2017.07.198
19. Talkhestani B.A., Jung T., Lindemann B., Sahlab N., Jazdi N., Schloegl W. et al. An architecture of an intelligent digital twin in a cyber-physical production system. *At — Automatisierungstechnik*. 2019; 67(9):762-782. DOI: 10.1515/auto-2019-0039
20. Braun D., Riedhammer M., Jazdi N., Schloegl W., Weyrich M. A methodology for the detection of functional relations of mechatronic components and assemblies in brownfield systems. *Procedia CIRP*. 2022; 107:119-124. DOI: 10.1016/j.procir.2022.04.020
21. Talkhestani B.A., Braun D., Schloegl W., Weyrich M. Qualitative and quantitative evaluation of reconfiguring an automation system using Digital Twin. *Procedia CIRP*. 2020; 93:268-273. DOI: 10.1016/j.procir.2020.03.014
22. Jazdi N., Talkhestani B.A., Maschler B., Weyrich M. Realization of AI-enhanced industrial automation systems using intelligent Digital Twins. *Procedia CIRP*. 2021; 97:396-400. DOI: 10.1016/j.procir.2020.05.257
23. Hermann F., Chen B., Ghasemi G., Stegmair V., Ackermann T., Reimann P. et al. A digital twin approach for the prediction of the geometry of single tracks produced by laser metal deposition. *Procedia CIRP*. 2022; 107:83-88. DOI: 10.1016/j.procir.2022.04.014

24. Seraya D., Kozyrenko N. *Innovation in modern architecture. New ideas of the new century : materials of the international scientific conference of the FAD PNU*. 2013; 2:152-158. EDN QCUXPD. (rus.).

25. Fonseca D.J., Navarrese D.O., Moynihan G.P. Simulation metamodeling through artificial neural networks. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. 2003; 16(3):177-183. DOI: 10.1016/S0952-1976(03)00043-5

26. Akiyama M., Frangopol D.M., Ishibashi H. Toward life-cycle reliability-, risk- and resilience-based

design and assessment of bridges and bridge networks under independent and interacting hazards: emphasis on earthquake, tsunami and corrosion. *Structure and Infrastructure Engineering*. 2020; 16(1):26-50. DOI: 10.1080/15732479.2019.1604770

27. Savvin N., Garbuzov D. Investigation of the cooling efficiency of the plate heat exchanger of the condenser of an industrial refrigeration machine at different fan speeds. *Bulletin of Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov*. 2023; 10:42-56. DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-10-42-56. EDN FLWLIB. (rus.).

Received March 5, 2025.

Adopted in revised form on June 5, 2025.

Approved for publication on June 25, 2025.

B I O N O T E S: **Nikita Yu. Savvin** — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Heat and Gas Supply and Ventilation; **Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov (BSTU named after V.G. Shukhov)**; 46 Kostyukova st., Belgorod, 308012, Russian Federation; ID RSCI: 1108836, Scopus: 57219992792, ResearcherID: AAR-3129-2021, ORCID: 0000-0001-6379-6825; n-savvin@mail.