

УДК: 699.86:69.059.14
DOI: 10.48612/NewsKSUAE/76.8
EDN: GKZSTQ



Прогнозирование теплотехнического состояния ограждающих конструкций зданий котельных с учетом возрастной деградации

В.Ю. Юдин¹, В.Э. Зинуров², А.В. Дмитриев³, Ю.Р. Кареева⁴, А.М. Мугинов⁵

¹Казанский (Приволжский) федеральный университет

^{2,3,5}Казанский государственный энергетический университет

⁴Казанский государственный архитектурно-строительный университет
г. Казань, Российская Федерация

Аннотация. *Постановка задачи.* Теплозащитные свойства ограждающих конструкций зданий котельных ухудшаются вследствие старения, увлажнения и развития дефектов, что при продолжительном отопительном периоде увеличивает теплопотери и эксплуатационные расходы. Для удаленных населенных пунктов необходим расчетный подход к ранжированию зданий по техническому состоянию и экономическим последствиям. *Цель исследования* заключалась в разработке методики прогнозирования состояния ограждающих конструкций и оценки дополнительных теплопотерь с учетом возраста и климатической нагрузки. Для достижения цели решались задачи анализа данных обследований, построения вероятностной модели возрастной деградации, оценки дополнительных теплопотерь и экономического обоснования сроков обследований и энергоэффективных мероприятий. Обработано 296 дефектных записей по 34 зданиям и сформировано 204 объектно-конструктивные группы. Методика основана на неоднородной марковской модели переходов между состояниями 0, С, В и А, дополненной теплотехническим и экономическим расчетами.

Результаты. Дефектные состояния выявлены в 63,7 % групп, развитые и критические – в 31,4 %. Максимальная вероятность начального состояния достигается в 19 лет и составляет 0,38, развитого – в 39 лет и 0,49. К 60 годам вероятность развитого или критического состояния наружных стен достигает 0,88, а дополнительные теплопотери возрастают с 5,26 до 53,53 Гкал/год. Увеличение градусо-суток отопительного периода с 6900 до 10 422,5 °С·сут/год повышает финансовые потери в 1,51 раза.

Выводы. Установлены три этапа возрастной деградации ограждающих конструкций: накопление начальных дефектов до 19 лет, интенсивное развитие повреждений в 19–39 лет и ускоренный переход в критическое состояние после 39–40 лет. Возраст 19 лет определен как целесообразный период для углубленного обследования; дисконтированный срок окупаемости мероприятий составляет 5,77 года. Совместный учет возраста и климатической нагрузки позволяет обосновать сроки обследований и восстановительных мероприятий.

Ключевые слова: здания котельных, ограждающие конструкции, техническое состояние, возрастная деградация, марковская модель, трансмиссионные теплопотери, градусо-сутки отопительного периода, энергетическая эффективность

Для цитирования: Юдин В.Ю., Зинуров В.Э., Дмитриев А.В., Кареева Ю.Р., Мугинов А.М. Прогнозирование теплотехнического состояния ограждающих конструкций зданий котельных с учетом возрастной деградации // Известия КГАСУ, 2026, № 2 (76), с. 122–140, DOI: 10.48612/NewsKSUAE/76.8, EDN: GKZSTQ

Forecasting the thermal performance of building envelope structures in boiler-house buildings considering age-related degradation

V.Yu. Yudin¹, V.E. Zinurov², A.V. Dmitriev³, Yu.R. Kareeva⁴, A.M. Muginov⁵

¹Kazan (Volga Region) Federal University,

^{2,3,5}Kazan State Power Engineering University,

⁴Kazan State University of Architecture and Engineering
Kazan, Russian Federation

Abstract. *Problem statement.* The thermal performance of boiler-house building envelopes deteriorates due to aging, moisture exposure, and defect development, which, under prolonged heating periods, increases heat losses and operating costs. For remote settlements, a calculation-based approach is required to rank buildings according to their technical condition and associated economic consequences. *The purpose of the study* was to develop a methodology for predicting the condition of building envelopes and estimating additional heat losses with consideration of building age and climatic load. To achieve this aim, the study addressed the analysis of inspection data, development of a probabilistic model of age-related degradation, estimation of additional heat losses, and economic justification of the timing of inspections and energy-efficiency measures. A total of 296 defect records for 34 buildings were processed, resulting in 204 object-structural groups. The methodology is based on a non-homogeneous Markov model describing transitions between states 0, C, B, and A, supplemented by thermal and economic calculations.

Results. Defective states were identified in 63.7 % of the groups, while developed and critical states accounted for 31.4 %. The maximum probability of the initial state is reached at 19 years and equals 0.38, whereas the maximum probability of the developed state occurs at 39 years and equals 0.49. By 60 years, the probability of developed or critical states for external walls reaches 0.88, while additional heat losses increase from 5.26 to 53.53 Gcal/year. An increase in heating degree-days from 6900 to 10422.5 °C·day/year increases financial losses by a factor of 1.51.

Conclusions. Three stages of age-related degradation of building envelopes were identified: accumulation of initial defects up to 19 years, intensive damage development between 19 and 39 years, and accelerated transition to the critical state after 39–40 years. The age of 19 years was identified as an appropriate period for an in-depth inspection; the discounted payback period of the measures is 5.77 years. Joint consideration of building age and climatic load provides a basis for determining the timing of inspections and restoration measures.

Key words: boiler-house buildings, building envelope structures, technical condition, age-related degradation, Markov model, transmission heat losses, heating degree-days, energy efficiency.

For citation: Yudin V.Yu., Zinurov V.E., Dmitriev A.V., Kareeva Yu.R., Muginov A.M. Forecasting the thermal performance of building envelope structures in boiler-house buildings considering age-related degradation // News of KSUAE, 2026, № 2 (76), с. 122-140, DOI: 10.48612/NewsKSUAE/76.8, EDN: GKZSTQ

1. Введение

Повышение энергетической эффективности объектов теплоснабжения остается одной из значимых задач промышленной и коммунальной теплоэнергетики, особенно в районах с продолжительным отопительным периодом, высокой климатической нагрузкой и труднодоступным расположением населенных пунктов [1]. Для зданий котельных данная задача связана не только с техническим состоянием тепломеханического оборудования, тепловых сетей и систем вентиляции, но и с фактическими теплозащитными свойствами ограждающих конструкций. Наружные стены, кровля, оконные заполнения, фундаментные и цокольные зоны формируют тепловой контур здания, определяют величину трансмиссионных потерь, влияют на воздушный режим

помещений, температурные условия размещения оборудования и эксплуатационную надежность объекта теплоснабжения [2, 3].

Теплотехническое состояние здания обычно описывается проектными или нормативными коэффициентами теплопередачи. Однако фактические характеристики ограждающих конструкций в процессе эксплуатации изменяются вследствие старения материалов, увлажнения, нарушения герметичности, образования трещин, деградации теплоизоляционного слоя и формирования локальных теплотехнических неоднородностей [4]. Современные исследования показывают, что фактические теплозащитные свойства ограждающих конструкций могут отличаться от проектных значений [5–7]. Результаты инструментальных обследований эксплуатируемых зданий подтверждают снижение фактического сопротивления теплопередаче и наличие локальных дефектов теплозащитной оболочки [8]. В условиях холодного климата существенное влияние оказывают нарушения тепловой однородности наружных стен, дефекты теплоизоляции, промерзание цокольных участков и повышенные теплопотери через стыки конструкций [9]. Это подтверждает необходимость расчетного учета возможного ухудшения ограждений при оценке дополнительных теплопотерь здания котельной. Также показано, что деградация строительных компонентов изменяет энергетические характеристики зданий, причем для холодных регионов этот эффект усиливается продолжительным отопительным периодом [10, 11].

Особую значимость данная проблема приобретает для удаленных населенных пунктов, где котельные часто являются локальными источниками теплоснабжения, а проведение регулярных инструментальных обследований и ремонтно-восстановительных работ осложняется транспортной доступностью, сезонностью работ и ограниченностью эксплуатационных ресурсов. Для выявления дефектов ограждающих конструкций применяются визуальные обследования, тепловизионная диагностика, инструментальные измерения и численное моделирование теплопереноса [12–14]. Результативность натурного обследования зависит от температурного перепада между внутренним и наружным воздухом, поэтому измерения, выполненные при недостаточно выраженных расчетных условиях, могут не выявить все потенциально неблагоприятные участки ограждения [15]. Численное моделирование также применяется при исследовании воздушных потоков и работы вентиляционных устройств, что важно для оценки воздушного режима и эксплуатационных условий в зданиях с инженерным оборудованием [16]. Вместе с тем применение инструментальных методов требует выезда специалистов, соответствующих погодных условий и предварительного выбора объектов обследования. При значительном числе котельных возникает необходимость предварительного расчетного ранжирования объектов по вероятности скрытой дефектности, ожидаемым дополнительным теплопотерям и эксплуатационно-экономическим последствиям.

Повышение теплозащитных свойств существующих зданий рассматривается в современных исследованиях в связи с разработкой энергоэффективных ремонтно-восстановительных мероприятий [17, 18]. При формировании программ модернизации основное внимание уделяется выбору состава технических решений и многокритериальной оптимизации их параметров [19]. Отдельное направление связано с оптимизацией планирования капитального ремонта с учетом фактического состояния конструктивных элементов и ожидаемых результатов восстановительных мероприятий [20]. Экономическая обоснованность технических решений проводится с учетом капитальных затрат, срока окупаемости и финансовой реализуемости проекта [21]. При выборе стратегии модернизации также учитываются изменение климатических условий и локальные особенности городской среды [22]. Расчетный анализ энергоэффективных мероприятий показывает, что повышение теплозащитных свойств ограждающих конструкций является одним из основных способов снижения теплопотребления и эксплуатационных затрат существующих зданий [23]. Большинство таких исследований относится к жилым, общественным или административным зданиям. Здания котельных как элементы систем теплоснабжения изучены в меньшей степени, хотя ухудшение состояния их ограждающих конструкций сопровождается дополнительными теплопотерями, ростом эксплуатационных затрат и изменением условий работы тепломеханического оборудования.

Для описания деградации строительных конструкций и инженерных систем применяются вероятностные модели, алгоритмы классификации и методы прогнозирования технического состояния. Автоматическая обработка тепловизионных и видимых изображений позволяет классифицировать дефекты оболочки здания, включая тепловые мосты, зоны воздухопроницаемости и иные тепловые аномалии [24]. Марковские цепи позволяют представить деградацию конструктивных элементов как последовательный переход между дискретными стадиями технического состояния и рассчитать вероятность достижения развитого или критического состояния в зависимости от возраста объекта [25]. Дискретные марковские модели применяются для оценки долгосрочной эффективности текущего обслуживания и учета влияния ремонтных воздействий на состояние объекта [26]. Динамические байесовские сети используются для оценки надежности систем отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха (HVAC) с учетом постепенной деградации и климатических воздействий, что расширяет возможности планирования технического обслуживания инженерных систем [27]. Вероятностные методы применяются также при тепловлажностной оценке ограждающих конструкций для учета изменчивости климатических воздействий, теплофизических характеристик материалов и неопределенности исходных данных [28]. Вместе с тем применительно к зданиям котельных недостаточно разработаны методы, связывающие изменение состояния ограждающих конструкций с возрастом, климатическую нагрузку, дополнительные теплопотери и экономические последствия эксплуатации.

Новизна настоящей работы заключается в разработке расчетной методики предварительного ранжирования зданий котельных, основанной на вероятностном описании скрытого состояния ограждающих конструкций, учете изменения их состояния с возрастом, градусо-суток отопительного периода и экономической оценке дополнительных теплопотерь.

Целью работы является разработка методики прогноза состояния ограждающих конструкций зданий котельных и оценки дополнительных теплопотерь с учетом возраста здания и климатической нагрузки.

Для достижения поставленной цели решаются следующие задачи:

1. Провести анализ данных энергетического аудита и технических обследований зданий котельных, расположенных в населенных пунктах Магаданской области, и сформировать расчетную выборку объектно-конструктивных групп по стадиям дефектного состояния.
2. Разработать вероятностную модель возрастной деградации ограждающих конструкций и определить закономерности изменения вероятностей их технического состояния в процессе эксплуатации.
3. Оценить дополнительные теплопотери зданий котельных при изменении технического состояния ограждающих конструкций с учетом возраста здания и градусо-суток отопительного периода.
4. Выполнить экономическую оценку последствий возрастной деградации и определить рациональный период проведения углубленного обследования и планирования энергоэффективных мероприятий.

2. Материалы и методы

В основу расчетной методики положены данные энергетического аудита и технических обследований 34 зданий котельных, расположенных в 21 населенном пункте Магаданской области. После предварительной обработки сформирован массив из 296 дефектных записей, содержащих сведения об объекте и сроке его эксплуатации, конструктивном элементе, виде и стадии повреждения, а также его площади и протяженности.

В выборку включались дефекты ограждающих и сопряженных строительных конструкций, способные ухудшать теплозащитные свойства или герметичность здания: трещины различной степени развития, включая сквозные, увлажнение, разрушение штукатурного, отделочного и защитного слоев, повреждение кирпичной кладки и бетона, раскрытие и разрушение швов, стыков и зон примыкания, а также локальные сквозные нарушения сплошности конструкций. Рассматривались наружные стены, внутренние

стены и перегородки, кровля, оконные заполнения, фундамент и отмостка. Каждая дефектная запись была отнесена к начальной *C*, развитой *B* или критической *A* стадии дефектного состояния.

Для статистического анализа дефектные записи агрегировались на уровне объектно-конструктивных групп, каждая из которых соответствовала отдельному конструктивному элементу конкретного здания котельной. При наличии нескольких повреждений одного элемента записи объединялись, а состояние группы определялось по наиболее тяжелой зарегистрированной стадии. В результате сформировано 204 объектно-конструктивных группы. Их распределение совместно с количеством обследованных зданий по возрастным интервалам приведено в таблице 1.

Число зарегистрированных дефектов n_{oj} , относящихся к j -му конструктивному элементу o -го здания котельной, шт., определялось выражением:

$$n_{oj} = \sum_{m=1}^M I_{m oj} , \quad (1)$$

где M – общее число дефектных записей в исходной базе, шт.;

m – индекс дефектной записи;

o – индекс здания котельной;

j – индекс конструктивного элемента;

$I_{m oj}$ – индикатор принадлежности m -й дефектной записи к группе G_{oj} , принимающий значение 1 при наличии принадлежности и 0 в противном случае;

G_{oj} – объектно-конструктивная группа, соответствующая j -му конструктивному элементу o -го здания котельной.

Таблица 1

Распределение обследованных зданий котельных и объектно-конструктивных групп по возрастным интервалам

Возрастная группа, лет	Количество зданий, ед.	Количество объектно-конструктивных групп, ед.
0–9	1	6
10–19	7	42
20–29	4	24
30–39	6	36
40–49	12	72
50–60	3	18
60+	1	6
Всего	34	204

Для дефектов, характеризуемых площадью повреждения F_m , суммарная площадь F_{oj}^{def} , м² в пределах объектно-конструктивной группы определялась по формуле:

$$F_{oj}^{\text{def}} = \sum_{m=1}^M F_m I_{m oj} . \quad (2)$$

Суммарная протяженность линейных повреждений L_{oj}^{def} определялась по выражению:

$$L_{oj}^{\text{def}} = \sum_{m=1}^M L_m I_{m oj} . \quad (3)$$

где L_m – протяженность дефекта, указанная в m -й записи, м.

Для совместного учета дефектов, заданных площадью повреждения и протяженностью, использовалась эффективная площадь зоны теплотехнического влияния дефектов F_{oj}^{eff} :

$$F_{oj}^{\text{eff}} = F_{oj}^{\text{def}} + \delta L_{oj}^{\text{def}} , \quad (4)$$

где δ – расчетная ширина зоны влияния линейного дефекта, м.

Стадии дефектного состояния были преобразованы в расчетную шкалу C , B и A . Дополнительно введено состояние 0, отражающее условно исправное состояние или отсутствие зарегистрированного значимого повреждения (табл. 2).

Состояние объектно-конструктивной группы с зарегистрированными дефектами S_{oj} определялось по наиболее тяжелой стадии:

$$s_{oj} = \max_m(d_m), \quad (5)$$

где d_m – числовой уровень деградации m -го дефекта. При отсутствии дефектных записей принималось состояние 0. Это допущение не означает гарантированного отсутствия скрытых дефектов, а отражает только отсутствие зарегистрированного значимого повреждения в исходной ведомости.

Таблица 2

Расчетная интерпретация состояний ограждающих конструкций

Состояние	Интерпретация	Расчетный уровень деградации
0	Условно исправное состояние или отсутствие зарегистрированного значимого повреждения	0
C	Начальная стадия дефектного состояния	1
B	Развитая стадия дефектного состояния	2
A	Критическая стадия дефектного состояния	3

Возраст здания t_o определялся по паспортным данным объекта:

$$t_o = y_{ob} - y_b, \quad (6)$$

где y_{ob} – год обследования, лет; y_b – год ввода в эксплуатацию, лет.

Для описания скрытого состояния ограждающих конструкций использовалась неоднородная дискретная марковская модель с последовательной деградацией $0 \rightarrow C \rightarrow B \rightarrow A$.

Состояние A в сценарии без ремонта принималось поглощающим, поскольку критическое повреждение не может самопроизвольно перейти в менее тяжелое состояние без ремонтно-восстановительного воздействия. Для j -го конструктивного элемента в возрасте t вектор вероятностей скрытых состояний записывался следующим образом:

$$\pi_j(t) = [P_{0,j}(t), P_{C,j}(t), P_{B,j}(t), P_{A,j}(t)], \quad (7)$$

где $P_{0,j}$, $P_{C,j}$, $P_{B,j}$, $P_{A,j}$ – вероятность условно исправного, начального, развитого и критического состояния соответственно. Для нового здания принималось начальное условие $\pi_j(0) = [1, 0, 0, 0]$.

Эволюция вектора вероятностей описывалась выражением:

$$\pi_j(t+1) = \pi_j(t)P_j(t), \quad (8)$$

где $P_j(t)$ – матрица переходов, изменяющаяся с возрастом объекта, которая рассчитывалась по выражению:

$$P_j(t) = \begin{bmatrix} 1 - p_{0C,j}(t) & p_{0C,j}(t) & 0 & 0 \\ 0 & 1 - p_{CB,j}(t) & p_{CB,j}(t) & 0 \\ 0 & 0 & 1 - p_{BA,j}(t) & p_{BA,j}(t) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (9)$$

Переход из условно исправного состояния в начальную стадию дефектности задавался экспоненциальной моделью:

$$p_{0C}(t) = 1 - \exp(-\lambda_{0C} t), \quad (10)$$

где λ_{0C} – интенсивность возникновения начального дефекта, 1/год.

Переходы $C \rightarrow B$ и $B \rightarrow A$ задавались сглаженными логистическими функциями возраста $p_{CB}(t)$ и $p_{BA}(t)$:

$$p_{CB}(t) = p_{CB}^{\min} + \frac{p_{CB}^{\text{amp}}}{1 + \exp[-(t - t_{CB})/s_{CB}]}, \quad (11)$$

где $p_{CB}^{\min}$ – минимальная вероятность перехода $C \rightarrow B$;

p_{CB}^{amp} – амплитуда вероятности перехода;

t_{CB} – возраст середины роста перехода;

s_{CB} – параметр крутизны возрастной зависимости.

Аналогичным образом рассчитывалась базовая вероятность $p_{BA}(t)$.

$$p_{BA}(t) = p_{BA}^{\min} + \frac{p_{BA}^{amp}}{1 + \exp[-(t - t_{BA}) / s_{BA}]}. \quad (12)$$

Для учета различий между конструктивными элементами базовые вероятности переходов масштабировались поправочным коэффициентом k_j . Тогда, вероятность перехода $p_{mn,j}(t)$ для j -го конструктивного элемента рассчитывается по выражению:

$$p_{mn,j}(t) = \min[k_j p_{mn}(t), 1]. \quad (13)$$

Численные значения параметров переходов были приняты по результатам калибровки на исходной выборке и инженерной регуляризации возрастных кривых на интервале 0–60 лет. При этом поправочные коэффициенты k_j принимались равными 1,45 для наружных стен, 0,86 для внутренних стен и перегородок, 0,89 для оконных заполнений, 1,11 для отмостки, 0,9 для кровли и 0,84 для фундамента.

Для здания в целом вероятности скрытых состояний $p_s^{obj}(t)$ определялись как средневзвешенные по расчетным площадям конструктивных элементов:

$$p_s^{obj}(t) = \sum_{j=1}^J \omega_j p_{s,j}(t), \quad (14)$$

где ω_j – весовой коэффициент j -го конструктивного элемента, рассчитываемый по формуле (15);

J – число учитываемых конструктивных элементов, ед.;

$p_{s,j}(t)$ – вероятность состояния s для j -го конструктивного элемента.

$$\omega_j = \frac{F_j}{\sum_{i=1}^J F_i}, \quad (15)$$

где F_j – расчетная площадь j -го конструктивного элемента, м²;

F_i – расчетная площадь конструктивных элементов, м².

Суммарная вероятность развитого и критического состояния здания $p_{B+A}^{obj}(t)$ определялась выражением:

$$p_{B+A}^{obj}(t) = p_B^{obj}(t) + p_A^{obj}(t), \quad (16)$$

где $p_B^{obj}(t)$ – вероятность развитого состояния; $p_A^{obj}(t)$ – вероятность критического состояния.

Климатическая нагрузка учитывалась через градусо-сутки отопительного периода (ГСОП) HDD_i для i -го населенного пункта, (°C·сут)/год:

$$HDD_i = (t_{in} - t_{ot,i}) z_{ot,i}, \quad (17)$$

где t_{in} – расчетная температура внутреннего воздуха, принятая равная 18 °C;

$t_{ot,i}$ – средняя температура наружного воздуха за отопительный период для i -го населенного пункта, °C;

$z_{ot,i}$ – продолжительность отопительного периода для i -го населенного пункта, сут/год.

Средняя температура наружного воздуха $t_{ot,i}$ и продолжительность отопительного периода $z_{ot,i}$ принимались по СП 131.13330.2025 «СНиП 23-01-99* Строительная климатология» для периода со среднесуточной температурой наружного воздуха не более 8 °C. Таким образом, градусо-сутки отопительного периода, характеризующие температурные условия эксплуатации зданий и соответствующие населенным пунктам Магаданской области представлены в таблице 3.

Ожидаемое приращение коэффициента теплопередачи j -го конструктивного элемента $\Delta K_j(t)$, Вт/(м²·К) определялось как математическое ожидание по вероятностям состояний:

$$\Delta K_j(t) = k_{0,j} [\gamma_C p_{C,j}(t) + \gamma_B p_{B,j}(t) + \gamma_A p_{A,j}(t)], \quad (18)$$

где $k_{0,j}$ – базовый коэффициент теплопередачи j -го конструктивного элемента, Вт/(м²·К); γ_C , γ_B и γ_A – безразмерные коэффициенты относительного ухудшения теплозащитных свойств для стадий C , B и A соответственно.

Таблица 3

Принятые расчетные значения градусо-суток отопительного периода для населенных пунктов Магаданской области

Населенный пункт (группа населенных пунктов)	ГСОП, °С·сут/год
Сусуман	10 422,5
Омсукчан, Дукат	9 813,4
Сеймчан, Снежный	9 757,3
Оротукан, Клепка, Талон	9 757,3
Ягодное, Дукча, Усть-Омчуг, Радужный	9 620,5
Палатка, Хасын, Талая	7 695,0
Эвенск	7 396,8
Ола, Сокол, Уптар, Армань	6 900,0
Расчетное значение при отсутствии точной территориальной привязки	8 500,0

Дополнительные годовые теплототери, обусловленные ухудшением теплозащитных свойств j -го конструктивного элемента здания, расположенного в i -ом населенном пункте, $Q_{ij}^{\text{add}}(t)$, кВт·ч/год рассчитывались по выражению:

$$Q_{ij}^{\text{add}}(t) = \frac{\Delta K_j(t) F_j n_{t,ij} \text{HDD}_i 24}{1000}, \quad (19)$$

где $n_{t,ij}$ – коэффициент, учитывающий отличие температур воздуха по сторонам j -го конструктивного элемента от температур, принятых при определении ГСОП для i -го населенного пункта.

Коэффициент $n_{t,ij}$ определялся в соответствии с СП 50.13330.2024 «СНиП 23-02-2003 Тепловая защита зданий»:

$$n_{t,ij} = \frac{t_{\text{in},j}^* - t_{\text{out},ij}^*}{t_{\text{in}} - t_{\text{out},i}}, \quad (20)$$

где $t_{\text{in},j}^*$ и $t_{\text{out},ij}^*$ – средние расчетные температуры сред по обеим сторонам рассматриваемой конструкции, °С;

t_{in} и $t_{\text{out},i}$ – температуры внутреннего и наружного воздуха соответственно, принятые при определении ГСОП, °С.

Для наружных стен, кровли и оконных заполнений, непосредственно разделяющих внутренний и наружный воздух, принималось $n_{t,ij} = 1$. Для внутренних стен и перегородок, сопряженных с зонами пониженной температуры, а также для конструкций, контактирующих с грунтом, коэффициент $n_{t,ij}$ определялся по формуле (20) с учетом расчетной температуры среды с противоположной стороны конструкции.

Суммарные дополнительные теплототери здания котельной $Q_{\text{obj}}^{\text{add}}(t)$ определялись суммированием по всем учитываемым конструктивным элементам. Для перехода от вероятностной оценки их технического состояния к абсолютным значениям дополнительных теплототерь требовалось задать единый набор геометрических и теплотехнических параметров здания. С этой целью был сформирован базовый расчетный сценарий, соответствующий условному зданию котельной с фиксированными площадями и базовыми коэффициентами теплопередачи конструктивных элементов. Сценарий предусматривал эксплуатацию здания без ремонтно-восстановительных мероприятий, при которой изменение теплозащитных свойств определялось возрастной динамикой вероятностей состояний 0, C , B и A . Территориальные различия учитывались посредством градусо-суток отопительного периода HDD_i и коэффициента $n_{t,ij}$. Принятые для базового сценария параметры конструктивных элементов приведены в таблице 4.

Коэффициенты относительного ухудшения теплозащитных свойств принимались равными $\gamma_0=0$ для условно исправного состояния, $\gamma_C = 0,05$ для начальной стадии, $\gamma_B = 0,18$

для развитой стадии и $\gamma_A = 0,40$ для критической стадии. Указанные значения задавались как сценарные параметры, преобразующие качественные стадии дефектного состояния в относительное увеличение коэффициента теплопередачи. Значение $\gamma_C = 0,05$ соответствует локальным повреждениям с ограниченным теплотехническим влиянием. Значение $\gamma_B = 0,18$ характеризует увеличение масштаба дефектов и нарушение сплошности конструкции. Значение $\gamma_A = 0,40$ учитывает существенное ухудшение теплозащиты при наличии сквозных трещин, разрушении материала и раскрытии стыков. Нелинейное возрастание коэффициентов отражает усиление теплотехнических последствий по мере развития и распространения повреждений. Принятые значения относятся к базовому расчетному сценарию и подлежат уточнению при наличии результатов инструментального определения коэффициентов теплопередачи конкретных конструкций. Выбор диапазона коэффициентов основывался на установленной авторами А. Taki и А. Zakharanka закономерности ухудшения энергетических характеристик зданий при деградации строительных компонентов и на результатах авторов R. O’Hegarty, G. Amedeo и O. Kinnane, подтверждающих существенное увеличение теплопередачи через ограждающие конструкции при повреждении теплоизоляционного слоя.

Таблица 4

Параметры теплотехнического расчета для базового сценария

Конструктивный элемент	$k_{0,j}$, Вт/(м ² ·К)	F , м ²
Наружные стены	1,10	420
Внутренние стены и перегородки, сопряженные с зонами пониженной температуры	0,35	180
Кровля	0,85	250
Оконные заполнения	2,80	45
Отмостка / цокольная зона	0,50	90
Фундамент	0,70	120

В ходе экономического анализа осуществлялся перевод дополнительных теплопотерь в годовые финансовые потери и оценки приоритетности обследования. Тариф на тепловую энергию в прогнозном году $T_{\text{heat}}(t)$, руб./Гкал задавался с учетом годового темпа роста:

$$T_{\text{heat}}(t) = T_{\text{heat},0} (1 + g)^t, \quad (21)$$

где $T_{\text{heat},0}$ – исходный тариф на тепловую энергию, руб./Гкал;

g – годовой темп роста тарифа, доли ед./год.

Годовые дополнительные финансовые потери определялись по выражению:

$$C_{\text{obj}}^{\text{heat}}(t) = Q_{\text{obj}}^{\text{add}}(t) T_{\text{heat}}(t), \quad (22)$$

где $T_{\text{heat}}(t)$ – тариф на тепловую энергию, руб./Гкал.

Стоимость энергоэффективного вмешательства $C_{\text{int}}(t)$, руб. рассчитывалась по формуле (23). Под энергоэффективным вмешательством понимался комплекс ремонтно-восстановительных работ по устранению дефектов и восстановлению теплозащитных свойств конструктивных элементов до условно исправного состояния 0, характеризуемого базовым коэффициентом теплопередачи $k_{0,j}$.

$$C_{\text{int}}(t) = C_{\text{visit}}^{\text{int}} + \sum_{j=1}^J \eta_j F_j \left[C_C^{\text{int}} P_{C,j}(t) + C_B^{\text{int}} P_{B,j}(t) + C_A^{\text{int}} P_{A,j}(t) \right], \quad (23)$$

где $C_{\text{visit}}^{\text{int}}$ – стоимость выезда и обследования, руб.;

η_j – доля работ по j -му элементу, относимая к восстановлению теплозащитных свойств;

C_C^{int} , C_B^{int} и C_A^{int} – удельная стоимость вмешательства для стадии C , B и A соответственно, руб./м².

В базовом экономическом сценарии начальный тариф на тепловую энергию принимался равным 3200 руб./Гкал, годовой темп его роста составлял 4 %, ставка дисконтирования принималась равной 10 %. Стоимость выезда специалиста и обследования составляла 100 тыс. руб. Удельная стоимость работ по восстановлению теплозащитных свойств принималась равной 700 руб./м² для стадии C , 2100 руб./м² для стадии B и 4200 руб./м² для стадии A . Удельная стоимость работ дифференцировалась по

стадии дефектного состояния, но принималась одинаковой для всех конструкций. Это расчетное допущение связано с отсутствием сопоставимых сметных данных. Полученные стоимостные показатели предназначены для сравнительной оценки.

При расчете стоимости учитывалась только доля работ, непосредственно связанная со снижением дополнительных теплопотерь. Для наружных стен коэффициент принимался равным 0,4, для кровли – 0,5, для оконных заполнений – 0,65, для фундамента – 0,1. Внутренние стены, перегородки и отмостка в базовом сценарии не учитывались как прямые источники наружных теплопотерь, поэтому соответствующие коэффициенты принимались равными нулю. Таким образом, итоговая величина включала стоимость обследования и расчетную стоимость мероприятий по восстановлению теплозащитных свойств ограждающих конструкций.

Для дополнительной экономической интерпретации рассчитывался дисконтированный срок окупаемости энергоэффективного вмешательства. Годовая предотвращенная потеря $\Delta C(t|t_r)$, руб./год определялась как разность между сценарием без вмешательства и сценарием после восстановления:

$$\Delta C(t|t_r) = C_0(t) - C_R(t|t_r), \quad (24)$$

где $C_0(t)$ – финансовые потери в сценарии без вмешательства, руб./год;

$C_R(t|t_r)$ – финансовые потери после восстановления, руб./год.

Накопленная дисконтированная экономия за h лет после вмешательства S , руб. рассчитывалась по формуле:

$$S = \sum_{\tau=t_r}^{t_r+h} \frac{\Delta C(\tau|t_r)}{(1+r)^{\tau-t_r}}, \quad (25)$$

где r – ставка дисконтирования.

Дисконтированный срок окупаемости $PP(t_r)$ определялся условием:

$$PP(t_r) = \min h : S \geq C_{\text{int}}(t_r), \quad (26)$$

где $C_{\text{int}}(t_r)$ – стоимость энергоэффективного вмешательства при его выполнении в возрасте t_r , руб.

Итоговый расчетный профиль котельной включал вероятности состояний, суммарную вероятность развитого и критического состояния, дополнительные теплопотери, финансовые потери, стоимость энергоэффективного вмешательства и дисконтированный срок окупаемости.

Расчетная методика основана на следующих допущениях. Для одноименных конструктивных элементов разных зданий применялись единые возрастные зависимости переходов между состояниями, при этом различия между видами конструкций учитывались поправочными коэффициентами k_j . Изменение состояния принималось последовательным и необратимым по схеме $0 \rightarrow C \rightarrow B \rightarrow A$, соответствующей эксплуатации без ремонтно-восстановительных мероприятий. Климатическое воздействие учитывалось посредством HDD_i и $n_{i,j}$. отопительного периода, характеризующим температурные условия эксплуатации. Влажность наружного воздуха, циклы замораживания–оттаивания и солнечная радиация непосредственно в расчет не включались.

3. Результаты и обсуждение

В результате обработки 296 дефектных записей, относящихся к 34 зданиям котельных, было сформировано 204 объектно-конструктивные группы. Зарегистрированные дефектные состояния выявлены в 63,7 % групп, при этом доля развитого и критического состояний составила 31,4 %. Расчетные зависимости (рис. 1-7) показали, что максимальная вероятность начального дефектного состояния достигается в возрасте 19 лет и составляет 0,38, а максимальная вероятность развитого состояния наблюдается в 39 лет и равна 0,49 (рис. 2, а). К этому возрасту суммарная вероятность развитого и критического состояний увеличивается до 0,51. Дополнительные теплопотери возрастают с 5,26 Гкал/год в 19 лет до 21,3 Гкал/год в 39 лет и до 53,53 Гкал/год к 60 годам (рис. 4). В базовом расчетном сценарии годовые финансовые потери к 60 годам достигают 1,8 млн руб., а их равенство с совокупной стоимостью обследования и восстановительных

мероприятий наступает приблизительно в возрасте 49,9 года (рис. 5). Наибольшая вероятность тяжелых дефектных состояний характерна для наружных стен, а повышение климатической нагрузки пропорционально увеличивает тепловые и финансовые потери.

Эмпирическое распределение показало, что из 204 объектно-конструктивных групп 74 группы (36,3 %), находились в условно исправном состоянии. Начальная стадия С выявлена в 66 группах, что соответствует 32,4 %, развитая стадия В выявлена в 49 группах (24 %), критическая стадия А выявлена в 15 группах (7,4 %) (рис. 1). В возрастном интервале 30–39 лет развитое состояние преобладало с долей 36,1 %, а в группе 40–49 лет доля критического состояния достигала 12,5 %. Немонотонность крайних возрастных интервалов объясняется ограниченным числом наблюдений. Группы 0–9 лет и 60 лет и более включали только по 6 объектно-конструктивных групп, поэтому отсутствие тяжелых состояний в старшей группе не следует трактовать как улучшение технического состояния (рис. 1).

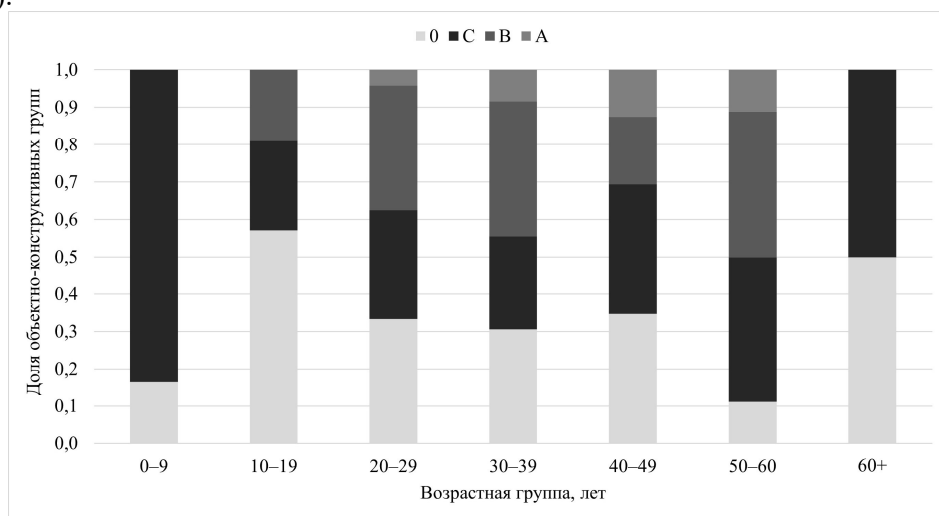


Рис. 1. Распределение технических состояний (0, С, В, А) конструктивных элементов зданий котельных по возрастным группам (иллюстрация авторов)

Fig. 1. Distribution of technical conditions (0, C, B, A) of structural elements of boiler-house buildings by age groups (illustration by the authors)

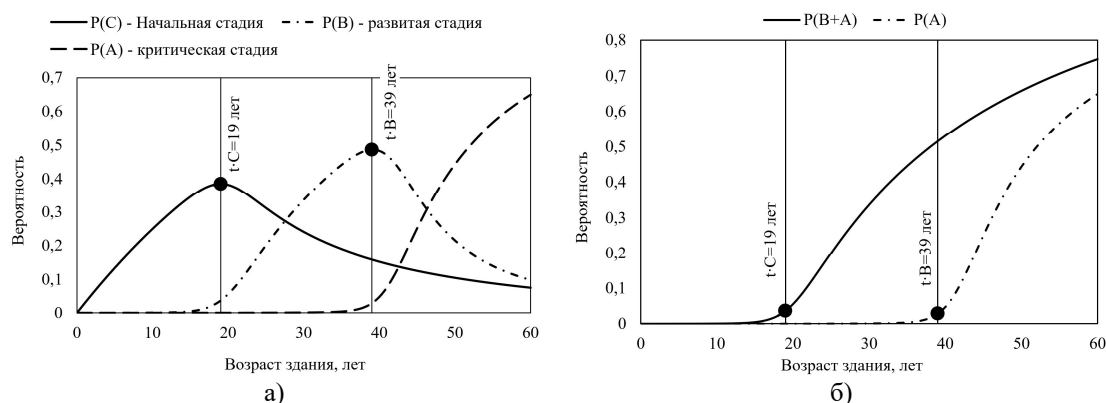


Рис. 2. Расчетные вероятности технических состояний ограждающих конструкций в зависимости от возраста здания: а – вероятности начального, развитого и критического состояний; б – суммарная вероятность развитого и критического состояний и вероятность критического состояния (иллюстрация авторов)

Fig. 2. Estimated probabilities of the technical conditions of enclosing structures depending on the building's age: а – probabilities of the initial, developed, and critical conditions; б – total probability of the developed and critical conditions and the probability of the critical condition (illustration by the authors)

Вероятность начального состояния $P_C(t)$ возрастала в первые годы эксплуатации и достигала максимума 0,38 в возрасте 19 лет. Далее она снижалась вследствие перехода части конструктивных элементов в развитое состояние. Вероятность развитого состояния

РВ сохранялась на низком уровне до 15–17 лет, после чего возрастала и достигала максимума 0,48 в 39 лет. К 60 годам значения $P_C(t)$ и $P_B(t)$ снижались соответственно до 0,0748 и 0,098, что связано с увеличением вероятности критического состояния (рис. 2, а).

Вероятность критического состояния $P_A(t)$ до 30 лет оставалась незначительной. В 39 лет она составляла 0,0285, затем возрастала до 0,25 в 45 лет, 0,44 в 50 лет и 0,64 в 60 лет. Суммарная вероятность развитого и критического состояний $P_{B+A}(t)$ до 20 лет не превышала 0,056, в 30 лет достигала 0,338. К 60 годам она увеличивалась до 0,74 (рис. 2, б). Следовательно, после 39 лет развитое и критическое состояния начинают преобладать в вероятностной структуре состояния конструкций. Возрасты 19 и 39 лет характеризуют максимумы вероятностей стадий С и В, однако не являются нормативными сроками проведения обследований или ремонта.

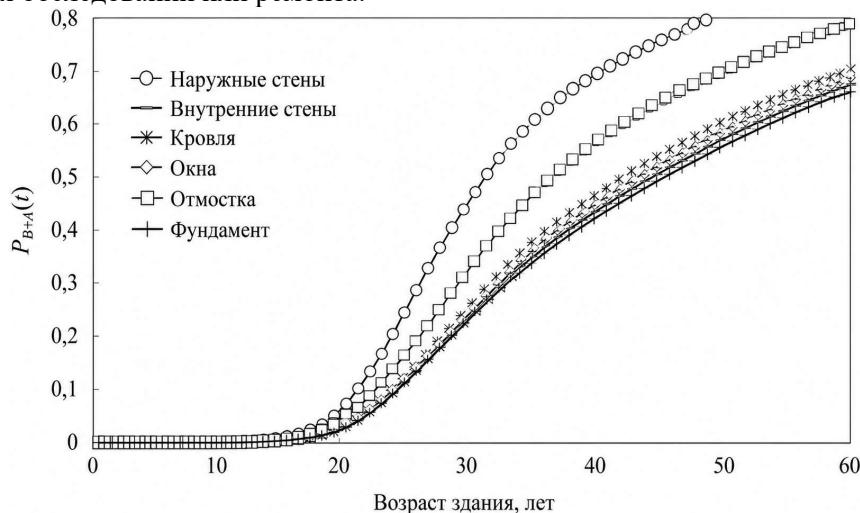


Рис. 3. Зависимость вероятности развитого и критического состояний от возраста здания для различных конструктивных элементов (иллюстрация авторов)

Fig. 3. The dependence of the probability of the developed and critical conditions on the building's age for various structural elements (illustration by the authors)

Наиболее интенсивное накопление тяжелых состояний установлено для наружных стен. В возрасте 39 лет вероятность $P_{B+A}(t)$ для наружных стен составляла 0,71, для отмостки – 0,57, для кровли – 0,465, для оконных заполнений – 0,46, для внутренних стен – 0,44, для фундамента – 0,43. К 60 годам значения возрастали соответственно до 0,88, 0,79, 0,71, 0,69, 0,68 и 0,67. Наружные стены сохраняли максимальный уровень вероятности тяжелых состояний во всем рассмотренном диапазоне, что обосновывает их приоритетное включение в программу обследований (рис. 3).

Увеличение вероятности развитых и критических состояний сопровождается нелинейным ростом дополнительных теплопотерь здания котельной (рис. 4). В первые годы эксплуатации рост теплопотерь происходит сравнительно медленно. В возрасте до 10 лет их расчетное значение составляет 2,53 Гкал/год. К 19 годам, соответствующим максимальной вероятности состояния С, дополнительные теплопотери возрастают до 5,26 Гкал/год. В возрасте 30 лет они достигают 14,91 Гкал/год, а к 39 годам, при максимальной вероятности состояния В, увеличиваются до 21,3 Гкал/год. Таким образом, за период с 19 до 39 лет дополнительные теплопотери возрастают приблизительно в 4,1 раза.

Наиболее интенсивное увеличение теплопотерь наблюдается после 39–40 лет. В 40 лет их величина составляет 22,7 Гкал/год, в 43 года – 29,3 Гкал/год, в 50 лет – 43,9 Гкал/год. Максимальная скорость увеличения дополнительных теплопотерь достигается приблизительно в возрасте 43 лет и составляет 2,56 Гкал в год на каждый дополнительный год эксплуатации. После прохождения данного интервала времени скорость роста постепенно снижается, поскольку значительная часть конструктивных элементов уже переходит в критическое состояние. К 60 годам дополнительные теплопотери достигают 53,5 Гкал/год, что в 10,2 раза превышает значение, полученное для возраста 19 лет (рис. 4).

Установленный рост дополнительных теплотерь при накоплении дефектов согласуется с результатами исследования [29], показавшего увеличение теплопередачи через оболочку и энергопотребления здания при повреждении теплоизоляционного слоя.

Экономическая интерпретация результатов показала, что годовые финансовые потери от ухудшения теплозащитных свойств вначале существенно ниже стоимости обследования и энергоэффективного вмешательства (рис. 4). В возрасте 19 лет финансовые потери составляют 35,5 тыс. руб./год при расчетной стоимости вмешательства 232,8 тыс. руб. В возрасте 39 лет показатели возрастают соответственно до 314,7 и 570,1 тыс. руб. После 40 лет финансовые потери увеличиваются опережающими темпами вследствие одновременного роста дополнительных теплотерь и тарифа на тепловую энергию.

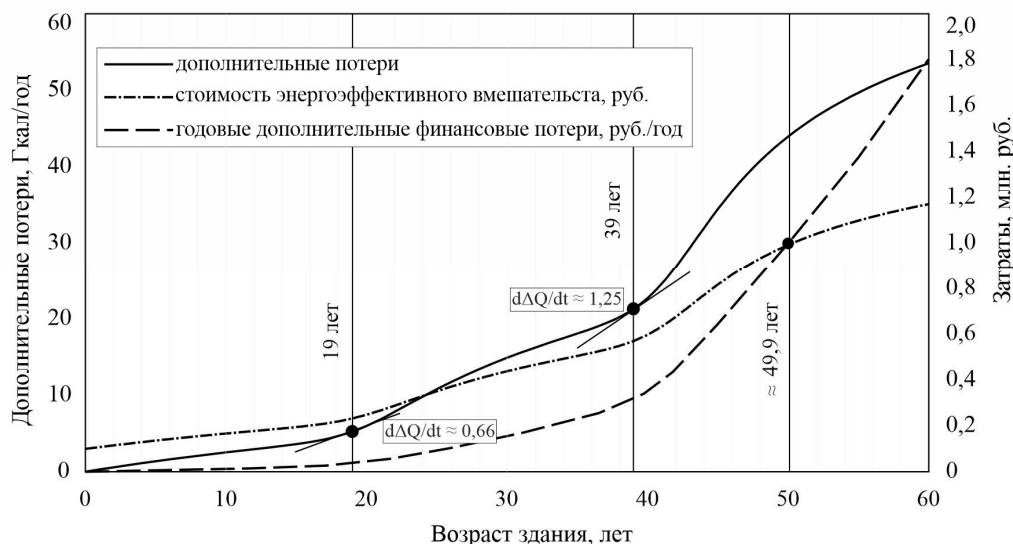


Рис. 4. Зависимость дополнительных годовых теплотерь здания котельной от срока эксплуатации и сопоставление годовых финансовых потерь от дополнительных теплотерь и совокупной стоимости обследования и энергоэффективного вмешательства (иллюстрация авторов)
Fig. 4. The dependence of additional annual heat losses of the boiler-house building on its service life and comparison of the annual financial losses due to additional heat losses with the total cost of the survey and energy-efficiency interventions (illustration by the authors)

Пересечение кривых годовых финансовых потерь и совокупной стоимости обследования и восстановительных мероприятий происходит приблизительно в возрасте 49,9 года. В этой точке обе величины составляют около 0,99 млн руб. К 60 годам годовые финансовые потери увеличиваются до 1,80 млн руб., тогда как расчетная стоимость энергоэффективного вмешательства составляет 1,17 млн руб. Следовательно, для зданий с продолжительным сроком эксплуатации стоимость мероприятий по восстановлению теплозащитных свойств становится ниже финансовых потерь, формирующихся в течение одного года. Вместе с тем указанное пересечение является показателем экономической приоритетности вмешательства, а не непосредственным сроком его окупаемости, поскольку сравнивает годовой поток потерь с единовременными затратами (рис. 4).

Тепловая карта годовых финансовых потерь подтверждает совместное влияние возраста здания и климатической нагрузки (рис. 5). При одинаковом техническом состоянии увеличение градусо-суток отопительного периода с 6900 до 10 422,5 °С·сут/год повышает расчетные потери в 1,51 раза. Для здания возрастом 20 лет финансовые потери изменяются от 34,1 тыс. руб./год при HDD = 6900 °С·сут/год до 51,5 тыс. руб./год при HDD = 10 422,5 °С·сут/год. В возрасте 40 лет диапазон увеличивается до 283,4–428,1 тыс. руб./год, а в 50 лет увеличивается до 0,811–1,226 млн руб./год. Для здания возрастом 60 лет годовые финансовые потери составляют 1,463 млн руб. при минимальной принятой климатической нагрузке, 1,802 млн руб. в базовом сценарии и 2,210 млн руб. при HDD = 10 422,5 °С·сут/год.

Полученный характер влияния климатической нагрузки согласуется с результатами современных исследований. S. Sun и др. на основе физической модели отапливаемого здания установили линейную зависимость энергопотребления на отопление от градусо-

суток отопительного периода и подтвердили применимость предложенного подхода расчетными и экспериментальными данными [30]. В настоящей работе увеличение ГСОП с 6900 до 10 422,5 °С·сут/год на 51,1 % при неизменном техническом состоянии приводит к увеличению дополнительных тепловых и финансовых потерь приблизительно в 1,51 раза, что соответствует линейному характеру указанной зависимости. G. Tomrukcu и T. Ashrafiyan при моделировании перспективных климатических сценариев для жилых зданий также установили существенное изменение отопительной нагрузки вследствие изменения температурных условий: к 2080 г. энергопотребление на отопление для исследованных зданий снижалось приблизительно на 40–45 %, одновременно со значительным уменьшением ГСОП [31]. Несмотря на различия в назначении зданий, климатических условиях и постановке расчетных задач, результаты подтверждают существенное влияние температурной климатической нагрузки на энергетические показатели зданий.

Увеличение климатической нагрузки не изменяет характер возрастной зависимости, но пропорционально повышает ее абсолютные значения. Поэтому здания одинакового возраста и сопоставимого технического состояния, расположенные в населенных пунктах с более продолжительным и холодным отопительным периодом, должны получать более высокий приоритет при планировании обследований. Особенно выраженным климатическое влияние становится после 40 лет эксплуатации, когда возрастное ускорение деградации накладывается на высокую продолжительность отопительного периода (рис. 5).

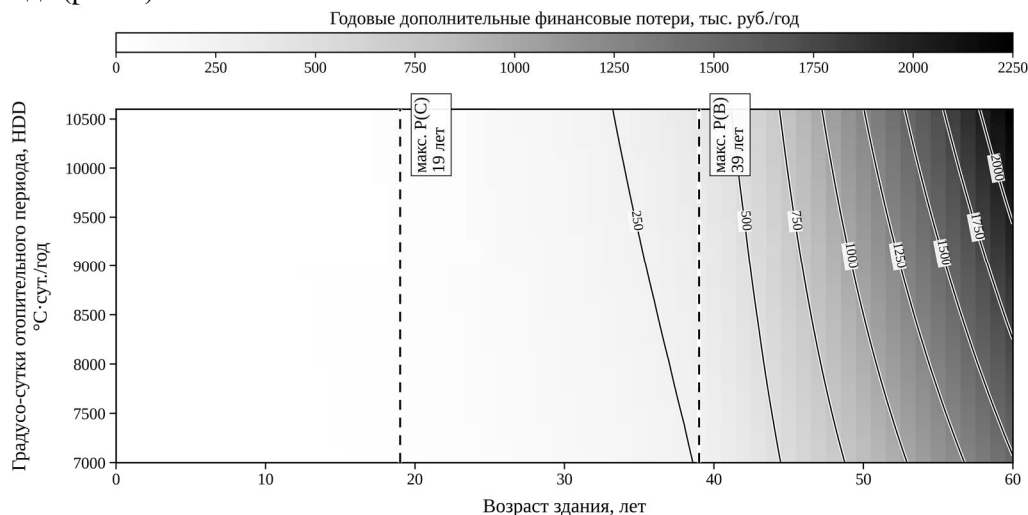


Рис. 5. Зависимость годовых финансовых потерь от возраста здания и климатической нагрузки (иллюстрация авторов)

Fig. 5. The dependence of annual financial losses on the building's age and climatic load (illustration by the authors)

Расчет дисконтированного срока окупаемости показал его устойчивое снижение с увеличением возраста выполнения энергоэффективного вмешательства (рис. 6). При проведении мероприятий в возрасте 10 лет срок окупаемости составляет 16 лет. При возрасте вмешательства 19, 27,5, 40 и 50 он снижается до 5,77, 3,26, 1,59 и 0,91 года соответственно. Столь значительное сокращение срока окупаемости в старших возрастных группах объясняется увеличением предотвращаемых тепловых и финансовых потерь.

Анализ изменения наклона кривой срока окупаемости позволил выделить два характерных возрастных рубежа (рис. 6). В интервале от 10 до 19 лет наблюдается наиболее резкое снижение срока окупаемости, т. к. модуль производной уменьшается с 1,67 до 0,58 года окупаемости на каждый дополнительный год отсрочки вмешательства. После 19 лет снижение продолжается, но становится менее интенсивным. В возрасте 27,5 года угол наклона кривой уменьшается до 9,9°, а модуль производной до 0,175. При дальнейшем увеличении возраста дополнительное сокращение срока окупаемости становится сравнительно небольшим по отношению к накоплению тепловых потерь и росту вероятности критического состояния.

Таким образом, возраст около 19 лет можно рассматривать как первый диагностически значимый период эксплуатации зданий котельных. К этому времени вероятность начального дефектного состояния достигает максимума, после чего возрастает интенсивность перехода конструктивных элементов в развитое состояние и ускоряется увеличение дополнительных тепловпотерь. Одновременно дисконтированный срок окупаемости энергоэффективных мероприятий сокращается до 5,77 года, хотя текущие годовые финансовые потери еще остаются существенно ниже совокупной стоимости обследования и восстановительных работ. Поэтому достижение зданием возраста около 19 лет целесообразно учитывать при планировании углубленного обследования, уточнении фактического состояния ограждающих конструкций и заблаговременной подготовке восстановительных мероприятий.

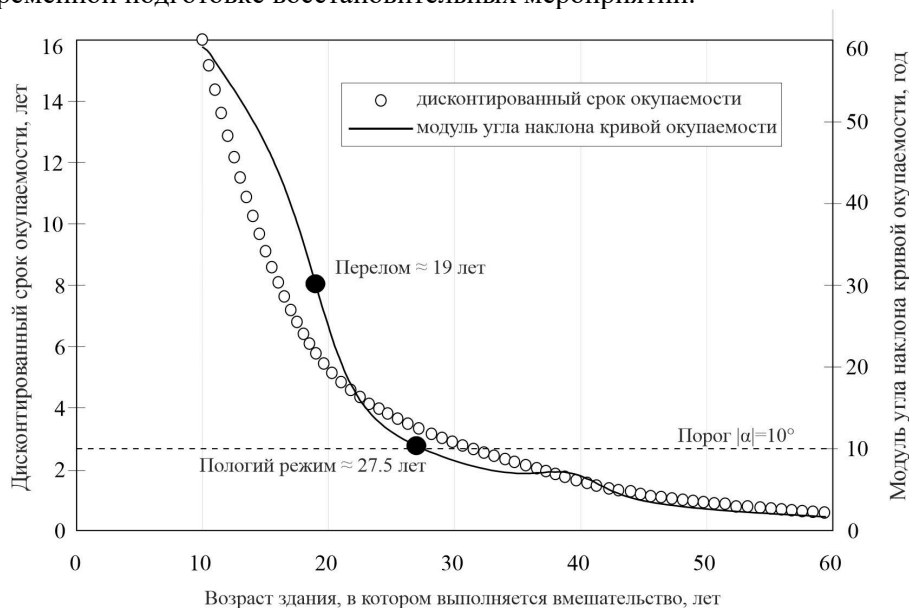


Рис. 6. Экономическая эффективность энергоэффективного вмешательства в зависимости от возраста здания (иллюстрация авторов)

Fig. 6. Economic efficiency of the energy-efficiency intervention depending on the age of the building (illustration by the authors)

Расчетный дисконтированный срок окупаемости энергоэффективных мероприятий при их реализации в возрасте здания около 19 лет составляет 5,77 года. Полученное значение сопоставимо с опубликованными оценками экономической эффективности высокоэффективных решений для ограждающих конструкций. Так, Т. Gao с соавторами при исследовании аэрогельного остекления в условиях холодного климата Осло получили срок возврата инвестиций около 4,4 года при снижении совокупного энергопотребления здания приблизительно на 21 % [32]. Сопоставимый порядок значений свидетельствует об экономической реализуемости рассматриваемых мероприятий, при этом конкретный срок окупаемости определяется характеристиками здания, климатическими условиями, стоимостью работ и тарифом на тепловую энергию.

Для оценки влияния принятых допущений выполнен локальный анализ чувствительности. Совокупные вероятности дефектных состояний C , B и A , характеризующие возможное отклонение от единой закономерности деградации, варьировались на $\pm 10\%$ при сохранении соотношения между состояниями. Такое изменение приводило к пропорциональному отклонению дополнительных тепловпотерь и связанных с ними финансовых потерь на $\pm 10\%$. С учетом диапазона климатической нагрузки $6900\text{--}10\,422,5\text{ }^\circ\text{C}\cdot\text{сут/год}$ дополнительные тепловпотери к 60 годам изменялись от 39,1 до 72,2 Гкал/год, а годовые финансовые потери — от 1,32 до 2,43 млн руб. Полученный диапазон характеризует устойчивость основных выводов методики к умеренным отклонениям от принятых допущений.

4. Заключение

1. Разработана методика прогнозирования состояния ограждающих конструкций зданий котельных, объединяющая марковскую модель возрастной деградации, расчет дополнительных теплопотерь с учетом климатической нагрузки и экономическую оценку восстановительных мероприятий.

2. По результатам обработки 296 дефектных записей для 34 зданий установлено, что дефектные состояния выявлены в 63,7 % объектно-конструктивных групп, а доля развитых и критических состояний составляет 31,4 %. Максимальная вероятность начального состояния достигается примерно в 19 лет, развитого – в 39 лет, после чего ускоряется переход конструкций в критическое состояние.

3. Установлено, что наиболее интенсивная деградация характерна для наружных стен. К 60 годам вероятность их развитого или критического состояния достигает 0,88. Дополнительные теплопотери увеличиваются с 5,26 Гкал/год в 19 лет до 53,53 Гкал/год в 60 лет, наибольшая скорость их роста наблюдается примерно после 40 лет эксплуатации.

4. Климатическая нагрузка пропорционально увеличивает тепловые и финансовые последствия деградации. При возрастании градусо-суток отопительного периода с 6900 до 10 422,5 °С·сут/год расчетные финансовые потери увеличиваются в 1,51 раза. Для здания возрастом 60 лет они составляют от 1,463 до 2,210 млн руб./год в зависимости от климатических условий населенного пункта.

5. Возраст около 19 лет обоснован как целесообразный период для углубленного обследования ограждающих конструкций и планирования энергоэффективных мероприятий, поскольку после него ускоряются развитие дефектов и рост трансмиссионных теплопотерь, а дисконтированный срок окупаемости сокращается до 5,77 года.

Благодарности

Работа выполнена в рамках гранта Академии Наук Республики Татарстан на поддержку программ развития передовых инженерных школ республиканского значения «ТурбоПИИШ», соглашение 1РПИИШ от 19.12.2025г.

The work was carried out within the framework of a grant from the Academy of Sciences of the Republic of Tatarstan to support programs for the development of advanced engineering schools of national significance "Turbo Advanced Engineering School", agreement 1 Russian advanced engineering school dated 12/19/2025.

Список литературы/References

1. Niza I. L., Luz I. M. da, Bueno A. M., Broday E. E. Thermal Comfort and Energy Efficiency: Challenges, Barriers, and Step towards Sustainability // Smart Cities. 2022. Vol. 5. No. 4. P. 1721–1741. DOI: 10.3390/smartcities5040086.
2. Борисов Б. В., Вяткин А. В., Кузнецов Г. В., Максимов В. И., Нагорнова Т. А. Математическое моделирование теплопереноса в помещении с газовым инфракрасным излучателем, системой воздухообмена и локальным ограждением рабочей зоны // Сибирский журнал индустриальной математики. 2023. Т. 26. № 1. С. 20–32. DOI: 10.33048/SIBJIM.2023.26.102.
Borisov B. V., Vyatkin A. V., Kuznetsov G. V., Maksimov V. I., Nagornova T. A. Mathematical modeling of heat transfer in a room with a gas infrared heater, air exchange system and local fence of the working area // Siberian Journal of Industrial Mathematics. 2023. Vol. 26. No. 1. P. 20–32. DOI: 10.33048/SIBJIM.2023.26.102.
3. Dakkama H. J., Khaleel A. J., Ahmed A. Q., Al-Shohani W. A. M., Obaida H. M. B. Effect of Local Floor Heating System on Occupants' Thermal Comfort and Energy Consumption Using Computational Fluid Dynamics (CFD) // Fluids. 2023. Vol. 8. No. 11. Article 299. DOI: 10.3390/fluids8110299.
4. Малыгина О. А. Разработка математических моделей определения тепловлажностного режима ограждающих конструкций зданий при нестационарном тепловом потоке // Современные проблемы гражданской защиты. 2024. № 3(52). С. 93–104.

- Malygina O. A. Development of mathematical models for determining the heat and humidity conditions of building enclosing structures under non-stationary heat flow // *Modern Problems of Civil Protection*. 2024. No. 3(52). P. 93–104.
5. Yu J., Chang W.-S., Zhang R., Dong Y., Huang H., Wang T.-H. In-situ U-value measurements of typical building envelopes in a severe cold region of China: U-value variations and energy implications // *Energy and Buildings*. 2024. Vol. 324. Article 114947. DOI: 10.1016/j.enbuild.2024.114947.
 6. Yu J., Dong Y., Wang T.-H., Chang W.-S., Park J. U-Values for Building Envelopes of Different Materials: A Review // *Buildings*. 2024. Vol. 14. No. 8. Article 2434. DOI: 10.3390/buildings14082434.
 7. Liu Z., Zhou X., Tian W., Liu X., Yan D. Impacts of uncertainty in building envelope thermal transmittance on heating/cooling demand in the urban context // *Energy and Buildings*. 2022. Vol. 273. Article 112363. DOI: 10.1016/j.enbuild.2022.112363.
 8. Рязанцев О. А., Трубаев П. А., Кошлич Ю. А., Доценко Д. Ю., Буханов Д. Г. Инструментальное теплотехническое обследование ограждающих конструкций зданий перед проведением капитального ремонта // *Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В. Г. Шухова*. 2023. Т. 8. № 5. С. 52–61. DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-5-52-61.
Ryazantsev O. A., Trubaev P. A., Koshlich Yu. A., Dotsenko D. Yu., Bukhanov D. G. Instrumental thermal engineering inspection of building enclosing structures before major repairs // *Bulletin of Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov*. 2023. Vol. 8. No. 5. P. 52–61. DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-5-52-61.
 9. Ибе Е. Е., Шибаева Г. Н., Музалев А. В. Вопросы нормативно-технического регулирования повышения качества тепловой защиты наружных стен зданий для условий холодного климата // *Вестник Евразийской науки*. 2024. Т. 16. № 3. 93SAVN324. URL: <https://esj.today/PDF/93SAVN324.pdf>.
Ibe E. E., Shibaeva G. N., Muzalev A. V. Issues of normative regulation of improving the quality of thermal protection of external walls of buildings for cold climate conditions // *The Eurasian Scientific Journal*. 2024. Vol. 16. No. 3. Article 93SAVN324. URL: <https://esj.today/PDF/93SAVN324.pdf>.
 10. Taki A., Zakharanka A. The Effect of Degradation on Cold Climate Building Energy Performance: A Comparison with Hot Climate Buildings // *Sustainability*. 2023. Vol. 15. No. 8. Article 6372. DOI: 10.3390/su15086372.
 11. Taki A., Zakharanka A. The Impact of Degradation on a Building's Energy Performance in Hot-Humid Climates // *Sustainability*. 2023. Vol. 15. No. 2. Article 1145. DOI: 10.3390/su15021145.
 12. Motawa I., Elsheikh A., Diab E. Energy Performance Analysis of Building Envelopes // *Journal of Engineering, Project, and Production Management*. 2021. Vol. 11. No. 3. P. 196–206. DOI: 10.2478/jeppm-2021-0019.
 13. Зинуров В. Э., Мугинов А. М. Численное моделирование температурных полей жилого помещения при работе радиаторной и напольной систем отопления // *Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета*. 2026. № 1(75). С. 123–135. DOI: 10.48612/NewsKSUAE/75.11. EDN: GQBZPK.
Zinurov V. E., Muginov A. M. Numerical simulation of residential temperature fields during operation of radiator and floor heating systems // *News of KSUAE*. 2026. No. 1(75). P. 123–135. DOI: 10.48612/NewsKSUAE/75.11. EDN: GQBZPK.
 14. Perilli S., Palumbo D., Sfarra S., Galietti U. Advanced Insulation Materials for Facades: Analyzing Detachments Using Numerical Simulations and Infrared Thermography // *Energies*. 2021. Vol. 14. No. 22. Article 7546. DOI: 10.3390/en14227546.
 15. Семикин П. В., Должиков В. Н., Бацунова Т. П. Натурное обследование и теплотехнический расчет термически неоднородных ограждающих конструкций зданий // *Известия высших учебных заведений. Строительство*. 2021. № 5(749). С. 97–106. DOI: 10.32683/0536-1052-2021-749-5-97-106.
Semikin P. V., Dolzhikov V. N., Batsunova T. P. Field survey and thermal engineering calculation of thermally inhomogeneous building envelopes // *News of Higher*

- Educational Institutions. Construction. 2021. No. 5(749). P. 97–106. DOI: 10.32683/0536-1052-2021-749-5-97-106.
16. Ziganshin A. M., Logachev K. I., Kareeva J. R. Vortex zones in an exhaust hood in front of an impermeable plane // Magazine of Civil Engineering. 2023. Vol. 123. No. 7. Article 12307. DOI: 10.34910/MCE.123.7.
17. Sharma S. K., Mohapatra S., Sharma R. C., Alturjman S., Altrjman C., Mostarda L., Stephan T. Retrofitting Existing Buildings to Improve Energy Performance // Sustainability. 2022. Vol. 14. No. 2. Article 666. DOI: 10.3390/su14020666.
18. Wang P., Ji C., Yu P., Huang L. A procedure set to construct the optimal energy saving retrofit strategy for old residential buildings in China // Journal of Renewable and Sustainable Energy. 2023. Vol. 15. No. 2. Article 025101. DOI: 10.1063/5.0134055.
19. Rosso F., Ciancio V., Dell’Olmo J., Salata F. Multi-objective optimization of building retrofit in the Mediterranean climate by means of genetic algorithm application // Energy and Buildings. 2020. Vol. 216. Article 109945. DOI: 10.1016/j.enbuild.2020.109945.
20. Меркулов С. И., Есипов С. М., Голиков Г. Г. О формировании методики оптимизации планирования капитального ремонта жилых зданий на этапах эксплуатации и ремонта // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В. Г. Шухова. 2023. Т. 8. № 5. С. 62–70. DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-5-62-70.
- Merkulov S. I., Esipov S. M., Golikov G. G. On the formation of a methodology for optimizing the planning of capital repairs of residential buildings at the stages of operation and repair // Bulletin of Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov. 2023. Vol. 8. No. 5. P. 62–70. DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-5-62-70.
21. Youssefi I., Celik T., Azimli A. Financial feasibility analysis for different retrofit strategies on an institutional building // Sustainable Energy Technologies and Assessments. 2022. Vol. 52. Article 102342. DOI: 10.1016/j.seta.2022.102342.
22. Akkose G., Akgul C. M., Gursel Dino I. Educational building retrofit under climate change and urban heat island effect // Journal of Building Engineering. 2021. Vol. 40. Article 102294. DOI: 10.1016/j.jobe.2021.102294.
23. Цэрэндорж Ц., Ахметова И. Г., Султангузин И. А., Калякин И. Д., Лувсандорж Б. Повышение энергоэффективности многоквартирных домов в Улан-Баторе (Монголия) // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2025. Т. 27. № 6. С. 156–170. DOI: 10.30724/1998-9903-2025-27-6-156-170.
- Tserendorj Ts., Akhmetova I. G., Sultanguzin I. A., Kalyakin I. D., Luvsandorj B. Improving the energy efficiency of apartment buildings in Ulaanbaatar, Mongolia // News of Higher Educational Institutions. Energy Issues. 2025. Vol. 27. No. 6. P. 156–170. DOI: 10.30724/1998-9903-2025-27-6-156-170.
24. Kim C., Park G., Jang H., Kim E. J. Automated classification of thermal defects in the building envelope using thermal and visible images // Quantitative InfraRed Thermography Journal. 2023. Vol. 20. No. 3. P. 106–122. DOI: 10.1080/17686733.2022.2033531.
25. Zbiciak A., Walasek D., Nagirniak M., Walasek K., Koda E. Markov Chain Modeling for Predicting the Service Life of Buildings and Structural Components // Applied Sciences. 2025. Vol. 15. No. 17. Article 9287. DOI: 10.3390/app15179287.
26. Abaza K. A. Theoretical framework for modeling the long-term performance of pavement routine maintenance using Markov chain // Cogent Engineering. 2024. Vol. 11. No. 1. Article 2366529. DOI: 10.1080/23311916.2024.2366529.
27. Ryan B., Bristow D. N. Modeling HVAC degradation due to climate shocks and stresses using dynamic Bayesian networks // Canadian Journal of Civil Engineering. 2024. Vol. 51. No. 12. P. 1369–1387. DOI: 10.1139/cjce-2023-0415.
28. Bayat Pour M., Niklewski J., Naghibi S. A., Frühwald Hansson E. A literature review of probabilistic hygrothermal assessment for building envelopes // Building and Environment. 2024. Vol. 261. Article 111756. DOI: 10.1016/j.buildenv.2024.111756.

29. O'Hegarty R., Amedeo G., Kinnane O. The impact of compromised insulation on building energy performance // Energy and Buildings. 2024. Vol. 316. Article 114337. DOI: 10.1016/j.enbuild.2024.114337.
30. Sun S., Wang J., Sun Q., Zhao C. An energy consumption rectification method based on Bayesian linear regression and heating degree-days // Energy Science & Engineering. 2024. Vol. 12. No. 10. P. 4720–4736. DOI: 10.1002/ese3.1920.
31. Tomrukcu G., Ashrafian T. Climate-resilient building energy efficiency retrofit: Evaluating climate change impacts on residential buildings // Energy and Buildings. 2024. Vol. 316. Article 114315. DOI: 10.1016/j.enbuild.2024.114315.
32. Gao T., Ihara T., Grynning S., Jelle B. P., Lien A. G. Perspective of aerogel glazings in energy efficient buildings // Building and Environment. 2016. Vol. 95. P. 405–413. DOI: 10.1016/j.buildenv.2015.10.001.

Информация об авторах

Юдин Владислав Юрьевич, аспирант, Казанский (Приволжский) федеральный университет, г. Казань, Российская федерация

Email: yudinvladislav@yandex.ru

Зинуров Вадим Эдуардович, кандидат технических наук, доцент, Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Российская федерация

Email: vadd_93@mail.ru, ORCID: 0000-0002-1380-4433

Дмитриев Андрей Владимирович, доктор технических наук, профессор, Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Российская Федерация

Email: andrey-dm1t@yandex.ru, ORCID: 0000-0001-8979-4457

Кареева Юлия Рустэмовна, кандидат технических наук, доцент, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань, Российская Федерация E-mail: kareeva@kgasu.ru, ORCID: 0000-0002-9497-349X

Мугинов Арслан Маратович, Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Российская федерация

Email: dostoevskijkant@gmail.com, ORCID: 0009-0008-2914-6923

Information about the authors

Vladislav Yu. Yudin, post-graduate student, Kazan Federal University, Kazan, Russian Federation.

Email: yudinvladislav@yandex.ru

Vadim E. Zinurov, Candidate of Technical Sciences, associate professor, Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russian Federation

Email: vadd_93@mail.ru, ORCID: 0000-0002-1380-4433

Andrey V. Dmitriev, Doctor of Technical Sciences, Professor, Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russian Federation

Email: andrey-dm1t@yandex.ru, ORCID: 0000-0001-8979-4457

Yulia R. Kareeva, candidate of technical sciences, associate professor, Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation

E-mail: kareeva@kgasu.ru, ORCID: 0000-0002-9497-349X

Arslan M. Muginov, Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russian Federation

Email: dostoevskijkant@gmail.com, ORCID: 0009-0008-2914-6923

Дата поступления: 15.06.2026

Дата принятия: 28.09.2026