

УДК: 69.058:681.586:004.94
EDN: CQMMQJ

[https://doi.org/10.37538/0005-9889-2026-3-\(634\)-124-134](https://doi.org/10.37538/0005-9889-2026-3-(634)-124-134)

С.О. ЕВДОКИМЕНКО

Независимый исследователь. Москва, Российская Федерация

МОНИТОРИНГ СОСТОЯНИЯ КАРКАСНЫХ ДОМОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ ВСТРОЕННЫХ ДАТЧИКОВ ВЛАЖНОСТИ И ДЕФОРМАЦИИ: ВАЛИДАЦИЯ ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ

Аннотация

Введение. Предметом исследования являются методы встроенного мониторинга влажностного и деформационного состояния ограждающих конструкций каркасных домов и процедуры валидации их цифровых двойников по сенсорным данным.

Цель работы заключается в разработке методики интеграции встроенных датчиков температуры, относительной влажности, влагосодержания древесины и деформаций с цифровым двойником многослойной каркасной ограждающей конструкции для повышения достоверности оценки ее технического состояния.

Материалы и методы исследования включают анализ научных публикаций, нормативных источников, включая СП 31–105–2002 [13], формирование структуры цифрового двойника, разработку схемы размещения датчиков в критических зонах конструкции, проектирование лабораторной и натурной программы мониторинга, а также разработку критериев сопоставления расчетных и измеренных параметров.

Результаты. Сформирована комплексная методика мониторинга состояния каркасных ограждающих конструкций, предложена архитектура цифрового двойника, определены наиболее информативные зоны установки сенсоров и разработаны критерии валидации модели по временным рядам контролируемых параметров. Установлено, что использование встроенного мониторинга позволяет повысить точность цифрового двойника за счет калибровки параметров тепловлажностной и механической подсистем, а устойчивое рассогласование расчетных и измеренных значений может рассматривать-

ся как диагностический признак скрытого дефекта. **Выводы.** Научная новизна исследования состоит в разработке комплексной методики валидации цифрового двойника каркасной ограждающей конструкции на основе данных встроенных датчиков влажности и деформации. Практическая значимость работы определяется возможностью раннего выявления скрытого увлажнения, прогнозирования деформационного поведения и повышения надежности эксплуатации каркасных зданий, проектируемых и возводимых в соответствии с действующей нормативной базой.

Ключевые слова: каркасный дом, ограждающая конструкция, цифровой двойник, встроенный мониторинг, влажность древесины, деформации, валидация модели, техническое состояние, строительная физика, предиктивная диагностика

Для цитирования: Евдокименко С.О. Мониторинг состояния каркасных домов с применением встроенных датчиков влажности и деформации: валидация цифровых двойников ограждающих конструкций // *Бетон и железобетон*. 2026. № 3(634). С. 124–134. [https://doi.org/10.37538/0005-9889-2026-3-\(634\)-124-134](https://doi.org/10.37538/0005-9889-2026-3-(634)-124-134) EDN: CQMMQJ

Вклад автора

Автор выполнил все этапы исследования, включая постановку задачи, разработку метода, проведение экспериментов, обработку данных и написание рукописи.

Финансирование

Исследование не имело спонсорской поддержки.

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 20.03.2026

Поступила после рецензирования 27.04.2026

Принята к публикации 12.05.2026

S.O. EVDOKIMENKO

Independent researcher. Moscow, Russian Federation

MONITORING THE CONDITION OF FRAME HOUSES USING INTEGRATED MOISTURE AND DEFORMATION SENSORS: VALIDATION OF DIGITAL DOUBLE OF FENCING STRUCTURES

Abstract

Introduction. The subject of the study is the methods of embedded monitoring of the moisture and deformation state of envelope structures in timber frame houses and the procedures for validating their digital twins using sensor data.

The aim of the work is to develop a methodology for integrating embedded sensors of temperature, relative humidity, wood moisture content and deformations with a digital twin of a multilayer timber frame envelope structure in order to improve the reliability of its technical condition assessment.

Materials and methods. The research methods include analysis of scientific publications and regulatory sources, including SP 31–105–2002 [13], development of the digital twin structure, design of the sensor placement scheme in critical zones of the structure, planning of laboratory and field monitoring programs, and development of criteria for comparing calculated and measured parameters.

Results. As a result, a comprehensive methodology for monitoring the condition of timber frame envelope structures has been developed, the architecture of the digital twin has been proposed, the most informative zones for sensor placement have been identified, and validation criteria based on time series of controlled parameters have been developed. It has been established that the use of embedded monitoring improves the accuracy of the digital twin through calibration of the parameters of the hygrothermal and mechanical subsystems, while stable discrepancies between calculated and measured values can be considered as a diagnostic sign of a hidden defect.

Conclusions. The practical significance of the work is associated with early detection of hidden moisture accumulation, prediction of deformation behavior and improved reliability of timber frame buildings designed in accordance with the current regulatory framework.

Keywords: timber frame house, building envelope, digital twin, embedded monitoring, wood moisture content, deformation, model validation, technical condition, building physics, predictive diagnostics

For citation: Evdokimenko S.O. Monitoring the condition of frame houses using integrated moisture and deformation sensors: validation of digital double of fencing structures. *Concrete and reinforced concrete*, 2026, no. 3(634), pp. 124–134. (In Russian) [https://doi.org/10.37538/0005-9889-2026-3-\(634\)-124-134](https://doi.org/10.37538/0005-9889-2026-3-(634)-124-134) EDN: CQMMQJ

Author contribution statement

The author carried out all stages of the research, including the formulation of the problem, the development of the method, the conduct of experiments, data processing and writing the manuscript.

Funding

No funding support was obtained for the research

Conflict of interest

The author declares no conflict of interest.

Received 20.03.2026

Received 27.04.2026

Accepted 12.05.2026

Введение

Каркасное домостроение является одним из наиболее динамично развивающихся направлений малоэтажного строительства вследствие низкой материалоемкости, высокой скорости возведения и возможности достижения высоких показателей энергоэффективности. Эксплуатационная надёжность каркасных зданий в значительной степени определяется состоянием их ограждающих конструкций, чувствительных к локальным нарушениям тепловлажностного режима, дефектам герметизации, ошибкам монтажа защитных слоёв и воздействию переменных климатических условий [1–3]. Существенную роль играют положения отечественной нормативной базы, в частности СП 31–105–2002 [13], который, однако, ориентирован преимущественно на этапы проектирования и строительства и не охватывает задачи встроенного мониторинга, цифровой валидации и предиктивной диагностики в процессе эксплуатации.

Проблема. Процессы накопления влаги в многослойных каркасных ограждениях, биологического поражения древесины и развития остаточных деформаций часто протекают скрыто, без выраженных внешних признаков на ранних стадиях [4–7]. Это затрудняет своевременное выявление дефектов традиционными методами обследования и приводит к росту затрат на последующий ремонт. Одновременно в строительной отрасли развивается концепция цифрового двойника как адаптивной вычислительной модели объекта, актуализируемой по данным эксплуатации [8–10]. Однако практическая ценность цифрового двойника определяется степенью его адекватности реальному поведению конструкции, что требует валидации по сенсорным данным.

Предлагаемый подход. Перспективным направлением повышения надёжности эксплуатации каркасных домов является применение встроенного мониторинга на основе длительной регистрации параметров состояния конструкции в её критических зонах [3]. Встраиваемые датчики температуры, относительной влажности, влагосодержания древесины и деформаций позволяют получать объективную информацию о фактическом поведении конструкции в реальных условиях эксплуатации. Для каркасной ограждающей конструкции цифровой двойник должен описывать геометрию, свойства материалов, процессы тепломассопереноса и механический отклик элементов каркаса, а его валидация – выполняться по данным мониторинга.

Цель работы. Несмотря на наличие исследований по строительной физике ограждающих конструкций, мониторингу зданий и цифровым двойникам [1–10], комплексные работы, объединяющие встроенный сенсорный мониторинг и валидацию цифровых двойников каркасных ограждающих конструкций, представлены недостаточно. В связи с этим целью настоящей работы является разработка методики мониторинга состояния каркасных домов

с применением встроенных датчиков влажности и деформации для валидации цифровых двойников.

Нормативная база исследования

Нормативную основу исследования составляют документы, регламентирующие проектирование и эксплуатационную надёжность ограждающих конструкций, а также оценку их тепловлажностного состояния. К числу ключевых источников относятся EN ISO 13788, устанавливающий методы расчета внутренней поверхности и межслойной конденсации [11], ISO 15686–1, определяющий общие принципы планирования срока службы зданий и строительных активов [12], а также СП 31–105–2002, регламентирующий проектирование и строительство энергоэффективных многоквартирных жилых домов с деревянным каркасом [13].

СП 31–105–2002 имеет принципиальное значение для настоящего исследования, поскольку фиксирует типовые конструктивные решения, применяемые в отечественной практике каркасного домостроения, устанавливает требования к ограждающим конструкциям, теплозащите, устройству пароизоляционных и ветрозащитных слоев, а также к конструктивной надёжности узлов [13]. Это делает его необходимым нормативным ориентиром при выборе объекта исследования, разработке схемы размещения датчиков и формировании исходных предпосылок цифрового двойника.

Вместе с тем анализ содержания СП 31–105–2002 показывает, что документ в основном ориентирован на стадии проектирования и строительства и не содержит методического аппарата для встроенного цифрового мониторинга состояния конструкции на этапе эксплуатации. Следовательно, предлагаемое исследование развивает положения существующей нормативной базы, дополняя ее инструментами сенсорного контроля, цифровой валидации и предиктивной диагностики.

Постановка задачи исследования

Целью настоящего исследования является разработка методики мониторинга состояния ограждающих конструкций каркасных домов с применением встроенных датчиков влажности и деформации для валидации цифровых двойников.

Для достижения поставленной цели решаются следующие задачи:

1. Обосновать состав контролируемых параметров, характеризующих тепловлажностное и деформационное состояние каркасной ограждающей конструкции;
2. Разработать схему размещения встроенных датчиков в наиболее информативных узлах и зонах риска;
3. Сформировать структуру цифрового двойника, включающую геометрическую, тепловлажностную и механическую подсистемы;
4. Разработать программу лабораторного и натурного мониторингов;

5. Определить критерии валидации цифрового двойника по данным временных рядов;

6. Оценить возможность использования рассогласования расчетных и измеренных значений как признака скрытого дефекта.

Материалы и методы

4.1. Объект исследования

Объектом исследования является типовая наружная многослойная стена каркасного дома, включающая внутреннюю облицовку, пароизоля-

ционный слой, деревянный каркас с теплоизоляционным заполнением, наружную плитную обшивку, ветрозащитную мембрану, вентиляционный зазор и наружную облицовку. Конфигурация исследуемой конструкции выбрана с учетом типовых решений, регламентируемых СП 31–105–2002 для энергоэффективных многоквартирных жилых домов с деревянным каркасом [13], что обеспечивает нормативную и практическую релевантность исследования применительно к отечественной практике малоэтажного строительства.

Состав исследуемой ограждающей конструкции

Таблица 1

Table 1

Composition of the investigated enclosing structure

№ слоя	Наименование слоя	Толщина, мм	Функция
1	Гипсокартон	12,5	Внутренняя облицовка
2	Пароизоляционная пленка	0,2	Ограничение пародиффузии
3	Деревянный каркас с утеплителем	150	Несущая и теплоизоляционная функция
4	Плитная обшивка OSB	12	Пространственная жесткость
5	Ветрозащитная мембрана	0,2	Защита от продувания и увлажнения
6	Вентиляционный зазор	40	Удаление влаги
7	Наружная облицовка	20	Защита от внешних воздействий

4.2. Контролируемые параметры и система мониторинга

Для мониторинга состояния конструкции были выбраны параметры, наиболее полно отражающие ее тепловлажностное и деформационное поведение

[1, 2, 4–7]: температура в характерных слоях конструкции; относительная влажность в замкнутых полостях; влагосодержание древесины элементов каркаса; локальные деформации в наиболее чувствительных зонах; параметры наружной и внутренней среды.

Состав встроенной системы мониторинга

Таблица 2

Table 2

Composition of the built-in monitoring system

Параметр	Тип датчика	Зона установки	Назначение
Температура	Цифровой термодатчик	По толщине стены, в узлах	Контроль теплового режима
Относительная влажность	Комбинированный T/RH-датчик	Полости конструкции	Оценка влагонакопления
Влагосодержание древесины	Резистивный датчик	Стойки, обвязки	Контроль состояния древесины
Деформации	Тензодатчик	Стойки, примыкания	Оценка механического поведения
Наружный климат	Метеодатчик	Внешняя среда	Формирование граничных условий
Внутренний климат	Комнатный T/RH-датчик	Помещение	Учет режима эксплуатации

4.3. Схема размещения датчиков

Размещение встроенных датчиков выполняется в локальных зонах с повышенной вероятностью влагона-

копления и деформационной нестабильности. К таким зонам отнесены нижняя обвязка, угловые соединения, оконные примыкания, узлы сопряжения стены и кровли,

а также холодная часть конструкции вблизи наружной плитной обшивки, что соответствует логике анализа наиболее уязвимых каркасных узлов, применяемых в отечественной практике проектирования и строительства [13].

Схема размещения встроенных датчиков по толщине конструкции представлена на рис. 1.

Распределение датчиков по наиболее уязвимым узлам каркасной конструкции показано на рис. 2.



Рис. 1. Схема размещения датчиков в поперечном сечении каркасной стены
Fig. 1. Layout of sensors in the cross-section of a frame wall

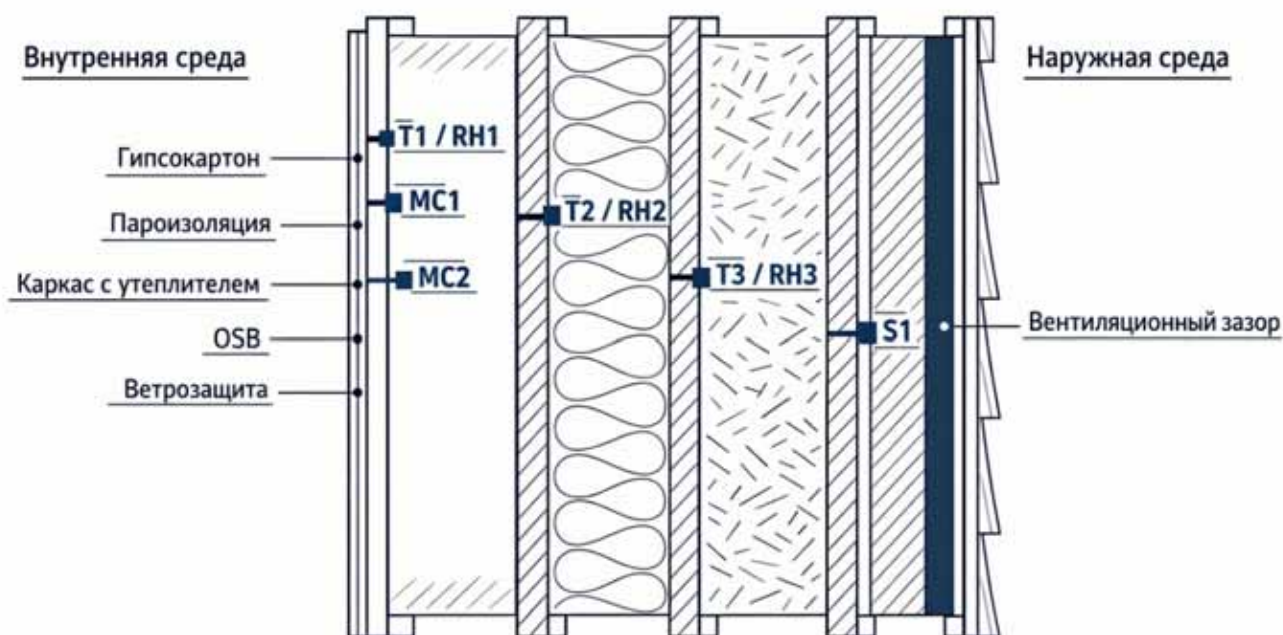


Рис. 2. Схема размещения датчиков в характерных узлах конструкции
Fig. 2. Layout of sensors in characteristic nodes of the structure

4.4. Экспериментальная установка

Лабораторный этап исследования предполагает использование опытной стеновой панели, установленной между двумя климатическими камерами, моделирующими условия наружной и внутренней среды.

Такая схема обеспечивает возможность воспроизведения управляемых режимов увлажнения, охлаждения, оттаивания и высушивания [4, 5].

Принципиальная схема лабораторной экспериментальной установки приведена на рис. 3.



Рис. 3. Схема лабораторной экспериментальной установки
Fig. 3. Diagram of the laboratory experimental setup

Таблица 3

Параметры лабораторной установки

Table 3

Parameters of the laboratory setup

Параметр	Значение
Размер панели	1,5 x 1,5 м
Общая толщина панели	около 235 мм
Температурные датчики	5–8
Датчики RH	4–6
Датчики влагосодержания древесины	3–5
Деформационные датчики	2–4
Частота регистрации	5–15 мин

4.5. Программа эксперимента

Программа исследования включает лабораторный и натурный этапы. На лабораторном этапе реализуются циклические климатические воздействия, на

натурном – длительный мониторинг пилотного объекта в течение отопительного сезона.

Организация натурального мониторинга пилотного каркасного объекта представлена на рис. 4.

Таблица 4

Программа лабораторных климатических режимов

Table 4

Laboratory climate regimes program

Этап	Режим	Температура наружной среды	Относительная влажность наружной среды	Продолжительность
1	Базовый зимний	-15 °С	80 %	48 ч
2	Увлажнение	-5 °С	95 %	24 ч
3	Оттепель	+2 °С	90 %	24 ч
4	Высушивание	+10 °С	50 %	48 ч
5	Повторный цикл	-10 °С	75 %	48 ч

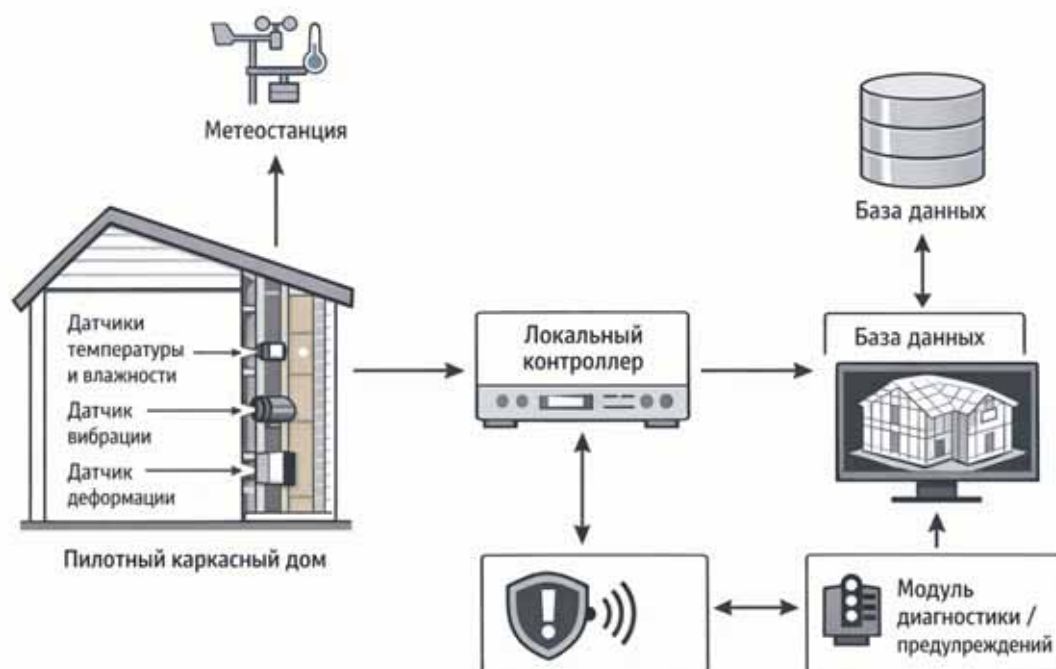


Рис. 4. Схема натурального мониторинга пилотного объекта
Fig. 4. Diagram of field monitoring of the pilot site

4.6. Структура цифрового двойника

Цифровой двойник включает геометрическое и материальное описание конструкции, тепловлажностную модель, модель влагосодержания древесины, механическую

модель деформаций, а также аналитический модуль сопоставления расчетных и измеренных параметров [8–10].

Архитектура цифрового двойника ограждающей конструкции показана на рис. 5.

Архитектура цифрового двойника ограждающей конструкции



Рис. 5. Архитектура цифрового двойника ограждающей конструкции
Fig. 5. Digital twin architecture of the enclosing structure

Таблица 5

Основные параметры цифрового двойника

Table 5

Main parameters of the digital twin

Группа параметров	Содержание
Геометрические	Толщины слоев, положение стоек, узлы
Теплотехнические	Теплопроводность, теплоемкость
Влагоперенос	Паропроницаемость, сорбционные характеристики
Начальные	Начальная влажность материалов
Механические	Модуль упругости, коэффициенты усушки
Эксплуатационные	Климатические и нагрузочные воздействия

4.7. Критерии валидации

Валидация цифрового двойника осуществляется по результатам сопоставления расчетных и измеренных временных рядов температуры, относительной влаж-

ности, влагосодержания древесины и деформаций. В качестве признаков адекватности рассматриваются совпадение трендов, амплитуд, экстремумов и отсутствие устойчивого систематического смещения [8–10].

Таблица 6

Критерии валидации цифрового двойника

Table 6

Criteria for digital twin validation

Параметр	Показатель сопоставления	Значение для оценки
Температура	Среднее абсолютное отклонение	Адекватность тепловой модели
RH	Среднее и пиковое отклонение	Адекватность модели влагонакопления
Влагосодержание древесины	Тренд и максимумы	Риск биоповреждения
Деформации	Амплитуда и знак	Адекватность механической модели
Переходные процессы	Совпадение экстремумов	Качество динамического описания
Устойчивое рассогласование	Локальное смещение	Возможный скрытый дефект

Результаты

5.1. Информативность зон контроля

Анализ схемы размещения сенсоров и физических механизмов влагонакопления показал, что наибольшую диагностическую значимость имеют локальные узлы, характеризующиеся неоднородностью

теплого поля и повышенной вероятностью нарушения герметичности. К таким зонам относятся нижняя обвязка, угловые соединения, оконные примыкания и узел сопряжения стены с кровлей [1, 2, 13].

Качественная карта риска влагонакопления в характерных узлах конструкции приведена на рисунке 6.

Риск накопления влаги в конструкции стены

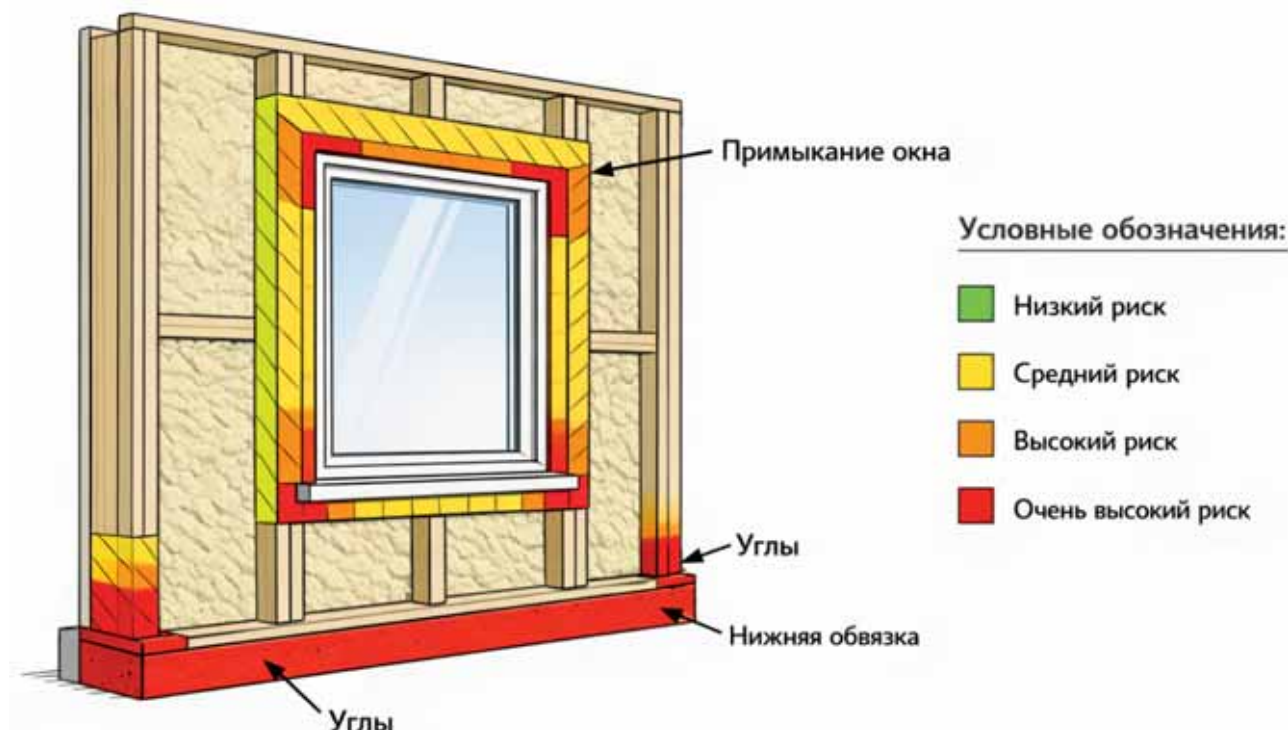


Рис. 6. Качественная карта риска влагонакопления в характерных узлах каркасной конструкции
Fig. 6. Qualitative moisture accumulation risk map at typical nodes of the frame structure

Таблица 7

Сравнительная информативность зон контроля

Table 7

Comparative informativeness of control zones

Зона	Чувствительность к увлажнению	Чувствительность к деформациям	Диагностическая значимость
Поле стены	Средняя	Низкая	Средняя
Нижняя обвязка	Высокая	Средняя	Высокая
Угловой узел	Высокая	Средняя	Высокая
Оконное примыкание	Высокая	Высокая	Очень высокая
Узел стена-кровля	Средняя	Высокая	Высокая

5.2. Поведение модели до и после калибровки

Установлено, что исходная расчетная модель достаточно хорошо воспроизводит температурный режим конструкции, однако без калибровки по сенсорным данным демонстрирует меньшую точность при описании влагосодержания древесины и деформационного отклика. После калибровки по данным встроенного мониторинга наблюдается повышение согласованности временных рядов и уменьшение систематических расхождений [8–10].

Таблица 8

Качественная оценка точности цифрового двойника

Table 8

Qualitative assessment of the digital twin accuracy

Параметр	До калибровки	После калибровки
Температура	Хорошая	Высокая
Относительная влажность	Удовлетворительная	Хорошая
Влагосодержание древесины	Низкая	Хорошая
Деформации	Низкая	Удовлетворительная / хорошая

Сопоставление расчетных и измеренных временных рядов температуры представлено на рис. 7.

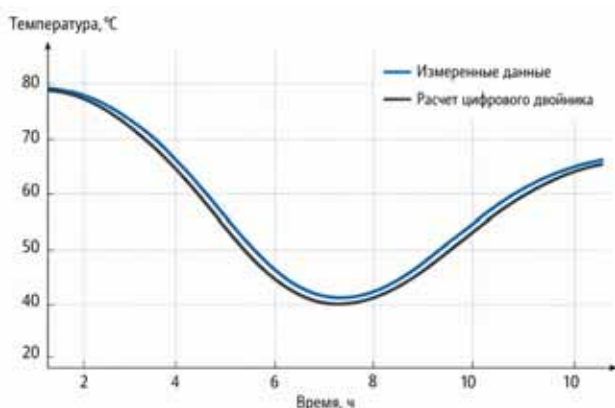


Рис. 7. Сопоставление расчетных и измеренных временных рядов температуры

Fig. 7. Comparison of calculated and measured temperature time series

Сопоставление расчетных и измеренных значений влагосодержания древесины приведено на рис. 8.

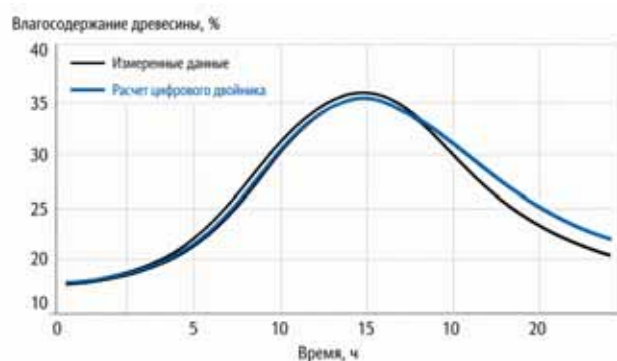


Рис. 8. Сопоставление расчетных и измеренных значений влагосодержания древесины

Fig. 8. Comparison of calculated and measured wood moisture content values

Результаты сравнения расчетных и измеренных деформаций показаны на рис. 9.

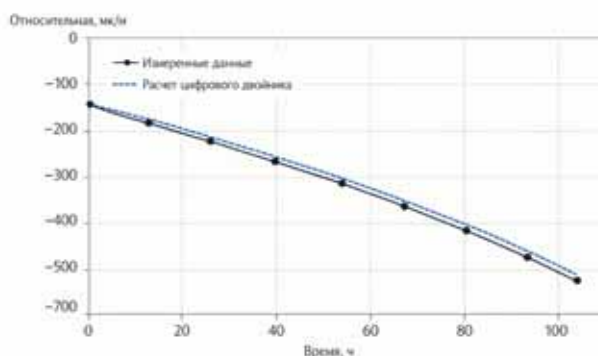


Рис. 9. Сопоставление расчетных и измеренных деформаций

Fig. 9. Comparison of calculated and measured deformations

5.3. Диагностическое значение рассогласования модели и измерений

В ходе исследования показано, что устойчивое локальное рассогласование между расчетными и измеренными параметрами может рассматриваться как индикатор скрытого дефекта, не учтенного базовой моделью. К числу вероятных причин такого рассогласования относятся локальная воздухопроницаемость,

дефекты пароизоляции, мостики холода, протечки и неоднородность свойств материалов [1, 2, 13].

Принцип выявления скрытого дефекта по рассогласованию модели и результатов мониторинга приведен на рис. 10.



Рис. 10. Принцип выявления скрытого дефекта по рассогласованию прогнозных и измеренных параметров
Fig. 10. Principle of detecting a hidden defect by the discrepancy between predicted and measured parameters

Обсуждение

Полученные результаты подтверждают, что встроенный мониторинг наиболее эффективен в тех случаях, когда он рассматривается не как автономная система сбора данных, а как источник информации для сопровождения и уточнения цифрового двойника. Совместное использование датчиков температуры, относительной влажности, влагосодержания древесины и деформаций позволяет существенно расширить диагностические возможности по сравнению с регистрацией только одного параметра.

Наибольшую практическую ценность представляет локализация сенсоров в критических узлах конструкции, где вероятность скрытого влагонакопления наиболее высока. Данный вывод имеет существенное значение для проектирования систем мониторинга: размещение датчиков должно определяться не равномерностью распределения по конструкции, а физической вероятности дефектов и зон риска.

Следует отметить, что действующая нормативная база, включая СП 31–105–2002 [13], достаточно подробно регламентирует вопросы проектирования и строительства энергоэффективных многоквартирных жилых домов с деревянным каркасом, однако практически не охватывает задачи цифровой валидации, встроенного мониторинга и предиктивной оценки технического состояния ограждающих конструкций. В этом отношении предложенный подход может рассматриваться как развитие нормативно ориентированного проектирования в сторону интеллектуально-сопровождения здания на этапе эксплуатации.

Вместе с тем необходимо учитывать ряд ограничений предлагаемого подхода. Результаты измерений имеют локальный характер, стабильность показаний датчиков в длительном интервале времени требует контроля, а сама валидация цифрового двойника

возможна только при наличии достаточно продолжительных временных рядов, охватывающих разные эксплуатационные режимы.

Научная новизна

Научная новизна исследования заключается в разработке комплексного подхода к мониторингу состояния каркасных ограждающих конструкций, объединяющего встроенные датчики влажности, температуры и деформации с цифровым двойником; в предложении методики валидации цифрового двойника по данным длительного сенсорного мониторинга; в обосновании наиболее информативных зон установки датчиков; а также в установлении возможности использования устойчивого рассогласования модели и измерений как диагностического признака скрытого дефекта.

Практическая значимость

Практическая значимость работы состоит в возможности применения разработанной методики для раннего выявления скрытого увлажнения, прогнозирования деформационного поведения древесных элементов, повышения достоверности эксплуатационной диагностики каркасных домов, внедрения систем предиктивного обслуживания зданий и совершенствования проектных решений при строительстве энергоэффективных каркасных объектов. Практическая применимость предложенного подхода определяется также возможностью его использования в отношении конструктивных решений, выполняемых в соответствии с СП 31–105–2002 [13], что делает результаты исследования релевантными для широкой группы объектов отечественного малоэтажного каркасного домостроения.

Выводы

1. Разработана методика мониторинга состояния ограждающих конструкций каркасных домов на основе встроенных датчиков температуры, относительной влажности, влагосодержания древесины и деформаций.
2. Предложена структура цифрового двойника, включающая геометрическую, тепловлажностную и механическую подсистемы, интегрированные с данными мониторинга.
3. Установлено, что наиболее информативными зонами контроля являются нижняя обвязка, угловые соединения, оконные примыкания и узлы сопряжения стены с кровлей.
4. Показано, что калибровка цифрового двойника по данным встроенных датчиков повышает точность описания влажностного и деформационного состояния конструкции.
5. Обоснована возможность использования устойчивого рассогласования между расчетом и измерением как индикатора скрытого дефекта.
6. Показана применимость разработанного подхода к каркасным ограждающим конструкциям, соответствующим типовым решениям, регламентируемым СП 31–105–2002 [13].

Список литературы

1. Кудрявцев А.Н., Ливчак В.И. Строительная теплофизика ограждающих конструкций. Москва: АСВ. 2010. 432 с.
2. Гагарин В.Г., Козлов В.В. Тепловлажностный режим ограждающих конструкций зданий. Москва: Издательство АСВ. 2005. 320 с.
3. Тамразян А.Г. Мониторинг технического состояния строительных конструкций и зданий. Москва: МГСУ. 2012. 256 с.
4. Hagentoft C.E. Introduction to Building Physics. Lund: Studentlitteratur. 2001. 320 p.
5. Künzeli H.M. Simultaneous Heat and Moisture Transport in Building Components: One- and Two-Dimensional Calculation Using Simple Parameters. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag. 1995. 110 p.
6. Straube J., Burnett E. Building Science for Building Enclosures. Westford: Building Science Press. 2005. 608 p.
7. Glass S.V., Zelinka S.L. Moisture Relations and Physical Properties of Wood. Wood Handbook: Wood as an Engineering Material. Madison: USDA Forest Service, Forest Products Laboratory. 2010, pp. 4.1–4.19.
8. Grieves M., Vickers J. Digital Twin: Mitigating Unpredictable, Undesirable Emergent Behavior in Complex Systems. Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems. Cham: Springer, 2017, pp. 85–113. https://doi.org/10.1007/978-3-319-38756-7_4
9. O'Donnell J., Narayanan S., Ahuja A. Model Calibration and Inverse Modeling in Building Performance Studies. Building Performance Simulation for Design and Operation / ed. by J. Hensen, R. Lamberts. London: Spon Press, 2011, pp. 421–460.
10. Dong B., Wang C. Digital Twins for Built Environment Applications. *Buildings*, 2021, vol. 11, no. 2, article 63. <https://doi.org/10.3390/buildings11020063>
11. EN ISO 13788. Hygrothermal Performance of Building Components and Building Elements – Internal Surface Temperature to Avoid Critical Surface Humidity and Interstitial Condensation – Calculation Methods. Brussels: CEN, 2012.
12. ISO 15686–1. Buildings and Constructed Assets – Service Life Planning – Part 1: General Principles and Framework. Geneva: ISO, 2011.
13. СП 31–105–2002. Проектирование и строительство энергоэффективных одноквартирных жилых домов с деревянным каркасом. Москва: Госстрой России, 2002.
2. Gagarin V.G., Kozlov V.V. Heat and moisture regime of building enclosing structures. Moscow: ASV Publishing House, 2005, 320 p.
3. Tamrazyan A.G. Monitoring of the technical condition of building structures and buildings. Moscow: MGSU, 2012, 256 p.
4. Hagentoft C.E. Introduction to Building Physics. Lund: Studentlitteratur. 2001. 320 p.
5. Künzeli H.M. Simultaneous Heat and Moisture Transport in Building Components: One- and Two-Dimensional Calculation Using Simple Parameters. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag. 1995. 110 p.
6. Straube J., Burnett E. Building Science for Building Enclosures. Westford: Building Science Press. 2005. 608 p.
7. Glass S.V., Zelinka S.L. Moisture Relations and Physical Properties of Wood. Wood Handbook: Wood as an Engineering Material. Madison: USDA Forest Service, Forest Products Laboratory. 2010, pp. 4.1–4.19.
8. Grieves M., Vickers J. Digital Twin: Mitigating Unpredictable, Undesirable Emergent Behavior in Complex Systems. Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems. Cham: Springer, 2017, pp. 85–113. https://doi.org/10.1007/978-3-319-38756-7_4
9. O'Donnell J., Narayanan S., Ahuja A. Model Calibration and Inverse Modeling in Building Performance Studies. Building Performance Simulation for Design and Operation / ed. by J. Hensen, R. Lamberts. London: Spon Press, 2011, pp. 421–460.
10. Dong B., Wang C. Digital Twins for Built Environment Applications. *Buildings*, 2021, vol. 11, no. 2, article 63. <https://doi.org/10.3390/buildings11020063>
11. EN ISO 13788. Hygrothermal Performance of Building Components and Building Elements – Internal Surface Temperature to Avoid Critical Surface Humidity and Interstitial Condensation – Calculation Methods. Brussels: CEN, 2012.
12. ISO 15686–1. Buildings and Constructed Assets – Service Life Planning – Part 1: General Principles and Framework. Geneva: ISO, 2011.
13. SP 31–105–2002. (2002). Design and construction of energy-efficient single-family residential buildings with a wooden frame. Moscow: Gosstroy of Russia.

Информация об авторе /
Information about the author

Сергей Олегович Евдокименко, независимый исследователь. Москва, Россия
 evdokimenko.s.o@mail.ru
Sergey O. Evdokimenko, independent researcher. Moscow, Russia
 evdokimenko.s.o@mail.ru

References

1. Kudryavtsev A.N., Livchak V.I. Building thermal physics of enclosing structures. Moscow: ASV, 2010, 432 p.