

Academia. Архитектура и строительство, № 3, стр. 140–145.
Academia. Architecture and Construction, no. 3, pp. 140–145.

Исследования и теория
Научная статья
УДК 51-7
DOI: 10.22337/2077-9038-2025-3-140-145

Синергия численных методов и интеллектуальных технологий в диагностике строительных объектов

Кашеварова Галина Геннадьевна (Пермь). Доктор технических наук, профессор, член-корреспондент РААСН. Пермский национальный исследовательский политехнический университет (Россия, 614990, Пермь, Комсомольский проспект, 29. ПНИПУ).
Эл. почта: ggkash@mail.ru

Аннотация. Цель данной работы – показать возможности и перспективы применения интеллектуальных технологий совместно с численными методами в диагностике строительных объектов с учётом их реального состояния. В настоящее время для ускорения расчётов, повышения точности и оптимизации процессов моделирования в современные программные МКЭ-комплексы всё чаще включается искусственный интеллект, а именно: машинное обучение, нейронные сети, нечёткая логика, генетические алгоритмы. Интеграция метода конечных элементов и искусственного интеллекта трансформирует инженерный анализ, делая проектирование более инновационным и эффективным, сокращая время разработки и повышая точность результатов, и уже реализована в некоторых программных комплексах. В статье рассмотрены примеры, как синергия интеллектуальных технологий (ИТ) и численных методов (ЧМ) применяется на практике.

Ключевые слова: диагностика, строительство, искусственный интеллект, численные методы, синергия

Для цитирования. Кашеварова Г.Г. Синергия численных методов и интеллектуальных технологий в диагностике строительных объектов // Academia. Архитектура и строительство. – 2025. – № 3. – С. 140–145. – DOI: 10.22337/2077-9038-2025-3-140-145.

Synergy of Numerical Methods and Intelligent Technologies in Diagnostics of Construction Sites

Kashevarova Galina G. (Perm). Doctor of Sciences in Technology, Professor, Corresponding Member of RAACS. The Perm National Research Polytechnic University (Russia, 614990, Perm, Komsomolsky prospekt, 29. PNRPU). E-mail: ggkash@mail.ru

Abstract. The purpose of this work is to show the possibilities and prospects of using intelligent technologies together with numerical methods in diagnostics of construction objects, taking into account their real state. Currently, artificial intelligence is increasingly included in modern FEM software packages to speed up calculations, improve accuracy and optimize modeling processes, namely: machine learning, neural networks, fuzzy logic, genetic algorithms. The integration of the finite element method and artificial intelligence transforms engineering analysis, making design more innovative and efficient, reducing development time and increasing the accuracy of results and has already been implemented in some software packages. Examples of how the synergy of intelligent technologies (IT) and numerical methods (NM) is applied in practice are considered.

Keywords: diagnostics, construction, artificial intelligence, numerical methods, synergy

For citation. Kashevarova G.G. Synergy of Numerical Methods and Intelligent Technologies in Diagnostics of Construction Sites. In: Academia. Architecture and Construction, 2025, no. 3, pp. 140–145, doi: 10.22337/2077-9038-2025-3-140-145.

Введение

Диагностика технического состояния строительных объектов, включающая: мониторинг конструкционной безопасности здания (сооружения), принятие решений о возможности реконструкции, капитальном ремонте или сносе конкретного сооружения, регламентируются действующим в Российской Федерации и ряде стран ближнего зарубежья межгосударственным стандартом¹. Традиционная практика принятия решений о техническом состоянии строительного объекта основана на инженерных суждениях, личных интерпретациях, интуиции опытных инженеров (часто одного), способных эффективно действовать в нестандартных ситуациях и принимать правильные решения [1]. Человек способен принимать решения в условиях неопределённости, но он плохо справляется с большими объёмами «сырой» необработанной информации, и ему для принятия верного решения необходима адекватная (полная и достоверная) информация.

Важной частью диагностики строительных объектов являются поверочные расчёты несущей способности конструкций с учётом их реального состояния, то есть с учётом наличия дефектов, трещин, изменения свойств материалов. С математической точки зрения расчет НДС конструкции сводится к решению краевой задачи, а именно – системы дифференциальных уравнений, включающей уравнения равновесия, уравнения совместности деформаций, физические уравнения (связь между напряжениями и деформациями) и краевые условия.

Для расчётов сложных строительных объектов обычно используются численные методы и современные программные комплексы. Метод конечных элементов (МКЭ) является основным инструментом для инженерного анализа, позволяющим моделировать процессы, которые невозможно изучить экспериментально. МКЭ использует дискретизацию области на конечные элементы, вариационный подход, аппроксимацию решения с помощью базисных функций (полиномов) и решение системы алгебраических уравнений (чаще всего линейных). Точность решения в большой степени зависит от сложности геометрии объекта, физической нелинейности моделей, качества сетки разбиения исходной области на конечные элементы. При этом предъявляются специальные требования к выбору аппроксимирующих (базисных) функций и решается один экземпляр уравнений.

В настоящее время для ускорения расчётов, повышения точности и оптимизации процессов моделирования в современные программные МКЭ-комплексы всё чаще включается искусственный интеллект, а именно: машинное обучение, нейронные сети, нечёткая логика, генетические алгоритмы [2–8]. Эта интеграция позволяет повысить точность результатов, оптимизировать ресурсы, сократить сроки реализации проектов и минимизировать риски.

Искусственный интеллект (ИИ) – это интеллектуальный помощник специалиста-практика, извлекающий из памяти ЭВМ необходимые знания для решения конкретных задач, который превосходит возможности человека по скорости и объёму обработки информации. Технология ИИ позволяет давать строгое математическое описание расплывчатых утверждений эксперта, реализуя попытку преодолеть лингвистический барьер между человеком, суждения и оценки которого являются приближенными и нечёткими, и компьютером, который может выполнять только чёткие инструкции.

Внедрение интеллектуальных технологий в экспертную деятельность инженера-строителя мотивировано необходимостью передачи знаний опытных экспертов специалистам разной квалификации для расширения и укрепления их профессиональных возможностей [9–11].

Ключевые компоненты синергии численных методов и интеллектуальных технологий

Численные методы (МКЭ, МКР) дают возможность:

- моделировать физические процессы: деформации, нагрузки, тепловые и динамические воздействия на конструкции;
- обрабатывать данные измерений, используя численные алгоритмы для интерпретации данных с датчиков (например, вибрации, температуры, деформации), преобразовывая их в количественные показатели состояния объекта;
- оптимизировать расчёты, упрощая сложные уравнения для анализа устойчивости, прочности и долговечности.

Интеллектуальные технологии используют:

- машинное обучение (МО), а именно: алгоритмы нейросети, которые обучаются на исторических данных и результатах численного моделирования для прогнозирования дефектов, таких как трещины, коррозия или усталость материалов;
- компьютерное зрение (КЗ), которое анализирует изображения и видео с дронов или камер для автоматического обнаружения визуальных дефектов;
- сети устройств с датчиками (IoT), которые собирают данные в режиме реального времени, интегрируются с численными моделями для оперативного мониторинга;
- цифровых двойников, а именно создание виртуальных копий объектов, где численные методы обеспечивают физическую достоверность, а ИИ адаптирует модель под изменяющиеся условия.

ИИ также может оптимизировать процессы или ресурсы в МКЭ, например, автоматически создавая сетки, предсказывая оптимальные размеры элементов или предлагая схемы усиления конструкций с минимальными затратами материалов.

Синергия МКЭ и ИИ в современных программных комплексах

В настоящее время интеграция метода конечных элементов (МКЭ) и искусственного интеллекта (ИИ) уже реализована в разных программных комплексах. Рассмотрим некоторые

¹ГОСТ 31937-2011. Здания и сооружения. Правила обследования и мониторинга технического состояния (<https://internet-law.ru/gosts/gost/54142/>).

из них и ключевые аспекты их взаимодействия для усиления возможностей МКЭ через ИИ.

Интеграция МКЭ и ИИ в современных программных комплексах трансформирует инженерный анализ, делая проектирование более инновационным и эффективным, сокращая время разработки и повышая точность.

Рассмотрим некоторые примеры того, как синергия интеллектуальных технологий (ИТ) и численных методов (ЧМ) применяется на практике при диагностике строительных объектов, давая результат, превосходящий применение каждого подхода в отдельности. При этом важно подчеркнуть моменты, где ИТ компенсируют слабости численных

Программа	Синергия МКЭ и ИИ
ANSYS 2024 R1 интегрирует ИИ для ускорения инженерных процессов, повышения точности прогнозирования и упрощения сложных задач	• ИИ (нейронные сети) могут автоматически генерировать оптимальные сетки для МКЭ, сокращая время подготовки моделей. Алгоритмы ИИ анализируют модель и автоматически настраивают плотность сетки в зонах высоких градиентов (напряжений, температуры), минимизируя ошибки. • Алгоритмы МО (кластеризация, классификация) автоматически обнаруживают критические зоны (трещины, перегрев) в результатах, а ИИ прогнозирует усталость, износ конструкций на основе исторических данных. • ИИ предлагает оптимальные формы деталей, удовлетворяющие условиям прочности и веса, а также оптимальные параметры (толщина материала, форма ребер) с минимальным числом итераций МКЭ
LS DYNA фокусируется на ускорении ресурсоёмких расчётов, оптимизации моделей и замене сложных физических моделей нейросетевыми аналогами	• Синергия МКЭ и ИИ проявляется в ускорении расчётов, автоматизации рутинных операций и повышении точности моделей для предсказания критических сценариев и генерации цифровых двойников. Например, ИИ способен предсказывать точки контакта или зоны пластичности, что особенно важно для задач удара и взрыва. • ИИ анализирует риски (например, землетрясения, ветровые нагрузки и корректирует МКЭ-модели для оценки уязвимости. • ИИ может: классифицировать данные (например, выделять зоны разрушения), автоматически настраивать параметры материала на основе экспериментальных данных, генерировать отчёты с прогнозами на основе исторических данных, улучшая точность МКЭ-расчётов.
COMSOL Multiphysics не имеет встроенных модулей ИИ (нейросетей или МО). Но ИИ-компоненты могут интегрироваться для расширения возможностей	• МКЭ здесь используется для решения задач механики, теплопередачи и др. мультифизических явлений, а ИИ открывает новые возможности для улучшения точности, скорости и автоматизации моделирования через связку с MATLAB/Python. • Генетические алгоритмы оптимизируют структуру материала, а МКЭ проверяет её на прочность. • Нейросеть предсказывает зоны перегрева, а COMSOL уточняет распределение тепла с помощью МКЭ. • Алгоритмы МО выявляют скрытые зависимости в больших наборах данных, помогая в оптимизации конструкций.
ALTAIR Здесь ИИ не «надстройкой», а ядро платформы, интегрированное для ускорения инженерных расчётов, оптимизации дизайна и управления данными.	• Эта программа используется для автоматизации инженерного анализа и активно развивает интеграцию МКЭ и ИИ. • Используя алгоритмы машинного обучения (МО) для топологической оптимизации и снижения веса конструкции, ИИ предсказывает оптимальное распределение материала, а МКЭ проверяет механические свойства • Алгоритмы ИИ анализируют результаты МКЭ (например, градиенты напряжений) и автоматически корректируют сетку, минимизируя ошибки и время расчётов. • ИИ использует данные о материалах для анализа и прогноза их поведения при циклических нагрузках.
AUTODESK FUSION 360 Autodesk активно интегрирует ИИ в Fusion 360 для автоматизации рутинных задач, оптимизации проектирования и улучшения производственных процессов	• Это облачная платформа, объединяющая CAD, CAM и CAE, включая инструменты для МКЭ, открывает новые возможности для оптимизации проектирования, ускорения расчётов и улучшения точности моделей даже для сложных мультифизических задач. • Облачная интеграция позволяет использовать мощные вычислительные ресурсы, заменяя ручные настройки автоматизированными ИИ-алгоритмами и сокращая время разработки расчетной модели. • Для повышения точности ИИ корректирует сетку МКЭ на основе анализа градиентов напряжений, улучшая достоверность результатов

методов, а физические модели – ограничения МО (объяснимость прогнозов).

Пример 1. Обследование высотных зданий и фасадов

Проблема: обнаружение трещин, сколов, коррозии, отслоения облицовки, теплопотерь на большой высоте (рис. 1) (оперативность и безопасность).

Для решения проблемы используются следующие способы.

1. Беспилотники + компьютерное зрение (КЗ)²: дрон с камерами высокого разрешения и тепловизором автоматически сканирует фасад по заданному маршруту. Алгоритмы КЗ в реальном времени анализируют изображения:

- обнаруживают и классифицируют трещины (размер, тип), сколы, коррозию арматуры;
- выявляют области аномальных теплопотерь (тепловые мосты, дефекты утепления);
- обнаруживают вздутия и отслоения облицовки.

2. Фотограмметрия – одно из направлений 3D-сканирования, основанное на получении данных о размерах и поверхностях реальных объектов за счёт фотоснимков (ИТ): создается высокоточная 3D-модель (цифровой двойник) фасада или всего здания.

3. Метод конечных элементов (ЧМ): создаётся модель секции фасада или несущей конструкции (например, колонны или плиты с трещиной).

4. Интерпретация и прогноз (Синергия):

- данные о размере и расположении трещин от КЗ используются как входные параметры в МКЭ-модель для расчёта реальных напряжений в конструкции и оценки влияния дефекта на несущую способность;
- тепловизионные данные коррелируются с МКЭ-моделями теплопередачи здания для количественной оценки потерь энергии и разработки точечных решений по утеплению;
- обнаруженные отслоения анализируются на МКЭ-моделях для оценки риска разрушения элементов.

Результат: быстрое, безопасное и комплексное обследование, количественная оценка серьёзности дефектов, определения приоритета ремонтных работ.

Пример 2. Оценка повреждений после стихийных бедствий (землетрясения, ураганы)

Проблема: быстрая безопасная оценка масштабов повреждений, определение аварийности зданий, приоритет спасательных работ.

Решение проблемы, для которой используются следующие способы.

1. Беспилотники + фотограмметрия (ИТ): оперативно создают детальные 3D-модели (цифровые двойники) повреждённых объектов.

2. Компьютерное зрение (ИТ): автоматически анализирует аэрофотоснимки для классификации степени повреждений зданий (например, по шкалам ATC-20/FEMA), обнаружения завалов, разрушенных мостов.

3. Метод конечных элементов (ЧМ): быстро моделирует типовые конструкции (каркасных зданий, мостовых опор) под воздействием сейсмических сил или ветровых нагрузок.

4. Синергия:

- результаты КЗ-классификации повреждений сопоставляются с библиотекой предварительно рассчитанных МКЭ-моделей для аналогичных конструкций. Это позволяет понять механизм разрушения и оценить остаточную несущую способность;
- точные 3D-модели от LiDAR³ используются для создания/обновления МКЭ-моделей критически важных объектов (больницы, мосты) для детального анализа устойчивости и принятия решений о сносе/усилении;
- алгоритмы МО анализируют совокупность данных (КЗ-оценка + геоданные + данные о силе воздействия) для прогнозирования устойчивости соседних зданий и оптимизации маршрутов спасателей.

Результат: Ускорение процесса оценки, повышение её объективности и точности, спасение жизней за счёт быстрого выявления аварийных зон, эффективное планирование восстановительных работ.

* * *

Во всех случаях численные методы предоставляют физическую основу, глубокое понимание механизмов работы

² Технология распознавания и обработки изображения с помощью компьютера, включающая системы контроля процессов и системы видеонаблюдения.
³ LiDAR – это мощная технология для получения точных трёхмерных данных об окружающем мире с помощью лазерного излучения. Его применение стремительно расширяется – от автономных автомобилей и картографии до смартфонов и роботов.



Рис. 1. Примеры дефектов на фасадах кирпичных зданий. Фото автора статьи



Рис. 2. Тайвань после землетрясения 7 февраля 2018 года. Фото из открытого доступа сети Интернет

конструкций и возможность прогнозирования поведения строительных объектов, а интеллектуальные технологии обеспечивают автоматизированный сбор, первичную обработку и анализ больших массивов актуальных данных о состоянии объекта, позволяя делать обоснованные инженерные выводы и прогнозы. Это создает замкнутый цикл интеллектуальной диагностики и прогнозирования.

Список источников

1. Гроздов, В.Т. Признаки аварийного состояния несущих конструкций зданий и сооружений / В.Т. Гроздов. – Санкт-Петербург : Издательский Дом KN+, 2000. – 39 с. – Текст : непосредственный.
2. Горбаченко, В.И. Нейросетевая реализация метода конечных элементов / В.И. Горбаченко, Ю.Н. Земскова. – Текст : непосредственный // Известия Пензенского государственного педагогического университета им. В.Г. Белинского. Физико-математические и технические науки. – 2008. – № 8 (12). – С. 98–103.
3. Горбаченко, В.И. Обучение радиально-базисных нейронных сетей при решении дифференциальных уравнений в частных производных / В.И. Горбаченко, Е.В. Артюхина. – Текст : непосредственный // Нейрокомпьютеры: разработка, применение. – 2007. – № 9. – С. 150–159.
4. Вершинин, В.Е. Применение методов нейросетевого моделирования при решении начально-краевых задач для дифференциальных уравнений в частных производных / В.Е. Вершинин, Р.Ю. Пономарёв. – Текст : электронный // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. – 2023. – Том 9, № 3 (35), С. 132–147. – URL: https://elib.utmn.ru/jspui/bitstream/ru-tsu/31921/1/fizmat_2023_3_132_147.pdf (дата обращения 02.08.2025).
5. Васильев, А.Н. Нейросетевой подход к задачам математической физики / А.Н. Васильев, Д.А. Тархов, Т.А. Шемякина. – Санкт-Петербург : Нестор-История, 2015. – 260 с. – Текст : электронный.
6. Коваленко, А.Н. О применении нейронных сетей для решения дифференциальных уравнений в частных производных / А.Н. Коваленко, А.А. Черноморец, М.А. Петина. – Текст : непосредственный // Научные ведомости Белгородского государственного университета. Серия: Экономика. Информатика. – 2017. – № 9 (258). – С. 103–110.
7. Machine Learning of Linear Differential Equations Using Gaussian Processes / M. Raissi, P. Perdikaris, G.E. Karniadakis. – Текст : электронный // Journal of Computational Physics. – 2017. – Vol. 348. – P. 683–693. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jcp.2017.07.050> (дата обращения 02.08.2025).
8. Рутковская, Д. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечёткие системы / Рутковская Д., Пилиньский М., Рутковский Л. ; пер. с польского. – Москва : Горячая линия-Телеком, 2008. – 383 с. – Текст : непосредственный.

9. Кашеварова, Г.Г. «Искусственный интеллект», или «логические рассуждения и разумные решения» в технической диагностике объектов строительства / Г.Г. Кашеварова. – DOI: 10.22337/2077-9038-2023-4-166-180. – Текст : непосредственный // Academia. Архитектура и строительство. – 2023. – No 4. – С. 166–180. –

10. Ясницкий, Л.Н. Введение в искусственный интеллект / Л.Н. Ясницкий. – Москва : Академия, 2005. – 176 с. – Текст : непосредственный.

11. Хайкин, С. Нейронные сети / С. Хайкин. – Москва ; Санкт-Петербург : Диалектика. 2019. – 1103 с. – Текст : непосредственный.

References

1. Grozdov V.T. Priznaki avariinogo sostoyaniya nesushchikh konstrukttsii zdaniy i sooruzhenii [Signs of an Emergency Condition of Load-Bearing Structures of Buildings and Structures]. St. Petersburg, Izdatel'skii Dom KN+ [Publishing House KN +], 2000, 39 p. (In Russ.)
2. Gorbachenko V.I., Zemskova Yu.N. Neirosetevaya realizatsiya metoda konechnykh elementov [Neural network implementation of the finite element method]. In: *Izvestiya PGPU Fiziko-matematicheskie i tekhnicheskie nauki* [Bulletin of the Penza State Pedagogical University Named after V.G. Belinsky. Physical, Mathematical and Technical Sciences], 2008, no. 8 (12), pp. 98–103. (In Russ.)
3. Gorbachenko V.I., Artyukhina E. V. Obuchenie radial'no-bazisnykh neironnykh setei pri reshenii differentsial'nykh uravnenii v chastnykh proizvodnykh [Training of radial-basis neural networks in solving partial differential equations]. In: *Neirokomp'yutery: razrabotka, primeneniye* [Neurocomputers: Development, Application], 2007, no. 9, pp. 150–159. (In Russ.)
4. Vershinin V.E., Ponomarev R.Yu. Primeneniye metodov neirosetevogo modelirovaniya pri reshenii nachal'no-kraevykh zadach dlya differentsial'nykh uravnenii v chastnykh proizvodnykh [Application of Neural Network Modeling Methods in Solving initial Boundary Value Problems for Partial Differential Equations]. In: *Vestnik Tyumenskogo gosudarstvennogo universiteta. Fiziko-matematicheskoe modelirovanie. Neft', gaz, energetika* [Tyumen State University Herald. Physical and Mathematical Modeling. Oil, Gas, Energy], 2023, Vol. 9, no. 3 (35), pp. 132–147. (In Russ., abstr. in Engl.)
5. Vasil'ev A.N., Tarkhov D.A., Shemyakina T.A. 2015. Neirosetevoi podkhod k zadacham matematicheskoi fiziki [Neural Network Approach to Problems of Mathematical Physics]. St. Petersburg, Nestor-Istoriya Publ., 2015, 260 p. (In Russ.)
6. Kovalenko A. N., Chernomorets A. A., Petina M. A. O primeneniі neironnykh setei dlya resheniya differentsial'nykh uravnenii v chastnykh proizvodnykh [ON The Neural Networks Application for Solving of Partial Differential Equations]. In: *Nauchnye vedomosti Belgorodskogo gosudarstvennogo*

universiteta. Seriya: Ekonomika. Informatika [Belgorod State University. Scientific Bulletin. Series: Economics. Information Technologies], 2017, no. 9 (258), pp. 103–110. (In Russ., abstr. in Engl.)

7. Raissi M., Perdikaris P., Karniadakis G. E. 2017. Machine Learning of Linear Differential Equations Using Gaussian Processes. In: *Journal of Computational Physics*, 2017, Vol. 348, pp. 683–693. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jcp.2017.07.050> (дата обращения 02.08.2025) (In Engl.).

8. Rutkovskaya D., Pilin'skii M., Rutkovskii L. Neironnye seti, geneticheskie algoritmy i nechetkie sistemy [Neural networks, genetic algorithms and fuzzy systems], trans. from Polish. Moscow, Goryachayaliniya – Telekom Publ., 2008, S. 383 p. (In Russ.)

9. Kashevarova G.G. «Iskusstvennyi intellekt», ili «logicheskie rassuzhdeniya i razumnye resheniya» v tekhnicheskoi diagnostike ob"ektov stroitel'stva ["Artificial Intelligence" or "Logical Discussion and Reasonable Solutions" in Technical Diagnostics of Construction Projects]. In: *Academia. Arkhitektura i stroitel'stvo* [Academia. Architecture and Construction], 2023, no. 4, pp. 166–180. – DOI: 10.22337/2077-9038-2023-4-166-180.

10. Yasnitskii L.N. Vvedenie v iskusstvennyi intellekt [Introduction to Artificial Intelligence]. Moscow, Akademia Publ., 2005, 176 p. (In Russ.)

11. Khaikin S. Neironnye seti [Neural Networks]. Moscow ; St. Petersburg, Dialektika Publ., 2019, 1103 p. (In Russ.)