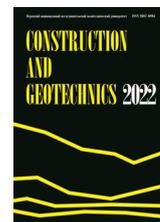




CONSTRUCTION AND GEOTECHNICS

Т. 15, № 1, 2024

<http://vestnik.pstu.ru/arhit/about/inf/>



DOI: 10.15593/2224-9826/2024.1.02

УДК 624.04 + 004.94

ПРОГРАММНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ КАК СРЕДСТВО ПОВЫШЕНИЯ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И ОПТИМИЗАЦИИ КОНСТРУКЦИЙ В ОБЛАСТИ СТРОИТЕЛЬНОЙ МЕХАНИКИ

И.А. Пушкарев, Э.М. Мусина, А.А. Тратканова

Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова,
Ижевск, Российская Федерация

О СТАТЬЕ

Получена: 02 декабря 2023
Одобрена: 23 января 2024
Принята к публикации:
05 февраля 2024

Ключевые слова:

строительная механика,
программные технологии, анализ
конечных элементов,
искусственный интеллект.

АННОТАЦИЯ

В настоящее время проекты в области строительства все более усложняются и модернизируются, приобретая новые стандарты качества, что обусловлено ростом отрасли и применением новых информационных технологий. Удовлетворить современные требования, включая обеспечение надежности и безопасности, становится возможным благодаря использованию новейших программных инструментов для осуществления таких процессов, как моделирование и оптимизация конструкций. Программные продукты дают возможность инженерам и архитекторам проектировать инновационные конструкции, отвечающие последним конструкционным требованиям надежности, безопасности, а также экономической эффективности.

Новые технологии и методы анализа позволяют проводить более детальное моделирование поведения конструкций с учетом разнообразных условий эксплуатации. Генетические алгоритмы и искусственный интеллект становятся ключевыми инструментами для оптимизации конструкций с использованием методов строительной механики.

Исследования в области проектирования конструкций играют немаловажную роль, содействуя развитию строительной механики в целом, учитывая надежность, безопасность проектов, развитию индустрии и соблюдению стандартов качества. Программные технологии являются неотъемлемой частью современной строительной механики, предоставляя инженерам мощные средства для анализа и расчета строительных конструкций.

Преимущество программных технологий заключается в повышении производительности, снижении количества ошибок и коллизий. Современные информационные технологии позволяют инженерам повышать качество расчетного обоснования проектных решений, снижать материалоемкость строительного объекта, снижать сроки проектов и затраты на них.

В работе рассмотрен метод конечных элементов, представлен обзор программ компьютерного моделирования, разработанных для расчета и проектирования конструкций в сфере строительной механики. Продемонстрированы результаты исследования по использованию генетических алгоритмов и искусственного интеллекта и приведены особенности работы данных технологий.

© Пушкарев Иван Андреевич – кандидат технических наук, доцент, e-mail: pia10no@mail.ru.

Мусина Эльвира Маратовна – магистрант, e-mail: nabieyeva_elvira@inbox.ru.

Тратканова Алина Александровна – магистрант, e-mail: Alina16011999@mail.ru.

Ivan A. Puschkarev – Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor, e-mail: pia10no@mail.ru.

Elvira M. Musina – Master's Student, e-mail: nabieyeva_elvira@inbox.ru.

Alina A. Tratkanova – Master's Student, e-mail: Alina16011999@mail.ru.



Эта статья доступна в соответствии с условиями лицензии Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)

SOFTWARE TECHNOLOGIES AS A MEANS OF INCREASING THE PRODUCTIVITY OF DESIGN AND OPTIMIZATION OF STRUCTURES IN THE FIELD OF STRUCTURAL MECHANICS

I.A. Pushkarev, E.M. Musina, A.A. Tratkanova

Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk, Russian Federation

ARTICLE INFO

Received: 02 December 2023
Approved: 23 January 2024
Accepted for publication:
05 February 2024

Keywords:

construction mechanics, software technologies, finite element analysis, artificial intelligence.

ABSTRACT

Currently construction projects are becoming more complex and modernized, acquiring new quality standards which is due to the growth of the industry and the use of new information technologies. Meeting modern requirements including ensuring reliability and safety is possible through the use of the latest software tools for processes such as modeling and optimization of structures. Software products enable engineers and architects to design innovative designs that meet the latest design requirements for reliability, safety and cost-effectiveness.

New technologies and analysis methods allow for more detailed modeling of structural behavior taking into account a variety of operating conditions. Genetic algorithms and artificial intelligence are becoming key tools for optimizing structures using structural mechanics methods.

Research in the field of structural engineering plays an important role in contributing to the development of structural mechanics in general, taking into account reliability, safety of projects, industrial development and compliance with quality standards. Software technologies are an integral part of modern structural mechanics, providing engineers with powerful tools for analyzing and calculating building structures.

The advantage of software technologies is to increase productivity, reduce the number of errors and collisions. Modern information technologies allow engineers to improve the quality of calculation substantiation of design decisions, reduce the material consumption of a construction project, reduce project deadlines and economical costs.

The paper discusses the finite element method and provides an overview of computer modeling programs developed for the calculation and design of structures in the field of structural mechanics. The results of research on the use of genetic algorithms and artificial intelligence are demonstrated and the features of the operation of these technologies are given.

Введение

В настоящее время при расчете элементов строительных конструкций используются как традиционные методы строительной механики, так и программные технологии с целью повышения производительности проектирования и оптимизации конструкций [1–3].

В России успешно внедряются программные технологии в различных областях народного хозяйства. В рамках исследований компании ATLANTIS AR, предоставляющей услуги в области информационных технологий (ИТ), установлено, что применение программных технологий для проведения анализа и проектирования активно используют различные строительные компании как на мировом рынке, так и в России [4]. К примеру, в Институте механики РАН создано специальное программное обеспечение (ПО), посредством которого можно создавать двух- и трехмерные чертежи, анализировать напряженность и деформации [5].

Использование программного продукта ANSYS повысило уровень производительности при разработке моделей балок на 30 %. Программные продукты компании «ANSYS Россия», специализирующейся в области строительной механики, позволили сократить время проектирования объектов вдвое [6]. Благодаря программному обеспечению возможна адаптация рабочей проектной среды к запросам пользователя, что позволяет настраивать среду. За счет создания повторяемых и в то же время настраиваемых шаблонов обес-

печивается автоматизация всего реализуемого процесса, связанного непосредственно с решением задач. Данное ПО дает возможность решать задачи математического моделирования в области строительной механики, создавая геометрическую модель объекта по заранее установленным критериям [7].

Для процесса моделирования объекта предполагается формирование цифровой трехмерной модели, которая детально описывает как геометрические параметры, так и характеристики материалов, используемые в конструкции [8, 9]. Рабочим инструментом для моделирования служат соответствующие программные комплексы, такие как AutoCAD, SolidWorks, Revit и другие аналогичные продукты, обеспечивающие высокую точность создаваемой модели [10].

После создания модели выполняется следующее:

1. Проводится анализ прочности, устойчивости и других параметров с использованием методов численного анализа, включая метод конечных элементов.
2. Модель разбивается на малые элементы.
3. Решаются уравнения прочности и деформации для каждого элемента.
4. Получается подробная информация о поведении конструкции при различных условиях нагружения [11].

Цель данной работы – анализ программных технологий с точки зрения повышения производительности проектирования и оптимизации конструкций в области строительной механики.

Для этого необходимо решить следующие задачи:

1. Изучить состояние вопроса на современном этапе, используя актуальные научные источники.
2. Выделить наиболее часто используемые программные комплексы для анализа и проектирования конструкций в строительной механике и привести примеры их применения.
3. Проанализировать опыт применения программных технологий в РФ для проектирования и оптимизации конструкций в области строительной механики.
4. Выделить возможности применения искусственного интеллекта (ИИ) для проектирования и оптимизации конструкций в рамках строительной механики.

Метод конечных элементов в компьютерном моделировании

Метод конечных элементов – Finite Element Analysis (МКЭ, или FEA) – метод, который был изначально создан для решения сложных задач в строительной механике. С помощью МКЭ обеспечивается практически полная автоматизация расчета стержневых систем. При внедрении компьютеров в инженерную практику метод приобрел большое распространение.

В большинстве современных программных средств компьютерного моделирования, разработанных для расчета и проектирования конструкций в сфере строительной механики [12], используется метод конечных элементов, предназначенный для оценки прочности строительных деталей посредством проведения анализа влияния нагрузок, прикладываемых к данным деталям. Для этих целей используются соответствующие уравнения, являющиеся основой численных расчетов, выполняемых в программах, таких как ANSYS, Tekla Structures.

Алгоритм МКЭ работает следующим образом:

1. Заданная область разбивается на конечные элементы.
2. Выбирается аппроксимирующая функция, представленная в виде полинома для всех элементов.

3. Происходит объединение функций, являющихся полиномиальными, в систему алгебраических уравнений.

4. Осуществляется решение полученной системы уравнений. Определяется направление (вектор) перемещений и ускорений.

Результаты выполненного расчета и конструирования плиты перекрытия были получены в «ЛИРА-САПР». Распределение изгибающих моментов M_x и M_y иллюстрирует, что они являются равнозначными. Это свидетельствует о том, что необходимо использовать две арматурные сетки для армирования плиты – нижнюю сетку у нижней поверхностной части плиты и верхнюю сетку у верхней части.

Принцип работы МКЭ заключается в разделении сложных структур на простые элементы для численного анализа, включающего:

- дискретизацию;
- установление граничных условий;
- формулирование уравнений;
- сборку глобальных матриц;
- решение уравнений и интерпретацию результатов.

В рамках строительной механики метод конечных элементов дает возможность точно и эффективно исследовать и создавать строительные конструкции:

1. В начале проекта с помощью компьютерной программы создается виртуальная модель строительной конструкции, которая отражает геометрию и свойства материалов.

2. Далее в автоматическом режиме формируется сетка из элементов. Необходимо отметить, что выбор между данными элементами зависит от того, какой материал используется (линейные используются при исследовании простых структур, нелинейные – для моделирования сложных конструкций).

3. По каждому элементу формулируются уравнения, описывающие их поведение при различных нагрузках и при граничных условиях, после чего они объединяются в большую систему уравнений. Отметим, что эта система описывает взаимодействие непосредственно каждой части конструкции с другими и влияние частей друг на друга.

4. Происходит автоматическое решение вышеуказанных уравнений, что позволяет инженеру получить численные результаты – напряжения, а также допускаемые нагрузки на конструкцию, деформации. Эти результаты дают возможность определить уровень безопасности конструкции и её прочности при различных условиях (ветровых и динамических нагрузок).

Рассматриваемый метод применяется при проектировании строительных конструкций в рамках строительной механики. Положение данного процесса в общей структуре BIM-процесса (BIM – информационное моделирование зданий) показано на рис. 1. Необходимо отметить, что строительные информационные модели способствуют повышению организационной надежности, ускорению процесса принятия решений, улучшению согласованности информации за счет анализа данных из одного источника [13, 14].

Применение метода конечных элементов в блоке анализа элементов конструкций покажем на примере конструирования монолитной железобетонной плиты перекрытия $a \times b$, содержащей отверстие для вентиляционного канала $x \times y$ на расстоянии c и d от вертикали и горизонтали соответственно (рис. 2).

Для расчета распределения изгибающих моментов M_x и M_y в плите могут использоваться следующие формулы:

$$M_x = D \frac{d^2 w}{dx^2},$$

где D – жесткость материала плиты;

$\frac{d^2 w}{dx^2}$ – вторая производная от прогиба плиты по отношению к координате x ;

$$M_y = D \frac{d^2 w}{dy^2},$$

где $\frac{d^2 w}{dy^2}$ – вторая производная от прогиба плиты по отношению к координате y .

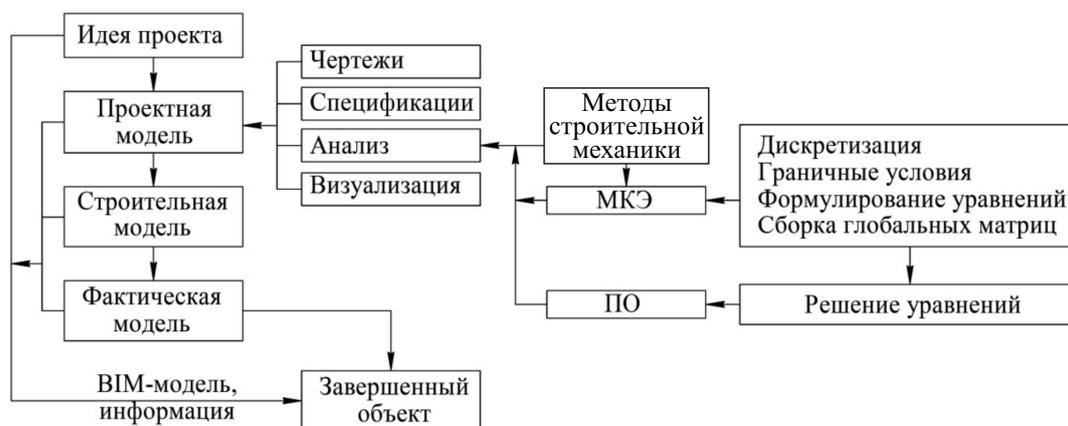


Рис. 1. Модель BIM-процесса, включающего блок «Анализ», в котором используются методы строительной механики

Fig. 1. Model of a BIM-process, including the «Analysis» block, which uses structural mechanics methods

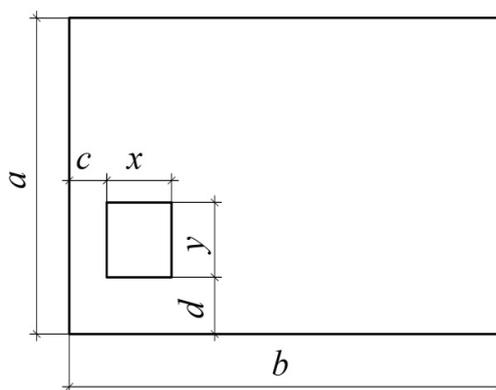


Рис. 2. Расчетная схема железобетонной плиты
 Fig. 2. Design diagram of a reinforced concrete slab

Уравнение распределения изгибающих моментов в плите может быть представлено следующим образом:

$$M = -D \cdot \nabla^2 w,$$

где ∇^2 – оператор Лапласа, который описывает вторую производную по координатам x и y ;
 w – прогиб плиты.

Отметим, что приведенное уравнение является обобщенным для определения распределения изгибающих моментов в плите. Уравнение используется в МКЭ для анализа конструкций. Представленное уравнение используется для расчетов в программах, таких как ANSYS, Tekla Structures и других, при моделировании и анализе поведения строительных конструкций в различных условиях нагрузки.

На рис. 3, *а* представлено графическое изображение изополей изгибающих моментов M_x , на рис. 3, *б* – изображение изополей изгибающих моментов M_y в плите перекрытия первого этажа от расчетного сочетания нагрузок. Изополя – линии, на которых моменты изгиба в плите имеют одинаковое значение. Цвета (бирюзовый и желтый) указывают на значения моментов. С помощью них можно анализировать распределение моментов непосредственно в плите перекрытия, которое основывается на классических расчетах строительной механики. Данная информация имеет важное значение при проектировании и анализе строительных конструкций, поскольку позволяет определить точки максимальных и минимальных напряжений в структуре рассматриваемого объекта.

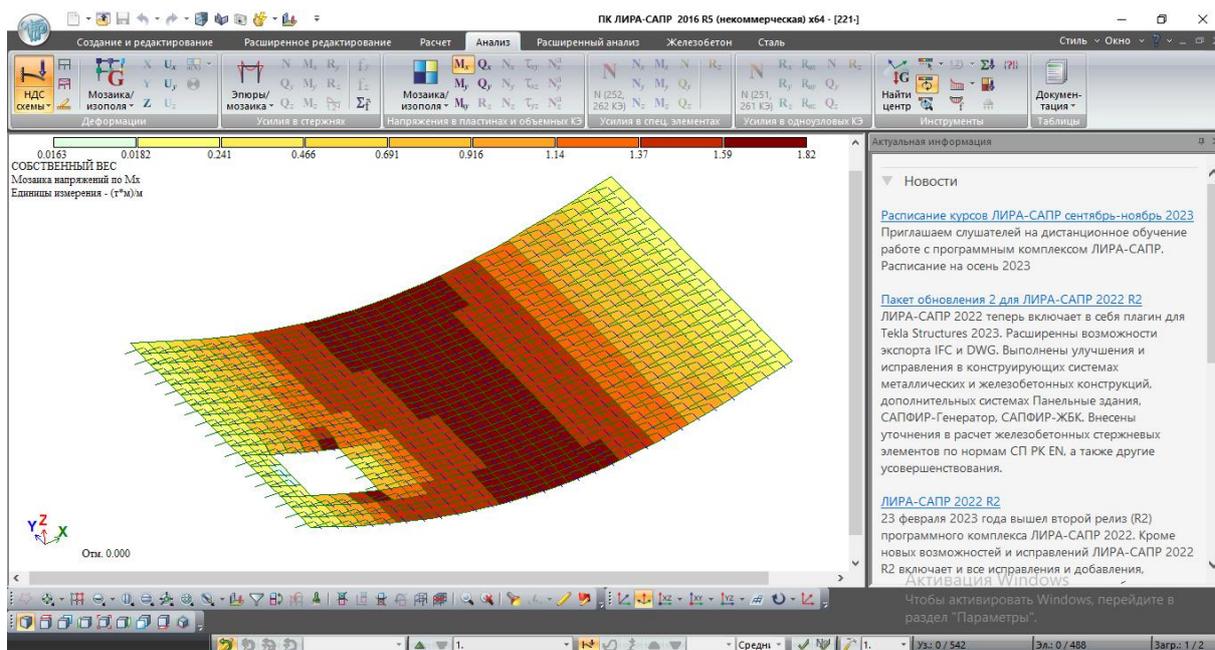
Результаты выполненного расчета и конструирования плиты перекрытия были получены в «ЛИРА-САПР». Распределение изгибающих моментов M_x и M_y иллюстрирует, что они являются равнозначными. Это свидетельствует о том, что необходимо использовать две арматурные сетки для армирования плиты – нижнюю сетку у нижней поверхностной части плиты и верхней сеткой у верхней части.

Алгоритм оптимизации несложных конструкций в строительной механике следующий:

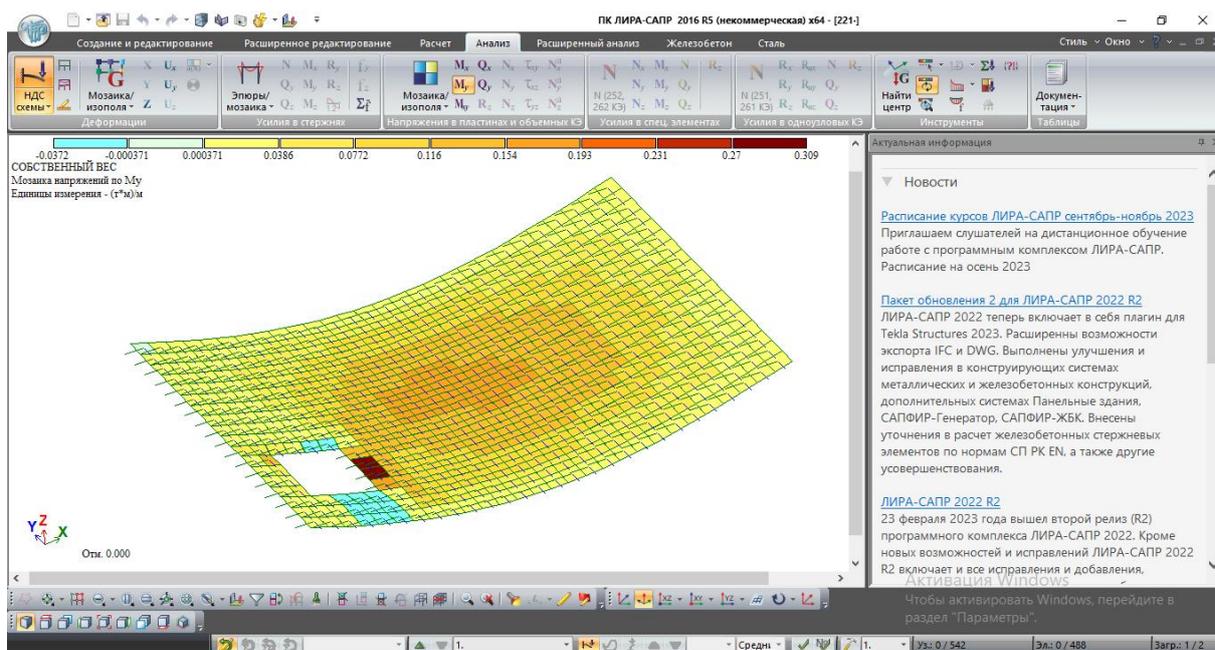
1. Создание начальной модели здания: данный шаг включает в себя создание начальной геометрической модели и задание начальных условий и параметров объекта.
2. Задание оптимизационных критериев: задание оптимизационных критериев, которые система будет учитывать при оптимизации конструкции.
3. Определение дизайн-переменных: определение размеров, материалов и параметров элементов и при необходимости их изменение в процессе оптимизации.
4. Проведение анализа конечных элементов: выполняется с целью оценки поведения конструкции при различных нагрузках и условиях.
5. Автоматизированная оптимизация: возможность изменить вышеприведенные дизайн-переменные для оптимизации конструкции в соответствии с заданными критериями.
6. Проверка безопасности и результатов: необходимо удостовериться, что полученная конструкция соответствует стандартам и требованиям.

Оптимизация конструкции в инженерных и строительных проектах может зависеть от различных критериев и требований. Критерии оптимизации варьируются в зависимости от конкретной задачи проекта. Ниже представлены некоторые общие оптимизационные критерии при оптимизации конструкции:

1. Часто главной целью является минимизация массы конструкции, что может привести к снижению материалоемкости и стоимости.
2. Если конструкция должна выдерживать определенные нагрузки или условия, то оптимизация может включать максимизацию прочности и устойчивости.
3. В некоторых случаях, особенно при проектировании зданий и мостов, важно минимизировать деформации при нагрузках.
4. Оптимизация может включать в себя минимизацию затрат на материалы, производство, транспортировку и установку.
5. В некоторых случаях целью является увеличение эффективности энергопотребления зданий.



a



b

Рис. 3. Изополя изгибающих моментов M_x (a), M_y (b) плиты перекрытия первого этажа от расчетного сочетания нагрузок
Fig. 3. Stress isofields of bending moments M_x (a), M_y (b) of the first floor slab from the design combination of loads

6. Важно проверить, что конструкция полностью отвечает нормам и стандартам в сфере строительства, что может быть очень важным критерием оптимизации.
7. В различных проектах следует принимать в учет экологические аспекты, такие как уменьшение воздействия на окружающую среду.
8. Критерии могут включать в себя соблюдение сроков проекта и бюджета.

9. Если конструкция должна быть долговечной и иметь длительный срок службы, оптимизация может включать в себя максимизацию долговечности.

10. Оптимизация может учитывать минимизацию рисков, связанных с конструкцией, например сейсмическую устойчивость или безопасность.

Преимущество МКЭ в строительной механике заключается в том, что он позволяет прогнозировать поведение конструкций, экономя время и ресурсы благодаря специализированным компьютерным программам (например, ANSYS, Abaqus, SolidWorks, CATIA и Tekla Structures). Кроме того, в строительной механике при строительстве объекта с помощью этого метода возможно определить грунт, на котором будет осуществляться возведение объекта [15, 16].

Однако метод имеет ограничения:

1. Точность результатов зависит от правильности выбора конечных элементов и сетки.
2. МКЭ не всегда учитывает все физические явления, что может ограничивать его применение в некоторых задачах.
3. Для сложных задач требуются значительные вычислительные мощности и время.
4. Возможны сложности при создании точной геометрической модели.
5. Необходимость валидации с целью достоверности.

В 2023 г. было установлено, что МКЭ может быть применен для проведения анализа железобетонных объектов при землетрясениях, деформациях и напряжениях [17].

Применение программного обеспечения для проведения анализа и проектирования конструкций в строительной механике

В рамках инженерного моделирования и программных продуктов (ANSYS, Abaqus, SolidWorks, CATIA и Tekla Structures) были проанализированы работы [18–21]. Представим результаты анализа программных комплексов, таких как ANSYS, Abaqus, SolidWorks, CATIA и Tekla Structures, в табличном виде.

Наиболее часто используемые программные комплексы для анализа и проектирования конструкций в строительной механике и примеры их применения

The most used software systems for the analysis and design of structures
in structural mechanics and examples of their application

Программа	Описание	Пример применения
ANSYS	Обеспечивает анализ показателей прочности, а также теплопередачи, динамического и сейсмического показателей. Применяется в сфере строительной механики. Программный комплекс снабжен совокупностью средств для создания геометрической модели и постройки модели инженерной системы разными методами: импорт, моделирование или создание	Используется для оптимизации формы балки при максимальной несущей способности с заданными нагрузками. На сегодняшний день программный комплекс применяется чаще всего в промышленности. Отметим, что существуют различные подходы и возможности данного ПО при осуществлении расчетов на сейсмозоондествия
Abaqus	Проведение анализа нелинейных и динамических задач	Используется для определения деформаций и напряжений в металлических конструкциях при пластических деформациях
SolidWorks	Нашёл применение в области 3D-проектирования и моделирования	Применяется для создания трехмерных моделей деталей и сборок, исследования прочности и оптимизации формы

Окончание таблицы

Программа	Описание	Пример применения
CATIA	Интегрированное окружение для создания и анализа сложных объектов	Проектирование композитных структур в авиационной промышленности, исследование их прочности
Tekla Structures	Информационное моделирование зданий (BIM)	Создание 3D-моделей зданий с учетом всех элементов объектов и исследование их поведения при различных нагрузках. Расчет осуществляется системой прочностного анализа и системой проектирования SCAD Office, включающей вычислительный состав SCAD++, посредством которого реализуется метод конечных элементов, а также программы, использующиеся для того, чтобы решать задачи определённого узконаправленного характера

Наиболее часто применяемыми программными комплексами для работы со строительными конструкциями в рамках строительной механики являются ANSYS и Tekla Structures. ANSYS включает мощные инструменты для проведения анализа прочности и оценки динамических показателей. Программный продукт полезен при осуществлении расчетов на сейсмические нагрузки и теплопередачу, что немаловажно в строительной механике. Отметим, что ANSYS обладает большими возможностями для проведения моделирования различных видов нагрузок.

Tekla Structures направлен на проведение информационного моделирования зданий (BIM), применяется при разработке трехмерных моделей объектов строительства. Данный продукт в рамках своих возможностей позволяет учесть каждый элемент конструкции, выполнить детальный анализ поведения здания под нагрузками.

Возможности применения искусственного интеллекта для проектировании и оптимизации конструкций в рамках строительной механики

Искусственный интеллект осуществляет быстрые вычисления с малым процентом возможных ошибок, но при этом конкретные результаты зависят от проекта и использованных методов. Искусственный интеллект, применяемый в области строительной механики, позволяет улучшить формы конструкций, делая их более эргономичными. ИИ контролирует напряжения, повышая уровень безопасности.

На сегодняшний день также существует новый алгоритм обучения, который основывается на глубокой нейросети. Он обеспечивает возможность определять наиболее благоприятные показатели относительно установленных. Программа рассчитывает необходимые конструктивные параметры в рамках заранее определённых условий и помогает специалистам вычислять важные параметры конструкции, гарантирующие наибольшую грузоподъемность непосредственно при минимальных издержках.

С развитием технологий ИИ становится более доступным для использования. Отметим существенный вклад ИИ в улучшение процессов в строительной механике, так как он решает задачи, которые невозможно решить с помощью других методов.

Принцип работы генетических алгоритмов и искусственного интеллекта при оптимизации дизайна плоских рам включает:

1. Генетические алгоритмы (ГА): имитируют процесс естественного отбора и эволюции. Создают популяцию решений, комбинируют и изменяют их, оценивают с учетом критериев, таких как прочность и стоимость. Лучшие решения используются для создания новых поколений, повторяя процесс до достижения оптимума [22, 23].

2. ИИ: обеспечивает автоматизацию оптимизации, анализируя параметры конструкции в рамках строительной механики. Учитывает критерии оптимизации, такие как прочность, экономичность, а также выявляет закономерности, предлагая оптимальные решения.

Исследования, проведенные в период с 2022 по 2023 г., показывают, что генетические алгоритмы совместно с искусственным интеллектом оптимизируют проектирование плоских рам в строительной механике.

Получены следующие результаты:

1. Сокращение времени создания проекта на 40 % за счет скорости выбора наилучших решений для заданной конструкции в рамках строительной механики.
2. Снижение материальных затрат при проектировании на 15 %.
3. Рост прочности плоских рам на 20 % делает их более надежными.
4. Сокращение на 25 % воздействия на окружающую среду в процессе производства плоских рам [24–26].

Обсуждение

Таким образом, в результате анализа программных комплексов и возможностей применения искусственного интеллекта в рамках строительной механики можно сделать вывод, что программные комплексы ANSYS, Abaqus, SolidWorks, CATIA, Tekla Structures являются отличными средствами для проектирования и оптимизации конструкций. Программные комплексы и ИИ оказывают поддержку специалисту в процессе разработки проекта.

При этом ANSYS нашел большее применение в Российской Федерации. Программный продукт является эффективным в плане возможности адаптации рабочей проектной среды к запросам пользователя, что дает возможность настраивать среду. А за счет создания повторяемых и настраиваемых шаблонов обеспечивается автоматизация процесса, связанного с решением задач математического моделирования, созданием геометрической модели объекта. Исследования относительно применения в строительной механике генетических алгоритмов и искусственного интеллектом показали положительные результаты оптимизации проектирования плоских рам.

Заключение

В данной работе, согласно поставленной цели и задачам, выполнено следующее:

1. Проведен анализ актуальной литературы по вопросу применения программных технологий для повышения производительности проектирования и оптимизации конструкций в области строительной механики.
2. Проанализирован ряд программных комплексов с точки зрения повышения производительности проектирования и оптимизации конструкций в области строительной механики.

3. Выделены наиболее используемые программные комплексы для анализа и проектирования конструкций в строительной механике. Это такие программы, как ANSYS, Abaqus, SolidWorks, CATIA и Tekla Structures, используемые инженерами и проектировщиками для анализа и проектирования конструкций.

4. Выявлено, что в последнее время в России успешно внедряются данные программные технологии, а также разрабатываются собственные.

5. Выделены возможности применения искусственного интеллекта для проектирования и оптимизации конструкций в рамках строительной механики.

6. Рассмотрен метод Finite Element Analysis для компьютерного моделирования в области строительной механики. Метод позволяет прогнозировать поведение конструкций, экономя время и аппаратные ресурсы.

7. Показаны возможности применения генетических алгоритмов совместно с искусственным интеллектом для проектирования и оптимизации конструкций. Выяснилось, что они оптимизируют проектирование плоских рам в строительной механике, сокращая время на выполнение данного процесса, повышая прочность, снижая материальные затраты и уменьшая негативное воздействие на окружающую среду.

Финансирование. Исследование не имело спонсорской поддержки.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Вклад авторов. Все авторы сделали равный вклад в подготовку публикации.

Библиографический список

1. Пименов, С.И. Влияние строительной информационной модели на эффективность системы управления строительным производством / С.И. Пименов // Вестник гражданских инженеров. – 2023. – № 4 (99). – С. 68–76.

2. Пушкарев, И.А. Использование программных комплексов конечно-элементного анализа и BIM-технологий при расчете элементов строительных конструкций / И.А. Пушкарев, В.А. Евсягина, Т.С. Шанина // BIM-моделирование в задачах строительства и архитектуры: материалы VI Междунар. науч.-практ. конф. – СПб., 2023. – С. 378–382.

3. Букалова, А.Ю. Постановка задачи разработки методических основ информационного моделирования процесса сметного нормирования для оптимизации проектных работ / А.Ю. Букалова, К.В. Авдеева // Construction and Geotechnics. – 2020. – Т. 11, № 4. – С. 81–93. DOI: 10.15593/2224-9826/2020.4.07

4. Куркова, О.П. Численное компьютерное моделирование динамики изменений напряженно-деформируемых состояний как инструмент формирования исходных данных для создания системы мониторинга судового руля [Электронный ресурс] / О.П. Куркова // Системы управления, связи и безопасности. – 2022. – № 2. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/chislennoe-kompyuternoe-modelirovanie-dinamiki-izmeneniy-napryazhenno-deformiruemyh-sostoyaniy-kak-instrument-formirovaniya> (дата обращения: 26.10.2023).

5. Павленко, П.В. Экспериментальное и численное моделирование процесса разрушения железобетонных конструкций: анализ механизмов трещинообразования и возможности повышения прочности [Электронный ресурс] / П.В. Павленко // Инновации и инвестиции. – 2023. – № 4. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/eksperimentalnoe-i-chislennoe-modelirovanie-protsessa-razrusheniya-zhelezobetonnyh-konstruktsiy-analiz-mehanizmov> (дата обращения: 26.10.2023).

6. Разработка математического комплекса моделирования процесса разрушения композиционных конструкций на основе высокоскоростных моделей деформирования [Электронный ресурс] / Г.М. Журавлев, В.Г. Теличко, Н.С. Куриен, А.Е. Гвоздев, О.В. Кузовлева // Чебышевский сборник. – 2020. – № 3 (75). – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/razrabotka-matematicheskogo-kompleksa-modelirovaniya-protssessa-razrusheniya-kompozitsionnyh-konstruktsiy-na-osnove-vysokoskorostnyh> (дата обращения: 26.10.2023).

7. Низомов, Д.Н. Моделирование в задачах строительной механики / Д.Н. Низомов, И.И. Каландарбеков, И.К. Каландарбеков // Политехнический вестник. Серия: Инженерные исследования. – 2022. – № 3 (59). – С. 128–131.

8. Benefits and challenges encountered in utilization building information modelling in construction projects / A. Awali, H.A.H. Ahmed, T.A.T. Moogam [et al.] // International Journal of Humanities and Natural Sciences. – 2021. – No. 11–3 (62). – P. 26–30.

9. Chiu, W.Y.B. Building information modelling for building services engineering: benefits, barriers and conducive measures / W.Y.B. Chiu, J.H.K. Lai // Engineering Construction & Architectural Management. – 2020. – Vol. 27, No. 9. – P. 2221–2252. DOI: 10.1108/ECAM-10-2018-0460

10. Abbate, E. HBIM parametric modelling from clouds to perform structural analyses based on finite elements: a case study on a parabolic concrete vault / E. Abbate, S. Invernizzi, A. Spanò // Applied Geomatics. – 2022. – Vol. 14, No. 1. – P. 79–96.

11. Towards Partial Supervision for Generic Object Counting in Natural Scenes / H. Cholakkal, G. Sun, S. Khan [et al.] // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. – 2022. – Vol. 44, no. 3. – P. 1604–1622.

12. Соловьев, А.Н. Развитие САПР для решения задач механики с использованием МКЭ / А.Н. Соловьев, Р.В. Киричевский // Вестник Новосибирского государственного университета. Серия: Информационные технологии. – 2021. – Т. 19, № 4. – С. 67–84.

13. Пименов, С.И. Строительная информационная модель / С.И. Пименов // Construction and Geotechnics. – 2022. – Т. 13, № 3. – С. 72–84. DOI: 10.15593/2224-9826/2022.3.07

14. Пименов, С.И. Строительная информационная модель как инструмент снижения информационной неопределенности в оперативном управлении строительства / С.И. Пименов, Л.А. Коклюгина // Construction and Geotechnics. – 2023. – Т. 14, № 2. – С. 116–127. DOI: 10.15593/2224-9826/2023.2.09

15. Александровский, М.В. Моделирование и оптимизация конструкций в строительной механике с применением программного обеспечения [Электронный ресурс] / М.В. Александровский // Экономика строительства. – 2023. – № 3. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/modelirovanie-i-optimizatsiya-konstruktsiy-v-stroitelnoy-mehanike-s-primeneniem-programmnogo-obespecheniya> (дата обращения: 26.10.2023).

16. Туйтанова, Н.Н. Автоматизированное планирование управления для повышения эксплуатационных характеристик интеллектуальных систем возобновляемой энергетики / Н.Н. Туйтанова, Ф.Ф. Ахметзянова, В.А. Гаврилов // Энергетика, инфокоммуникационные технологии и высшее образование: электрон. сб. науч. ст. по материалам междунар. науч.-техн. конф.: в 3 т. – Казань, 2023. – Т. 1. – С. 233–240.

17. Серпик, И.Н. Моделирование деформаций предварительно напряженных стальных ферм при аварийных ситуациях / И.Н. Серпик, Н.В. Тарасова // Известия Юго-Западного государственного университета. – 2021. – Т. 25, № 2. – С. 35–50.

18. Стрельцова, О.В. Моделирование нагрева кабеля в зависимости от гармонического состава тока / О.В. Стрельцова, А.С. Бондарь, В.В. Ишин // Труды конференции молодых

российских исследователей в области электротехники и электроники IEEE 2020, EIConRus 2020. – СПб.; М.: Ин-т инженеров по электротехнике и электронике, 2020. – С. 900–903.

19. Проектирование рамы электробайка с использованием методов топологической оптимизации / А.П. Черемисин, С.В. Карпов, Р.В. Хрусталева, А.Н. Бочарова // *Виртуальное моделирование, прототипирование и промышленный дизайн: материалы VI Междунар. науч.-практ. конф., Тамбов, 16–18 октября 2019 г.* – Т. 1, вып. 6. – Тамбов: Тамбов. гос. техн. ун-т. – 2020. – С. 24–28.

20. Кузнецов, А.Н. Дисперсное армирование газобетона автоклавного твердения / А.Н. Кузнецов // *Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века.* – 2020. – № 1–2 (252–253). – С. 28–33.

21. Овчинников, И.Г. Тенденции в оптимальном проектировании металлических конструкций с учетом условий эксплуатации [Электронный ресурс] / И.Г. Овчинников, В.С. Мавзовин // *Инженерно-строительный вестник Прикаспия.* – 2020. – № 1 (31). – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/tendentsii-v-optimalnom-proektirovanii-metallicheskih-konstruktsiy-s-uchetom-usloviy-ekspluatatsii> (дата обращения: 26.10.2023).

22. Игнатьев, В.А. Алгоритм решения задачи прогнозирования напряженно-деформированного состояния гуманитарного объекта на основе адаптированного метода конечных элементов / В.А. Игнатьев, А.В. Игнатьев, С.Е. Карпушова // *Известия высших учебных заведений. Строительство.* – 2022. – № 3 (759). – С. 97–102.

23. Бестужева, А.С. Напряжённо-деформированное состояние грунтовой плотины с глиноцементобетонной диафрагмой и зоной из камнебетона / А.С. Бестужева, А.А. Тарасов // *Гидротехническое строительство.* – 2022. – № 11. – С. 2–11.

24. Компания Atls [Электронный ресурс]. – URL: <https://atls.su/> (дата обращения: 29.09.2023).

25. Вахрушева, М.А. Системный подход к сравнительному анализу программных комплексов на основе информационного моделирования строительных и машиностроительных конструкций / М.А. Вахрушева, И.А. Пушкарев // *Современные тенденции развития науки и мирового сообщества в эпоху цифровизации: сб. материалов XIV Междунар. науч.-практ. конф., Москва, 10 мая 2023 г.* – Махачкала: АЛЕФ, 2023. – С. 208–217.

26. Шарыпова, Т.Н. Современное состояние искусственного интеллекта / Т.Н. Шарыпова, Я.Д. Шмалий // *Colloquium-Journal.* – 2022. – № 10–1 (133). – С. 34–36.

References

1. Pimenov S.I. Vliyaniye stroitel'noy informatsionnoy modeli na effektivnost' sistemy upravleniya stroitel'nym proizvodstvom [The influence of the construction information model on the efficiency of the construction production management system]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov*, 2023, iss. 4 (99), pp. 68-76.

2. Pushkarev I.A., Yevsyagina V.A., Shanina T.S. Ispol'zovaniye programmnykh kompleksov konechno-elementnogo analiza i BIM-tekhnologiy pri raschete elementov stroitel'nykh konstruktsiy [The use of software systems for finite element analysis and BIM technologies in the calculation of elements of building structures]. *BIM-modelirovaniye v zadachakh stroitel'stva i arkhitektury: Materialy VI Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii*, Saint Petersburg, 2023, pp. 378-382.

3. Bukalova A.Y., Avdeeva K.V. Postanovka zadach po razrabotke metodicheskikh osnov informatsionnogo modelirovaniya protsessa smetnogo normirovaniya dlya optimizatsii proyektnykh

rabot. [The statement of the problem of developing the methodological bases of information modeling of the cost estimation process for the optimization of design work]. *Construction and Geotechnics*, 2020, vol. 11, no. 4, pp. 81-93. DOI: 10.15593/2224-9826/2020.4.07.

4. Kurkova O.P. Chislennoye komp'yuternoye modelirovaniye dinamiki izmeneniy napryazhenno-deformiruyemykh sostoyaniy kak instrument formirovaniya iskhodnykh dannykh dlya sozdaniya sistemy monitoringa sudovogo rulya [Numerical computer modeling of the dynamics of changes in stress-strain states as a tool for generating initial data for creating a monitoring system for a ship's rudder]. *Sistemy upravleniya, svyazi i bezopasnosti*, 2022, no. 2, available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/chislennoe-kompyuternoe-modelirovanie-dinamiki-izmeneniy-napryazhenno-deformiruyemykh-sostoyaniy-kak-instrument-formirovaniya> (accessed 26 October 2023).

5. Pavlenko P.V. Eksperimental'noye i chislennoye modelirovaniye protsessa razrusheniya zhelezobetonnykh konstruktsiy: analiz mekhanizmov treshchinoobrazovaniya i vozmozhnosti povysheniya prochnosti [Experimental and numerical modeling of the process of destruction of reinforced concrete structures: analysis of crack formation mechanisms and the possibility of increasing strength]. *Innovatsii i investitsii*, 2023, no. 4, available at: URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/eksperimentalnoe-i-chislennoe-modelirovanie-protsessa-razrusheniya-zhelezobetonnykh-konstruktsiy-analiz-mekhanizmov> (26 October 2023).

6. Zhuravlev G.M., Telichko V.G., Kuriyen N.S., Gvozdev A.Ye., Kuzovleva O.V. Razrabotka matematicheskogo kompleksa modelirovaniya protsessa razrusheniya kompozitsionnykh konstruktsiy na osnove vysokoskorostnykh modeley deformirovaniya [Development of a mathematical complex for modeling the process of destruction of composite structures based on high-speed deformation models]. *Chebyshevskiy sbornik*, 2020, iss. 3 (75), available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/razrabotka-matematicheskogo-kompleksa-modelirovaniya-protsessa-razrusheniya-kompozitsionnykh-konstruktsiy-na-osnove-vysokoskorostnykh> (accessed 26 October 2023).

7. Nizomov D.N., Kalandarbekov I.I., Kalandarbekov I.K. Modelirovaniye v zadachakh stroitel'noy mekhaniki [Modeling in problems of structural mechanics]. *Politekhnicheskiiy vestnik. Inzhenernyye issledovaniya*, 2022, no. 3 (59), pp. 128-131.

8. Awali A., Ahmed H.A.H., Moogam T.A.T. [et al.]. Benefits and challenges encountered in utilization building information modelling in construction projects. *International Journal of Humanities and Natural Sciences*, 2021, no. 11-3 (62), pp. 26-30.

9. Chiu, W.Y. B., J.H. K. Lai. Building information modelling for building services engineering: benefits, barriers and conducive measures. *Engineering Construction & Architectural Management*, 2020, vol. 27, no. 9, pp. 2221-2252. DOI: 10.1108/ECAM-10-2018-0460.

10. Abbate E., Invernizzi S., Spanò A. HBIM parametric modelling from clouds to perform structural analyses based on finite elements: a case study on a parabolic concrete vault. *Applied Geomatics*, 2022, vol. 14, no. 1, pp. 79-96.

11. Cholakkal H., Sun G., Khan S. [et al.]. Towards Partial Supervision for Generic Object Counting in Natural Scenes. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2022, vol. 44, no. 3, pp. 1604-1622.11.

12. Solov'yev A.N., Kirichevskiy R.V. Razvitiye SAPR dlya resheniya zadach mekhaniki s ispol'zovaniyem MKE [Development of CAD for solving mechanics problems using FEM]. *Vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo universiteta. Informatsionnyye tekhnologii*, 2021, vol. 19, no 4, pp. 67-84.

13. Pimenov S.I. Stroitel'naya informatsionnaya model' [Construction information model]. *Construction and Geotechnics*, 2022, vol. 13, no. 3, pp. 72-84. DOI: 10.15593/2224-9826/2022.3.07.

14. Pimenov S.I., Kokliugina L.A. Stroitel'naya informatsionnaya model' kak instrument ucheta informatsionnykh neopredelennostey v operativnom upravlenii. [Construction information model as a tool to reduce information uncertainty in the operational management of construction]. *Construction and Geotechnics*, 2023, vol. 14, no. 2, pp. 116-127. DOI: 10.15593/2224-9826/2023.2.09.

15. Aleksandrovskiy M.V. Modelirovaniye i optimizatsiya konstruktsiy v stroitel'noy mekhanike s primeneniyyem programmnoy obespecheniya [Modeling and optimization of structures in structural mechanics using software]. *Ekonomika stroitel'stva*, 2023, no. 3, available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/modelirovanie-i-optimizatsiya-konstruktsiy-v-stroitelnoy-mekhanike-s-primeneniem-programmnoy-obespecheniya> (accessed 26 October 2023).

16. Tuytanova N.N., Akhmetzyanova F.F., Gavrilov V.A. Avtomatizirovannoye planirovaniye upravleniya dlya povysheniya ekspluatatsionnykh kharakteristik intellektual'nykh sistem vozobnovlyayemoy energetiki [Automated control planning to improve the operational characteristics of smart renewable energy systems]. *Energetika, infokommunikatsionnyye tekhnologii i vyssheye obrazovaniye: Mezhdunarodnaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya. Elektronnyy sbornik nauchnykh statey po materialam konferentsii v 3-kh tomakh*, Kazan, 2023, vol. 1, pp. 233-240.

17. Serpik I.N., Tarasova N.V. Modelirovaniye deformatsiy predvaritel'no napryazhennykh stal'nykh ferm pri avariynykh situatsiyakh [Modeling of deformations of prestressed steel trusses in emergency situations]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta*, 2021, vol. 25, no. 2, pp. 35-50.

18. Strel'tsova O.V., Bondar' A.S., Ishin V.V. Modelirovaniye nagreva kabelya v zavisimosti ot garmonicheskogo sostava toka [Modeling of cable heating depending on the harmonic composition of the current]. *Trudy konferentsii molodykh rossiyskikh issledovateley v oblasti elektrotekhniki i elektroniki IEEE 2020, EIConRus 2020*, Saint Petersburg and Moscow, 2020, pp. 900-903.

19. Cheremisin A.P., Karpov S.V., Khrustalev R.V., Bocharova A.N. Proyektirovaniye ramy elektrobayka s ispol'zovaniyyem metodov topologicheskoy optimizatsii [Design of an electric bike frame using topological optimization methods]. *Virtual'noye modelirovaniye, prototipirovaniye i promyshlennyy dizayn: Materialy VI Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii*, Tambov, vol. 1, no. 6, 2020, pp. 24-28.

20. Kuznetsov A.N. Dispersnoye armirovaniye gazobetona avtoklavnoy tverdeniya [Dispersed reinforcement of autoclaved aerated concrete]. *Stroitel'nyye materialy, oborudovaniye, tekhnologii XXI veka*, 2020, no. 1-2 (252-253), pp. 28-33.

21. Ovchinnikov I.G., Mavzovin V.S. Tendentsii v optimal'nom proyektirovanii metallicheskih konstruktsiy s uchetom usloviy ekspluatatsii [Trends in the optimal design of metal structures taking into account operating conditions]. *Inzhenerno-stroitel'nyy vestnik Prikaspiya*, 2020, no. № 1 (31), available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/tendentsii-v-optimalnom-proektirovanii-metallicheskih-konstruktsiy-s-uchetom-usloviy-ekspluatatsii> (accessed 26 October 2023).

22. Ignat'yev V.A., Ignat'yev A.V., Karpushova S.Ye. Algoritm resheniya zadachi prognozirovaniya napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya gumanitarnogo ob'yekta na osnove adap-

tirovannogo metoda konechnykh elementov [Algorithm for solving the problem of predicting the stress-strain state of a humanitarian object based on the adapted finite element method]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Stroitel'stvo*, 2022, no. 3 (759), pp. 97-102.

23. Bestuzheva A.S., Tarasov A.A. Napryazhonno-deformirovannoye sostoyaniye gruntovoy plotiny s glinotsementobetonnoy diafragmoy i zonoy iz kamnebetona [Stress-strain state of a soil dam with a clay-cement-concrete diaphragm and a stone concrete zone]. *Gidrotekhnicheskoye stroitel'stvo*, 2022, no. 11, pp. 2-11.

24. Kompaniya Atls, available at: <https://atls.su/> (accessed 29 September 2023).

25. Vakhrusheva M.A., Pushkarev I.A. Sistemnyy podkhod k sravnitel'nomu analizu programmnykh kompleksov na osnove informatsionnogo modelirovaniya stroitel'nykh i mashinostroitel'nykh konstruksiy [A systematic approach to the comparative analysis of software systems based on information modeling of construction and mechanical engineering structures]. *Sovremennyye tendentsii razvitiya nauki i mirovogo soobshchestva v epokhu tsifrovizatsii: sbornik materialov XIV Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii*, Makhachkala, 2023, pp. 208-217.

26. Sharypova T.N., Shmaliy YA.D. Sovremennoye sostoyaniye iskusstvennogo intellekta [Current state of artificial intelligence]. *Colloquium-Journal*, 2022, no. 10-1 (133), pp. 34-36.