

ПОЖАРОВЗРЫВБЕЗОПАСНОСТЬ/FIRE AND EXPLOSION SAFETY. 2023. Т. 32. № 6. С. 13–24
POZHAROVZRYVOBEZOPASNOST/FIRE AND EXPLOSION SAFETY. 2023; 32(6):13-24

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ/RESEARCH PAPER

УДК 699.812

<https://doi.org/10.22227/0869-7493.2023.32.06.13-24>

Анализ существующих специализированных программных комплексов, пригодных для расчетов и решения междисциплинарных задач при моделировании огневых воздействий на строительные конструкции

Павел Сергеевич Ланской ✉, Дмитрий Александрович Корольченко

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. В ходе проектирования зданий и сооружений конструктивным элементам присваиваются требуемые пределы огнестойкости в соответствии действующими нормативными документами. Проведение натурных огневых испытаний для подтверждения требуемого предела огнестойкости для каждого варианта проектируемой конструкции экономически нецелесообразно, так как огневые испытания — это трудоемкий и дорогостоящий процесс. Программное моделирование огневого воздействия на конструкции является комплексной и трудоемкой задачей, в основе которой лежат фундаментальные физические законы теплотехники и механики твердого тела.

Цель. Анализ программных комплексов и определение их функциональных возможностей по моделированию и выполнению междисциплинарных прочностных расчетов для выбора наиболее подходящего для расчетов конструкций и их узлов в условиях пожара.

Задачи. Анализ основных принципов фундаментальных физических законов и их представление в методе конечных элементов, анализ достоверности результатов расчета каждого из расчетных комплексов, рекомендации по выбору программного комплекса, применяемого при расчете конструкций во время пожара.

Аналитическая часть. При анализе программных комплексов в исследовании рассматривались задачи, связанные с рассмотрением физических законов, заложенных в расчетную модель работы конструкции во время и после огневого воздействия, их интерпретации в методе конечных элементов, анализ наиболее распространенных программных комплексов, представленных на рынке и предназначенных для решения задач, связанных с механикой твердого тела и теплотехникой. Были сформулированы критерии оценки программных комплексов. По критериям оценки результаты сводились в сравнительную таблицу, на основании которой осуществляется выбор наиболее подходящего для решения конкретных задач. Был произведен анализ функциональных возможностей программных комплексов и сформулирована типовая статическая задача для расчета в каждом из ПК.

Выводы. Сравнительный анализ программных комплексов показал, что для решения задач, связанных с воздействием на строительные конструкции высоких температур во время пожара, наиболее подходящим программным комплексом является ANSYS, так как позволяет моделировать и совмещать как статическое, так и термическое воздействие.

Ключевые слова: деформации; конечно-элементное моделирование; сравнительный анализ; программное обеспечение; междисциплинарные расчеты; высокотемпературные воздействия; механика твердого тела; тепловой перенос

Для цитирования: Ланской П.С., Корольченко Д.А. Анализ существующих специализированных программных комплексов, пригодных для расчетов и решения междисциплинарных задач при моделировании огневых воздействий на строительные конструкции // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2023. Т. 32. № 6. С. 13–24. DOI: 10.22227/0869-7493.2023.32.06.13-24.

✉ Ланской Павел Сергеевич, e-mail: 6451187@mail.ru

Analysis of existing specialized software suitable for calculations and solving interdisciplinary tasks in modelling fire effects on building structures

Pavel S. Lansky ✉, Dmitriy A. Korolchenko

Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. During the engineering design, the required fire resistance limits are assigned to structural elements in accordance with current regulatory documents. However, carrying out full-scale fire tests to confirm the required fire resistance limit for each version of the designed structure is economically inexpedient, as fire tests are a labour-intensive and expensive process. Software modelling of fire effects on structures is a complex and time-consuming task, based on fundamental physical laws of heat engineering and solid mechanics.

Goals. Analysis of software complexes and determination of their functional capabilities for modelling and performing interdisciplinary analysis in order to choose the most suitable one for calculations of structures and their assemblies under fire conditions.

Tasks. Analysis of the basic principles of fundamental physical laws and their representation in the finite element method, analysis of the reliability of the calculation results of each of their calculation complexes, recommendations on the choice of a software complex used in the calculation of structures during a fire.

Analytical part. During software packages analysis, the following issues were considered: the physical laws embedded in the calculation model of the structure operation during and after fire exposure, their interpretation in the finite element method, analysis of the most common software available on the market and designed to solve problems related to solid mechanics and heat engineering. Evaluation criteria for software packages were formulated and the results were summarized in a comparative table. The choice of the most suitable software is made on the results of the comparative table. The functional capabilities of the software systems were analyzed and a typical static problem for calculation in each of the PCs was formulated.

Conclusions. The comparative analysis of software complexes showed that for solving problems related to the impact on building structures of high temperatures during a fire, the most suitable software complex is ANSYS. It allows modelling and combining both static and thermal effects.

Keywords: deformations; finite element modelling; comparative analysis; software; interdisciplinary calculations; high temperature exposure; solid mechanics; heat transfer

For citation: Lanskoj P.S., Korolchenko D.A. Analysis of existing specialized software suitable for calculations and solving interdisciplinary tasks in modelling fire effects on building structures. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2023; 32(6):13-24. DOI: 10.22227/0869-7493.2023.32.06.13-24 (rus).

✉ Pavel Sergeevich Lanskoj, e-mail: 6451187@mail.ru

Введение

Стальные каркасы зачастую представляют собой набор рам, соединенных в единую пространственную систему для обеспечения жесткости и устойчивости. Прочность, жесткость и устойчивость каркаса в целом обусловлены прочностью составляющих его рам. Сами рамы являются геометрически неизменяемой системой, образованной системой колонн и балок, жестко, либо шарнирно соединенных между собой и основанием.

Точное определение жесткостей и типа соединений лежит в основе проектирования и расчета конструкции зданий и сооружений. Стоит отметить, что проектирование и расчеты выполняются в основном на восприятие эксплуатационных нагрузок и температурных диапазонов. Однако во время пожара конструкции подвергаются огневому воздействию и работают за пределами эксплуатационных температур и воздействий. В соответствии с нормативно-правовыми актами РФ, в частности 123 ФЗ ст. 35¹, к конструкциям предъявляются требования по огнестойкости: их способности сопротивляться воздействию пожара, сохраняя свои эксплуатационные характеристики в течение определенного временного интервала. Одним из признаков наступления

предела огнестойкости является потеря несущей способности.

В соответствии с ГОСТ 30247.0–94², потеря несущей способности возникает вследствие обрушения конструкции или возникновения предельных деформаций, потеря целостности — в результате образования в конструкциях сквозных трещин или отверстий, потеря теплоизолирующей способности — вследствие повышения температуры на не обогреваемой поверхности конструкции до предельных для данной конструкции значений.

С точки зрения моделирования и расчета конструкций процесс потери несущей способности обусловлен несколькими факторами: изменением расчетной схемы и граничных условий — обрушение части конструкций; изменение типов закреплений и соединений конструкций — изменение свойств узлов и появление дополнительных степеней свободы; изменение жесткостей конструкций — изменение физических характеристик материалов; изменение характера нагружения конструкций — появление дополнительных усилий вследствие температурных расширений.

Стоит отметить, что огнестойкость здания и его конструкций связаны не только с обеспечением безопасной эвакуации людей при пожаре, но и со снижением влияния сопутствующих проявлений опасных

¹ ФЗ «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности» от 22.07.2008 № 123-ФЗ. Ст. 35 «Классификация строительных конструкций по огнестойкости».

² ГОСТ 30247.0–94. Конструкции строительные. Методы испытаний на огнестойкость. Общие требования различают основные виды предельных состояний строительных конструкций.

факторов пожара (таких как обрушение конструкций здания) в ходе ликвидации пожара. Таким образом, изучение и прогнозирование поведения несущих конструкций зданий в экстремальных условиях пожара является сложной и важной задачей.

Современное проектирование неразрывно связано с информационными технологиями, значительно упрощающими и ускоряющими сам процесс разработки проектной документации, моделирования и проверочных расчетов.

С развитием вычислительных средств появилось много программных комплексов, предназначенных для решения сложных инженерных задач.

В основе большинства расчетных комплексов лежит Метод конечных элементов (МКЭ), представляющий собой эффективный численный метод решения инженерных и физических задач. Предполагается, что цельная конструкция рассматривается как совокупность отдельных конечных элементов [1].

МКЭ наиболее эффективен при возрастающих вычислительных мощностях ЭВМ, ускоряющих сложные численные расчеты. Соответственно, совершенствовались вычислительные программы, реализующие этот метод.

Основные принципы, заложенные в МКЭ [2]:

1. Любые непрерывные величины, такие как перемещение, температура, давление и пр. могут быть аппроксимированы дискретной моделью. Построение модели основано на множестве кусочно-непрерывных функций, определенных на конечном числе подобластей — элементах (конечных элементах).

2. Кусочно-непрерывные функции определяются с помощью значений непрерывной величины в конечном фиксируемом числе точек рассматриваемой области. Эти точки называются узлами.

3. Значение непрерывной величины в каждой узловой точке считается переменной, которая должна быть определена.

4. Непрерывная величина аппроксимируется на каждом элементе функцией, которая определяется с помощью узловых значений этой величины. Непрерывность величины сохраняется вдоль границ элемента.

5. Объекты исследования могут иметь различную форму и физическую природу, будь то твердые тела, жидкости, газы или электромагнитные среды и др.

Алгоритм решения задач МКЭ при выполнении прочностных расчетов сводится к следующим этапам:

1. Построение расчетной модели.
2. Создание сетки конечных элементов.
3. Задание граничных условий расчета и назначение нагрузок.

4. Выбор физико-математической модели, описание расчетной схемы, физических характеристик ее элементов.

5. Выполнение расчетов для определения усилий в элементах и перемещений в узлах.

6. Анализ полученных результатов.

Уравнения, составляющие математическую модель, можно разбить на три группы:

- 1) статические уравнения (уравнения равновесия);
- 2) геометрические уравнения (уравнения неразрывности деформаций);
- 3) физические уравнения (уравнения, связывающие внутренние силы или напряжения с деформациями тела).

Для условий нормальной (проектной) эксплуатации в большинстве случаев прочностные расчеты выполняются в статической постановке. Но в условиях пожара в расчетах необходимо также учитывать и тепловые воздействия на конструкции. Что подразумевает решение междисциплинарной задачи.

Целью данного исследования является анализ программных комплексов и определение их функциональных возможностей по моделированию и выполнению междисциплинарных прочностных расчетов для выбора наиболее подходящего для решения задач по поведению строительных конструкций и их узлов в условиях пожара. Таким образом, для выбора оптимального программного комплекса необходимо решить следующие задачи: подобрать и проанализировать критерии оценки программных комплексов, проанализировать результаты расчетов каждого программного комплекса на примере решения типовой задачи, для оценки результатов расчета типовой задачи каждым из расчетных комплексов необходимо разобрать интерпретацию физических законов в методе конечных элементов, подготовить рекомендации по выбору программного комплекса, применяемого при расчете конструкций во время пожара.

Аналитическая часть

Физические законы, применяемые при построении и расчете математической модели каркаса при огневом воздействии

В основу всех рассматриваемых комплексов заложены основные фундаментальные физические законы, описывающие деформации тел, их контактное взаимодействие, трение, теплопередачу, линейное расширение. Все эти законы отражаются в методе конечных элементов в виде системы алгебраических уравнений (СЛАУ). Количество этих уравнений зависит от количества конечных элементов. А вид этих уравнений определен самими физическими законами.

В первую очередь закон Гука [3], согласно которому материал деформируется линейно упруго:

$$F = k\Delta l, \quad (1)$$

где F — сила, которой растягивают (сжимают) стержень;

k — коэффициент упругости (или жесткости);

Δl — абсолютное удлинение (сжатие) стержня.

Интерпретация при решении задач статического анализа с использованием МКЭ:

$$[K]\{U\} = \{F\}, \quad (2)$$

где $[K]$ — глобальная матрица жесткости;

$\{U\}$ — вектор перемещений (матрица-столбец);

$\{F\}$ — вектор нагрузок (матрица-столбец).

Второй закон, в котором заложены основные фундаментальные физические законы, контактное взаимодействие [4] — это метод множителей Лагранжа [5].

К потенциальной энергии системы двух тел, входящих в контакт, добавляется потенциал контактных сил вида:

$$W_c = \int_{\Gamma_c} \Lambda(x^{(1)} - x^{(2)}) d\Gamma, \quad (3)$$

где Γ_c — поверхность контакта между телами B_1 и B_2 ;

Λ — функция множителей Лагранжа, имеющая смысл вектора поверхностных контактных сил;

$x^{(i)} = X^{(i)} + u^{(i)}$ — актуальные положения соответствующих сходственных точек тел ($i = 1, 2$) на поверхности контакта;

$X^{(i)}$ — исходные положения сходственных точек;

$u^{(i)}$ — получаемые перемещения сходственных точек.

Интерпретация при решении задач статического анализа с использованием МКЭ:

$$\begin{pmatrix} K_1 & 0 \\ 0 & K_2 & L_1 \\ & L_2 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} U_1 \\ U_2 \\ \Lambda \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} F_1 \\ F_2 \\ G \end{pmatrix}, \quad (4)$$

где K_1 и K_2 — матрицы жесткости, получаемые с помощью МКЭ для упругой деформации 1 и 2-го тела соответственно;

L_1, L_2 — добавочные блоки, соответствующие множителям Лагранжа;

$U_i = \{u_1^{(i)}, \dots, u_{N_i}^{(i)}\} T$ — вектор узловых перемещений для i -го тела, $i = 1, 2$;

$F_i = \{f_1^{(i)}, \dots, f_{N_i}^{(i)}\} T$ — вектор внешних сил для i -го тела, $i = 1, 2$;

$\Lambda = \{\lambda_1, \dots, \lambda_m\}$ — дискретизированные множители Лагранжа;

$G = \{g_1, \dots, g_m\}$ — разрывы, соответствующие парам контактных узлов;

m — число контактных пар.

Третий закон — это закон Кулона, трение между элементами. В случае контакта на совместной границе контактирующих тел возникают распределенные поверхностные силы, обозначаемые $\mathbf{t}$. Нормальная и касательная составляющие распределенной контактной силы, действующей на любое из тел, имеют вид:

$$\begin{aligned} m &= \mathbf{t} \cdot \mathbf{n} \leq 0; \\ tt &= \mathbf{t} \cdot \boldsymbol{\tau}, \end{aligned} \quad (5)$$

где $\mathbf{n}$ — внешняя нормаль к контактной поверхности данного тела;

$\boldsymbol{\tau}$ — касательный вектор к контактной поверхности тела.

На контактной поверхности могут быть поставлены условия одного из следующих типов:

1. Скольжение без трения. В случае, если на контактной поверхности реализуется условие скольжения без трения, касательные контактные силы принимаются равными нулю:

$$tt = 0. \quad (6)$$

2. Прилипание. Если на контактной поверхности имеет место прилипание, то касательные контактные силы не зависят от нормальных контактных сил, но и не равны нулю.

3. Трение. Касательные контактные силы подчиняются закону Кулона, т.е. контактирующие тела неподвижны друг относительно друга до тех пор, пока выполняется неравенство:

$$|tt| \leq \mu_s |m|, \quad (7)$$

где $\mu_s > 0$ — статический коэффициент трения.

Следующее фундаментальное уравнение — это уравнение теплопроводности — закон Фурье [6]:

$$q = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x}, \quad (8)$$

где q — величина теплового потока, Дж/(м²·с);

T — температура; коэффициент теплопроводности, Дж/(м·с·К).

Интерпретация при решении задач статического анализа с использованием МКЭ [7]:

$$[K]\{T\} = \{F\}, \quad (9)$$

где $[K]$ — глобальная матрица теплопроводности (жесткости);

$\{T\}$ — температура в узле (матрица-столбец);

$\{F\}$ — граничное условие (матрица-столбец).

При решении нестационарной задачи теплопроводности в уравнение равновесия включается матрица теплопоглощения (демпфирования) C :

$$KT + C \frac{\partial}{\partial t} T = F. \quad (10)$$

И, наконец, основной закон теплового расширения. Изменение линейных размеров и формы тела при изменении его температуры:

$$\Delta L = \alpha L \cdot \Delta T, \quad (11)$$

где ΔL — величина;

αL — величина;

ΔT — величина.

Вышеперечисленные фундаментальные физические законы применяются для решения прикладных задач [8], связанных как с механикой твердого тела, так и с теплопереносом.

Ввиду того что в условиях пожара конструкции подвержены термическому воздействию, существенно превышающему стандартные эксплуатационные значения, важно учитывать влияние тепловых воздействий на конструкции и их элементы. Таким образом, при огневом воздействии проверочные расчеты несущей способности конструкций сводятся к решению междисциплинарной задачи.

Описание наиболее распространенных программных комплексов, пригодных для статических и теплотехнических расчетов

В данном исследовании рассматриваются следующие расчетные комплексы:

1. ABAQUS UNIFIED FEA.
2. ANSYS.
3. Autodesk Inventor Nastran.
4. Robot Structural Analysis Professional.
5. SCAD.
6. ЛИРА 10.

ABAQUS — универсальный многоцелевой программный комплекс общего назначения, предназначенный для междисциплинарного анализа в областях общей механики, машиностроения, электроники и автомобилестроения [9–11], состоящий из различных модулей, предназначенных для решения задач методом конечных элементов с учетом нелинейности свойств материалов и контактного взаимодействия тел.

Модуль Abaqus/Standard используется для анализа напряжений и перемещений в статической и динамической постановках, теплопередачи, диффузии масс, а также определения вязкоупругого и вязкопластического отклика.

Модуль Abaqus/Explicit применяется при расчетах и анализе кратковременных динамических и квазистатических процессов; анализа термопроч-

ности; определения общего контакта; взрывных воздействий [12]^{3,4}.

Модуль Abaqus/Design позволяет решать задачи, связанные с чувствительностью конструкции к геометрическим изменениям.

Модуль Abaqus/Aqua направлен на расчет подводных и надводных сооружений.

В программном комплексе ABAQUS реализована возможность выполнять междисциплинарные расчеты: механика твердого тела — тепловой перенос (возможно как последовательное, так и полностью сопряженное решение); тепловой перенос — электричество; поток в пористой среде — механика твердого тела; напряжения — диффузия массы; пьезоэлектрика; акустика — вибрации.

ANSYS — универсальный многоцелевой программный комплекс, в основу которого заложен метод конечных элементов. В состав комплекса входит 30 модулей, предназначенных для решения различных узконаправленных задач при помощи математических моделей, описывающих конкретные физические явления и численные методы их решения. Инструментами для проведения расчетного анализа являются [2, 13]:

1. Fluid Mechanics — решение задач, связанных с течением жидкости и газа.
2. Structural Mechanics — решение задач динамики и прочности.
3. Electromagnetics — решение задач, связанных с работой различных компонентов радиоэлектроники, систем автоматики, электрических машин и приборостроения.

Реализовано решение междисциплинарных задач на основании комплексной связки нескольких типов решателей. Расчетные модули, соответствующие определенным инструментам, сведены в табл. 1.

Взаимосвязь и передачу необходимой информации между приложениями с разными видами анализа осуществляет платформа Workbench, она также демонстрирует последовательность расчетов, их систематизацию и хранение.

Autodesk Robot Structural Analysis [14] — программа, в основу которой заложен метод конечных элементов, предназначенная для решения задач по механике твердого тела.

³ Лавриненков А.Д., Якимов И.Д., Левадный Е.В., Бойко А.Б., Остапов А.В., Зигинов Н.В. Электронное методическое пособие «SIMULIA Abaqus. Решение прикладных задач». Ч. 1. М.: ТЕСИС, 2015. 121 с. URL: https://tesis.com.ru/infocenter/downloads/abaqus/abaqus_apptask.pdf

⁴ Крючков А.Э., Арсланова Л.И., Дияров К.А., Маликов П.В., Мальгин М.Г., Самигуллина Л.Г. и др. Электронное методическое пособие «SIMULIA Abaqus. Решение прикладных задач». Ч. 2. М.: ТЕСИС, 2018. 160 с. URL: https://tesis.com.ru/infocenter/downloads/abaqus/Abaqus_apptask2.pdf

Таблица 1. Расчетные модули
Table 1. Calculation modules

Механика жидкости Fluid Mechanics	Fluent, CFX, Icepak, CFD-Flow, Vista TF, Icem CFD, TurboGrid, TGrid, BladeModeler, CFD-Post
Структурная механика Structural Mechanics	Static Structural, Transient Structural, Rigid Dynamics, Steady-State Thermal, Transient Thermal, Linear Buckling, nCode, Harmonic Response, Random Vibration, Modal, Response Spectrum, Explicit Dynamics/AUTODYN
Электро-магнетизм Electromagnetics	Maxwell, RMXprt, PEXprt, Simplorer

Программный комплекс позволяет выполнять статический расчет (линейный и нелинейный), динамический расчет (расчет форм колебаний, гармонический, сейсмический, спектральный, временной), анализ предельного равновесия.

Одной из отличительных особенностей программного комплекса является прямая двусторонняя связь с программой Autodesk Revit, что позволяет существенно упростить процесс подготовки расчетной модели при комплексном проектировании зданий и сооружений.

Autodesk Inventor Nastran⁵ — программный комплекс, основанный на методе конечных элементов, применяется для расчетов задач механики твердого деформируемого тела, устойчивости, динамических и нелинейных процессов, определения собственных и критических частот и форм колебаний, анализа контактных взаимодействий, аэроупругости, а также для решения задач теплопереноса и акустики⁵. Не имеет собственного графического редактора, он интегрируется в CAD-системы Autodesk Inventor⁵ и Solidworks.

Ключевой особенностью является интеграция в системы проектирования Autodesk Inventor и Solidworks, что упрощает процесс создания геометрии и моделирования.

Задачи, которые позволяет рассчитывать программный комплекс Autodesk Nastran in-cad: линейный статический анализ; расчет устойчивости; стационарный тепловой расчет; расчет композитных материалов; модальный анализ; модальный анализ с учетом предварительной нагрузки; расчет сборок с условиями контакта; расчет температурных напряжений; нелинейный статический анализ; нестационарный тепловой расчет; расчет вынужденных колебаний; расчет динамических нагрузок; тепловой расчет с нелинейными граничными условиями; отклик на случайные

частотные нагрузки; учет пластических и гиперупругих свойств материалов; расчет падения тела.

SCAD (Structure CAD) [15] — программный вычислительный комплекс, предназначенный для решения задач механики твердого тела. В его основу заложен метод конечных элементов, позволяющий определить напряженно-деформированное состояние конструкций от статических и динамических воздействий.

Программный комплекс состоит из следующих программ/модулей [16]:

1. Расчет и проектирование металлических конструкций — КРИСТАЛЛ, СЕЗАМ, КОМЕТА.
2. Расчет и проектирование оснований и фундаментов — КРОСС, ОТКОС, ЗАПРОС.
3. Расчет и проектирование каменных конструкций — КАМИН.
4. Расчет и проектирование монолитных конструкций — АРБАТ, МОНОЛИТ.
5. Расчет и проектирование деревянных конструкций — ДЕКОР.
6. Расчет и проектирование сечений — ТОНУС, КОНСУЛ, Конструктор сечений.
7. Модуль КоКон — Электронный справочник для определения коэффициентов концентрации напряжений.

8. Модуль BeCT предназначен для расчета нагрузок по СП 20.13330–2016⁶.

9. Модуль SCAD Office предназначен для проектирования стальных и железобетонных конструкций.

ЛИРА — программный комплекс, предназначенный для проектирования и расчета конструкций различного назначения. В основе расчетного комплекса лежит метод конечных элементов, позволяет производить расчеты и вычисления в различных областях механики, машиностроения и строительства [17].

Производимые расчеты: прочность и устойчивость; железобетонные здания и сооружения; металлические конструкции; деревянные конструкции; мосты и трубы; строительство в сейсмически активных районах; расчет нестандартных сечений.

Специальные возможности: расчет на статические и динамические нагрузки; геометрически и физически нелинейные расчеты; расчеты с учетом поэтапного возведения конструкций; расчет плитных, ленточных и свайных фундаментов; расчет фильтрации; решение задачи теплопроводности; вариантное проектирование; расчет с учетом динамики во времени.

Задачи, которые программный комплекс ЛИРА 10 позволяет рассчитывать и анализировать: линейные и нелинейные статические задачи; линейные задачи в динамической постановке, представленной в виде собственных форм колебаний; определять упруго-

⁵ Autodesk Nastran 2024: Nonlinear Analysis Handbook. © Autodesk, Inc., 2023. С. 38, 636, 58.

⁶ СП 20.13330.2016. Нагрузки и воздействия.

геометрические характеристики поперечных сечений стержней; выполнять расчеты температурных полей и проводить вычисления фильтрации в насыщенном влагой грунте.

Расчеты в программных комплексах ANSYS, Autodesk Inventor Nastran, SCAD, Robot Structural Analysis Professional

В рамках данного исследования был выполнен расчет плоской рамы следующего вида (рис. 1).

По сортаменту СТО АСЧМ 20–93⁷ и ТУ 0925-036-00186269–2016⁸.

Материалом конструкции принята сталь марки С245 по сортаменту: «Прокат, использующий статистическую процедуру контроля его свойств»⁹ (кроме классов С590, С590К).

Узлы сопряжения колонн с балками приняты жесткими.

Колонны жестко сопряжены с основанием: перемещения и поворот исключены.

К раме приложены следующие нагрузки:

- собственный вес конструкций;
- сосредоточенная нагрузка величиной в 10,8 кН, приложенная к середине пролета балки.

Расчетная схема представлена на рис. 2.

Результаты расчета программного комплекса ANSYS даны на рис. 3.

Результаты расчета программного комплекса Autodesk Inventor Nastran показаны на рис. 4.

Результаты расчета программного комплекса SCAD представлены на рис. 5.

Результаты расчета программного комплекса ЛИРА 10 показаны на рис. 6.

Результаты расчета программного комплекса Robot Structural Analysis Professional даны на рис. 7.

Для равных начальных условий рассматриваемая плоская рама был смоделирована в программе Advance Steel и экспортирована в рассматриваемые расчетные программные комплексы.

Рассматриваемые программные комплексы можно разделить на две группы по принципу построения расчетной модели: 1-я группа — основанные на стержневых моделях: SCAD; ЛИРА 10; Robot Structural Analysis Professional; 2-я группа — основанные на твердотельных моделях: Autodesk Inventor Nastran; Ansys; ABAQUS UNIFIED FEA.

Так как принципы построения расчетных моделей и разбиения их на сетки конечных элементов

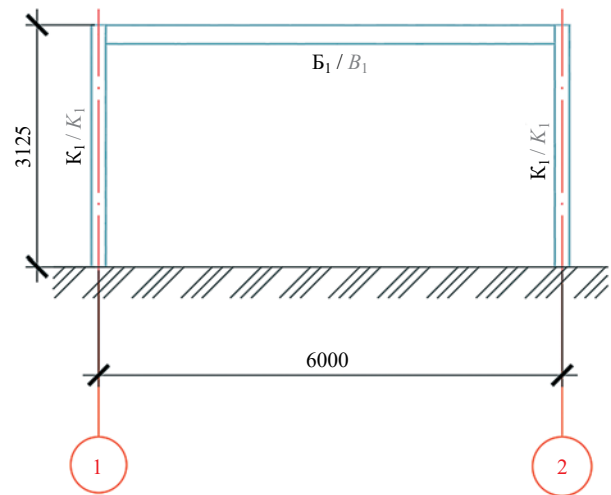


Рис. 1. Типовая стальная рама: B_1 — двутавр прокатный 25Б2; K_1 — двутавр прокатный 20К2

Fig. 1. Standard steel frame: B_1 — rolled I-beam 25B2; K_1 — rolled I-beam 20K2

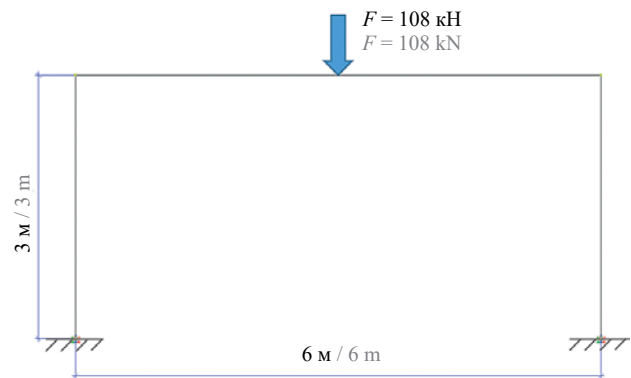


Рис. 2. Расчетная схема

Fig. 2. Calculation scheme

у программных комплексов различаются (стержневые и твердотельные модели), количество конечных элементов существенно разнится. Стержневая модель является упрощенным представлением реальной конструкции, в то время как твердотельная модель наиболее достоверно отображает ее поведение за счет большего количества конечных элементов.

Ввиду вышеупомянутого различия в количестве конечных элементов и точности получаемых результатов в данной работе сравниваются максимальные значения перемещений конструкции и характер/форма деформации.

Стоит отметить, для импортированной из Advance Steel трехмерной модели расчетный комплекс ABAQUS UNIFIED FEA создает непригодную для дальнейших расчетов сетку конечных элементов и прерывает вычисления.

При решении типовой задачи максимальные перемещения для комплексов составили:

- SCAD — 22,272 мм;
- ЛИРА 10 — 22,277 мм;

⁷ СТО АСЧМ 20–93. Прокат стальной сортовой фасонного профиля.

⁸ ТУ 0925-036-00186269–2016. Двутавры горячекатаные с параллельными гранями полок дополнительных профилей размеров к типам по СТО АСЧМ 20–93.

⁹ ГОСТ 27772–88. Прокат для строительных стальных конструкций. Общие технические условия.

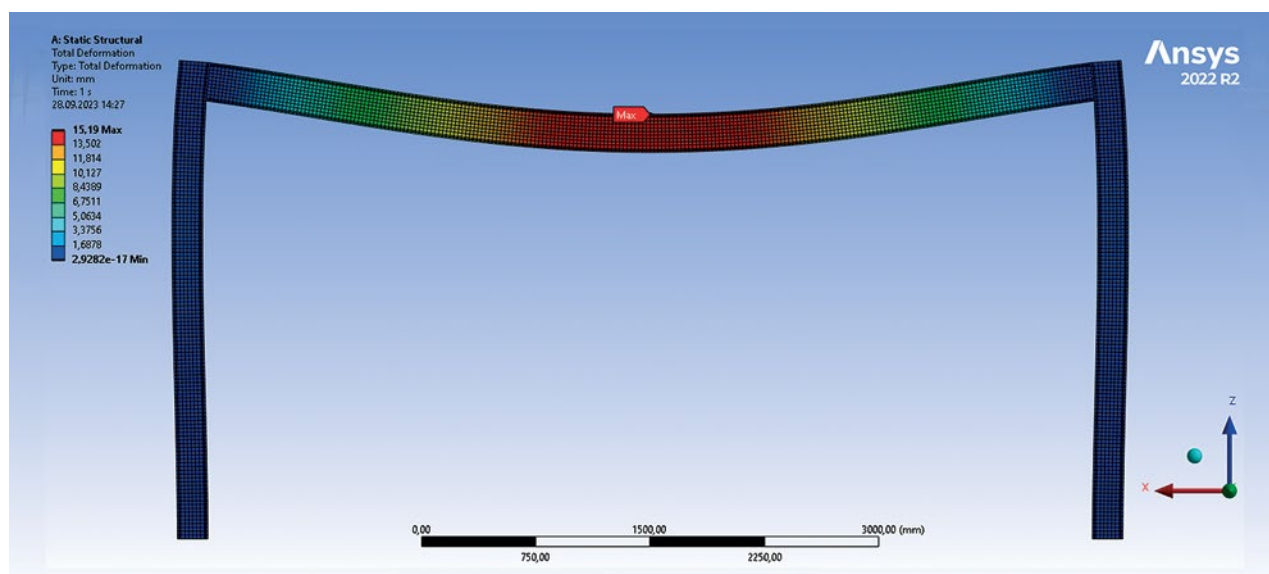


Рис. 3. Карта перемещений (расчет в ANSYS)

Fig. 3. Displacement map (ANSYS calculation)

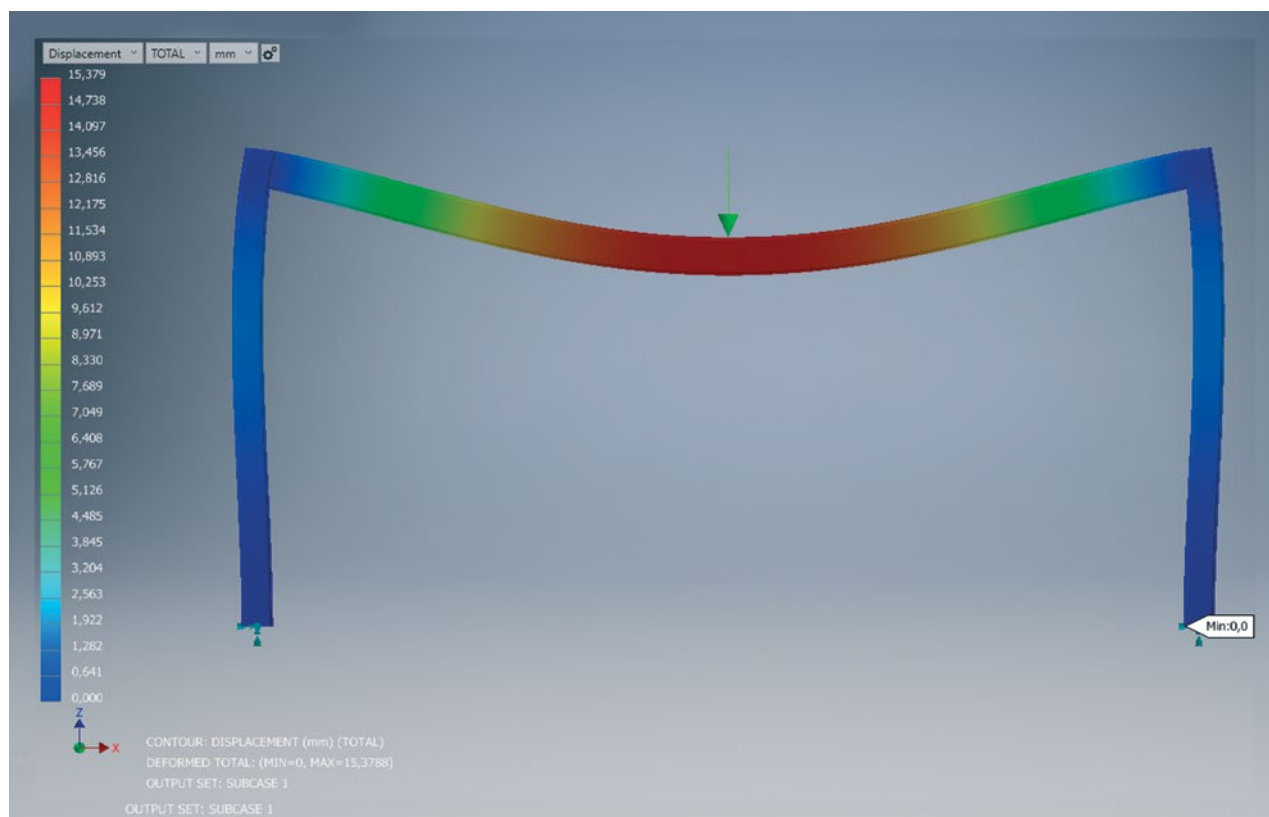


Рис. 4. Карта перемещений (расчет в Autodesk Inventor Nastran)

Fig. 4. Displacement map (Autodesk Inventor Nastran calculation)

- Robot Structural Analysis Professional — 22,728 мм;
- Autodesk Inventor Nastran — 15,379 мм;
- Ansys — 15,19 мм.

Отличие в результатах: Ansys — 15,19 мм; Autodesk Inventor Nastran — 15,37 связано с различиями в алгоритме разбиения модели на сетку конечных элементов.

Результаты расчетов идентичны внутри каждой группы и существенно отличаются в сравнении с результатами расчетов между разными группами.

Среднее квадратичное отклонение для результатов первой группы расчетных комплексов составляет 0,263272.

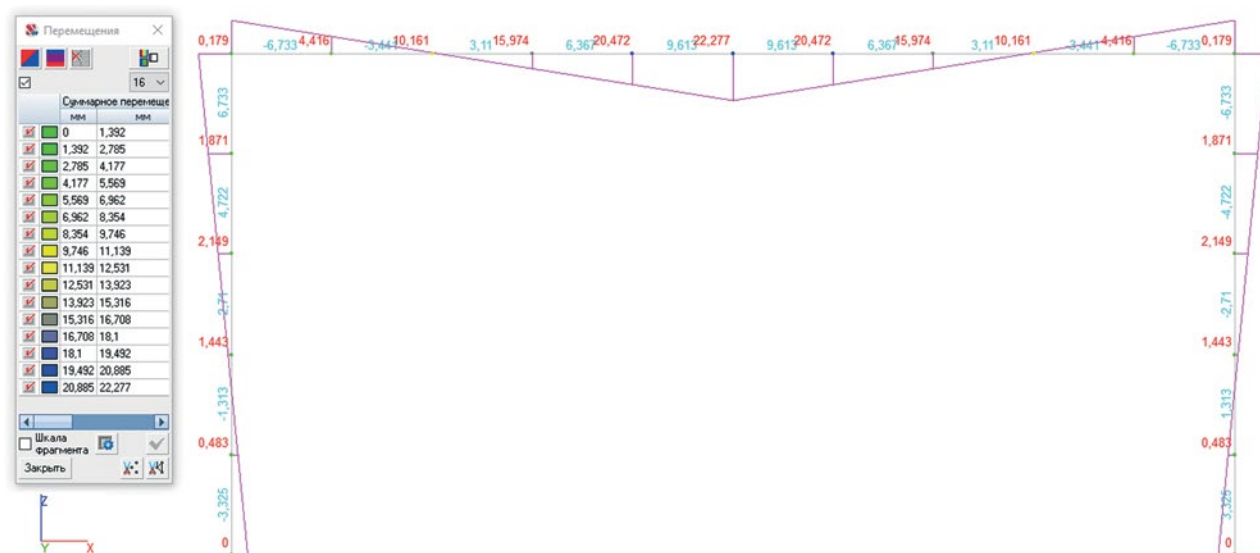


Рис. 5. Карта перемещений (расчет в SCAD)

Fig. 5. Displacement map (SCAD calculation)

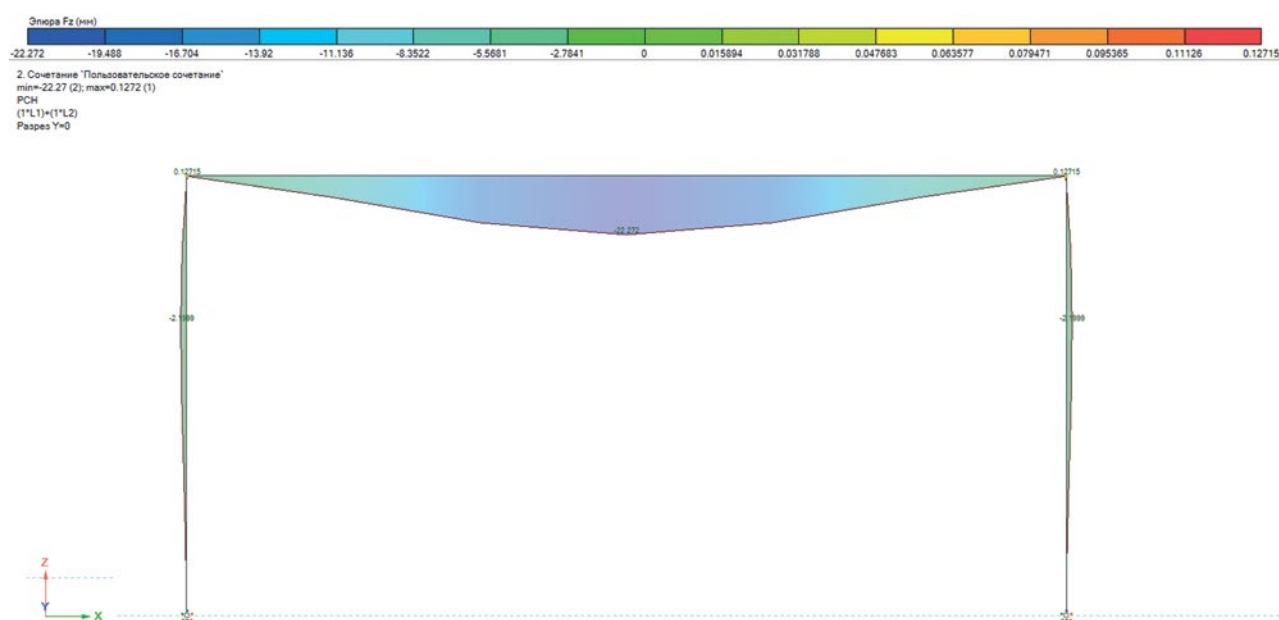


Рис. 6. Карта перемещений (расчет в ЛИРА 10)

Fig. 6. Displacement map (LIRA 10 calculation)

Среднее квадратичное отклонение для результатов второй группы расчетных комплексов составляет 0,127279.

Различие в результатах для первой и второй групп расчетных комплексов обусловлено принципиальным отличием в типе и количестве конечных элементов.

Критерии оценки программных комплексов

В данном исследовании предлагаются следующие критерии оценки [18]:

1. Оценка возможности выполнения прочностных расчетов (механика твердого тела).

2. Оценка возможности выполнения теплотехнических расчетов (теплоперенос).

3. Оценка возможности выполнения расчетов междисциплинарных расчетов — поочередных расчетов с учетом полученных ранее результатов решения как задач по механике твердого тела, так и теплотехнической задачи.

4. Оценка доступности учебно-методической документации для освоения программного комплекса.

5. Оценка простоты использования и освоения программного комплекса.



Рис. 7. Карта перемещений (расчет в Robot Structural Analysis Professional)

Fig. 7. Displacement map (Robot Structural Analysis Professional calculation)

Сравнение функциональных возможностей различных расчетных комплексов

Функциональные возможности рассмотренных программных комплексов сведены в сравнительную табл. 2 по ключевым критериям оценки.

Таблица 2. Сравнение функциональных возможностей расчетных различных комплексов

Table 2. Comparison of the functional capabilities of different calculation complexes

Наименование программного комплекса Software name	Решение задач механики твердого тела Solid state mechanics computing	Решение задач теплопереноса Thermostatic and heat transfer computing	Междисциплинарные расчеты Interdisciplinary computing	Наличие учебно-методической документации User guides and manuals	Простота использования Usability
ABAQUS UNIFIED FEA	+	+	+	+	–
ANSYS	+	+	+	+	+
Autodesk Inventor Nastran	+	+	+	–	+
Robot Structural Analysis Professional	+	–	–	+	+
SCAD	+	–	–	+	+
ЛИРА 10 LIRA 10	+	+	–	+	+

Выводы

В ходе исследования были рассмотрены основные физические законы и их интерпретация при использовании решения задач методом конечных элементов. Рассмотрен МКЭ, заложенный в основу рассматриваемых программных комплексов.

При анализе программных комплексов в каждом из них был выполнен расчет типовой рамы и получены численные результаты по деформациям и перемещениям. Рассмотренные программные комплексы были разделены на две группы по типу используемых конечных элементов, их количеству и полученным результатам.

Проанализированы функциональные возможности рассматриваемых в исследовании программных комплексов. Определена их применимость в рамках решения междисциплинарной задачи.

Была выполнена оценка программных комплексов по сформулированным критериям оценки программного обеспечения, результаты были сведены в сравнительную табл. 2.

Проведя сравнительный анализ программных комплексов, можно выделить ANSYS как наиболее подходящий для прочностных расчетов конструкций и их узлов в условиях пожара. Комплекс позволяет решать задачи, связанные с междисциплинарными расчетами с учетом физической нелинейности материалов.

В рамках дальнейших исследований целесообразно сравнить результаты расчетов с натурными испытаниями.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Сегерлинд Л. Применение метода конечных элементов. М. : МИР, 1979. 392 с.
2. Пронин В.А., Жигновская Д.В., Цветков В.А. Введение в расчетную платформу ANSYS Workbench: Лабораторные работы. Часть 1 : учебное пособие. СПб. : Университет ИТМО, 2019. 46 с.
3. Маковкин Г.А., Лихачева С.Ю. Применение МКЭ к решению задач механики деформируемого твердого тела : учебное пособие. Н. Новгород : ННГАСУ, 2012. 73 с.
4. Галанин М.П., Прошунин Н.Н., Родин А.С. Численное решение динамической задачи контакта упругопластических тел // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша. 2018. № 139. 31 с. DOI: 10.20948/prepr-2018-139
5. Лукин В.В., Соломенцева П.В. Модификация метода множителей Лагранжа с независимой контактной границей для моделирования контакта упругих тел // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша. 2020. № 70. 26 с. DOI: 10.20948/prepr-2020-70
6. Крайнов А.Ю., Миньков Л.Л. Численные методы решения задач тепло- и массопереноса : учебное пособие. Томск : ТГУ, 2016. 92 с.
7. Жуков Н.П., Майникова Н.Ф., Никулин С.С., Антонов А.О. Решение задач теплопроводности методом конечных элементов : учебное пособие. Тамбов : ФГБОУ ВПО ТГТУ, 2014. 80 с.
8. Каменев С.В. Основы метода конечных элементов в инженерных приложениях : учебное пособие. Оренбург : ОГУ, 2019. 110 с.
9. Фёдорова Н.Н., Вальгер С.А., Данилов М.Н., Захарова Ю.В. Основы работы в ANSYS 17. М. : ДМК Пресс, 2017. 210 с.
10. Rahnavard R., Siahpolo N., Naghavi M., Hassanipour A. Analytical study of common rigid steel connections under the effect of heat // Advances in Civil Engineering. 2014. Vol. 2014. P. 1–10. DOI: 10.1155/2014/692323
11. Zhou Q., Li J., Dong Z., Han F. Temperature field analysis of light steel structure beam-column composite joint // Journal of Physics: Conference Series. 2020. Vol. 1578. P. 012240. DOI: 10.1088/1742-6596/1578/1/012240
12. Рыжов С.А., Ильин К.А., Тропкин С.Н., Нуштаев Д.В., Бородин А.К. и др. SIMULIA Abaqus. Начало работы : учебное пособие. М. : ТЕСИС, 2021. 287 с.
13. Majeed A. Ansys software for mechanical engineering. Faridabad : Manav Rachna International University, 2022. P. 105. DOI: 10.13140/RG.2.2.18076.97927
14. Marsh K. Robot structural analysis: Making the change. Somerville : Marsh API LLC, 2015. 98 p.
15. Карпиловский В.С., Криксунов Э.З., Маляренко А.А., Фиалко С.Ю., Перельмутер А.В., Перельмутер М.А. SCAD Office. Вычислительный комплекс SCAD. М. : Изд-во СКАД СОФТ, 2011. 656 с.
16. Теплых А.В., Ожогин Р.Б. Новые возможности SCAD Office 21.1.9.5 // Промышленное и гражданское строительство. 2020. № 4. С. 43–47. DOI: 10.33622/0869-7019.2020.04.41-47
17. Ковальчук О.А., Колесников А.В., Русанова Е.М., Суворов Р.Н. Введение в программный комплекс ЛИРА 10.4 : учебное пособие. М. : МИСИ – МГСУ, 2015. 185 с.
18. Еремينا Т.Ю., Корольченко Д.А. Обзор программного обеспечения расчета огнестойкости строительных конструкций для различных моделей пожаров // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2020. Т. 29. № 3. С. 44–53. DOI: 10.22227/PVB.2020.29.03.44-53

REFERENCES

1. Segerlind L. *Application of the finite element method*. Moscow, MIR Publ., 1979; 392. (rus).
2. Pronin V.A., Zhignovskaya D.V., Tsvetkov V.A. *Introduction to the ANSYS Workbench computing platform : Laboratory work. Part 1 : textbook*. St. Petersburg, ITMO University, 2019; 46. (rus).
3. Makovkin G.A., Likhacheva S.Yu. *Application of FEM to solving problems in mechanics of a deformable solid : textbook*. Nizhny Novgorod, NNGASU, 2012; 73. (rus).
4. Galanin M.P., Proshunin N.N., Rodin A.S. Numerical solution of the dynamic contact problem of elasto-plastic bodies. *Keldysh Institute Preprints*. 2018; 139:1-31. DOI: 10.20948/prepr-2018-139 (rus).
5. Lukin V.V., Solomentseva P.V. Modification of the Lagrange multiplier method with an detached contact boundary for modeling the contact of elastic bodies. *Keldysh Institute Preprints*. 2020; 70:1-26. DOI: 10.20948/prepr-2020-70 (rus).
6. Krainov A.Yu., Minkov L.L. *Numerical methods for solving problems of heat and mass transfer : textbook*. Tomsk, TSU, 2016; 92. (rus).
7. Zhukov N.P., Mainikova N.F., Nikulin S.S., Antonov A.O. *Solving heat conduction problems using the finite element method : textbook*. Tambov, FSBEI HPE “TSTU”, 2014; 80. (rus).
8. Kamenev S.V. *Fundamentals of the finite element method in engineering applications : textbook*. Orenburg, OSU, 2019; 110 (rus).

9. Fedorova N.N., Valger S.A., Danilov M.N., Zakharova Yu.V. *Basics of work in ANSYS 17*. Moscow, DMK Press, 2017; 210. (rus).
10. Rahnavard R., Siahpolo N., Naghavi M., Hassanipour A. Analytical study of common rigid steel connections under the effect of heat. *Advances in Civil Engineering*. 2014; 2014:1-10. DOI: 10.1155/2014/692323.
11. Zhou Q., Li J., Dong Z., Han F. Temperature field analysis of light steel structure beam-column composite joint. *Journal of Physics: Conference Series*. 2020; 1578:012240. DOI: 10.1088/1742-6596/1578/1/012240
12. Ryzhov S.A., Ilyin K.A., Tropkin S.N. et al. *SIMULIA Abaqus. Getting started : tutorial*. Moscow, TESIS, 2021; 287 (rus).
13. Majeed A. *Ansys Software for Mechanical Engineering*. Faridabad, Manav Rachna International University, 2022; 105. DOI: 10.13140/RG.2.2.18076.97927
14. Marsh K. *Robot Structural Analysis: Making the Change*. Somerville, Marsh API LLC, 2015; 98.
15. Karpilovsky V.S., Kriksunov E.Z., Malyarenko A.A. et al. *SCAD Office. Computer complex SCAD*. Moscow, Publishing house SKAD SOFT, 2011; 656 (rus).
16. Teplykh A.V., Ozhogin R.B. New features of SCAD Office 21.1.9.5. *Industrial and civil construction*. 2020; 4:43-47. DOI: 10.33622/0869-7019.2020.04.41-47 (rus).
17. Kovalchuk O.A., Kolesnikov A.V., Rusanova E.M., Suvorov R.N. *Introduction to the LIRA 10.4 software package : textbook*. Moscow, MISS – MGSU, 2015; 185. (rus).
18. Eremina T.Yu., Korolchenko D.A. Overview of software designated for the analysis of fire resistance of building structures exposed to various fire models. *Pozharovzryvobezopasnost' / Fire and Explosion Safety*. 2020; 29(3):44-53. DOI: 10.22227/PVB.2020.29.03.44-53 (rus).

*Поступила 31.10.2023, после доработки 13.11.2023;
принята к публикации 17.11.2023*

*Received October 31, 2023; Received in revised form November 13, 2023;
Accepted November 17, 2023*

Информация об авторах

КОРОЛЬЧЕНКО Дмитрий Александрович, д-р техн. наук, доцент, директор Института комплексной безопасности в строительстве; Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет; Россия, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26; РИНЦ ID: 352067; Scopus AuthorID: 55946060600; ResearcherID: E-1862-2017; ORCID: 0000-0002-2361-6428; e-mail: ikbs@mgsu.ru

ЛАНСКОЙ Павел Сергеевич, преподаватель, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет; Россия, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26; РИНЦ ID: 9558-9900; ResearcherID: JOP-7507-2023; ORCID: 0000-0002-6184-0279; e-mail: 6451187@mail.ru

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about the authors

Dmitriy A. KOROLCHENKO, Dr. Sci. (Eng.), Docent, Head of Institute of Complex Safety in Construction, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Yaroslavl'skoe Shosse, 26, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RISC: 352067; Scopus AuthorID: 55946060600; ResearcherID: E-1862-2017; ORCID: 0000-0002-2361-6428; e-mail: ikbs@mgsu.ru

Pavel S. LANSKOY, Lecturer-Researcher, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Yaroslavl'skoe Shosse, 26, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RISC: 9558-9900; ResearcherID: OP-7507-2023; ORCID: 0000-0002-6184-0279; e-mail: 6451187@mail.ru

Contribution of the authors: all authors have made an equivalent contribution to the preparation of the publication.

The authors declare that there is no conflict of interest.