

ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ | NUMERICAL METHODS

Научная статья | Original paper

УДК 519.6:621.88

Применение современных информационных технологий для анализа прочности крепежных элементов при растяжении

А.Р. Мухутдинов¹ ✉, А.Р. Раимов¹, Т.А. Мухутдинов²

¹ Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский национальный исследовательский технологический университет», Казань, Российская Федерация

² Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань, Российская Федерация

✉ muhutdinov@rambler.ru

Резюме

Контекст и актуальность. Результаты использования современных информационных технологий от начальной стадии проектирования объекта до конечной стадии виртуального испытания, а также данные о закономерностях протекания процессов в моделируемых элементах и результаты вычислительного эксперимента в научной литературе практически отсутствуют. В связи с тем, актуальна разработка системного подхода к компьютерному моделированию прочности крепежных элементов и имеет научную новизну и практическую значимость.

Цель. Разработать и апробировать методику компьютерного моделирования прочности крепежных элементов при растяжении с использованием современных информационных технологий. **Методы и материалы.** Методика включает создание 3D-модели и расчет распределения напряжений и деформаций. Для апробации методики использован стандартный образец, результаты моделирования которого показали высокую точность и согласованность со справочными данными. **Результаты.** Разработана и отработана комплексная методика компьютерного моделирования прочности крепежного элемента «Шпилька» за счет использования современных информационных технологий. Разработанная методика позволяет реализовать полный цикл компьютерного анализа — от построения трёхмерной модели до определения напряжений и деформаций при приложении растягивающих нагрузок. Результаты показали, что на основе



успешной апробации методика была применена к реальному крепежному элементу, при этом проведён сравнительный анализ прочностных характеристик для материалов Сталь 45 и Сталь 45Г. **Выводы.** Показано, что использование материала Сталь 45Г обеспечивает более высокий коэффициент запаса прочности, подтверждая эффективность предложенной методики для инженерного анализа и оптимизации конструкции и материала крепёжных элементов.

Ключевые слова: Компас 3D V23, APM-FEM, 3D-модель, испытание на растяжение, крепежный элемент «Шпилька», Сталь 45, Сталь 45Г

Для цитирования: Мухутдинов, А.Р., Раимов, А.Р., Мухутдинов, Т.А., Мухутдинов, Т.А. (2026). Применение современных информационных технологий для анализа прочности крепежных элементов при растяжении. *Моделирование и анализ данных*, 16(2), 166—179. <https://doi.org/10.17759/mda.2026160209>

Application of modern information technologies to analyze the tensile strength of fasteners

A.R. Mukhutdinov¹ ✉, A.R. Raimov¹, T.A. Mukhutdinov²

¹ Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Kazan National Research Technological University”, Kazan, Russian Federation

² Kazan (Volga Region) Federal University, Kazan, Russian Federation

✉ muhutdinov@rambler.ru

Abstract

Context and Relevance. The results of using modern information technologies from the initial design stage to the final stage of virtual testing, as well as data on the patterns of processes in the simulated elements and the results of a computational experiment, are practically absent in the scientific literature. Therefore, the development of a systems approach to computer modeling of the strength of fasteners is relevant and has scientific novelty and practical significance. **Objective.** To develop and test a methodology for computer modeling of the tensile strength of fasteners using modern information technologies. **Methods and Materials.** The methodology includes creating a 3D model, imposing tensile loads, generating a finite element mesh, and calculating the distribution of stresses and strains. To test the methodology, a standard sample was used, the modeling results of which demonstrated high accuracy and consistency with reference data. **Results.** A comprehensive methodology for computer modeling of the strength of a stud fastener has been developed and tested using modern information technologies. The developed methodology enables a full cycle of computer analysis — from constructing a 3D model to determining stresses and strains under tensile loads. The results showed that, based on successful testing, the methodology was applied to a real fastener, with a comparative analysis of the



strength properties of Steel 45 and Steel 45G. **Conclusions.** Using Steel 45G provides a higher safety factor, confirming the effectiveness of the proposed methodology for engineering analysis and optimization of fastener design and material.

Keywords: Kompas 3D V23, APM-FEM, 3D model, tensile test, fastener «Stud», Steel 45, Steel 45G

For citation: Mukhutdinov, A.R., Raimov, A.R., Mukhutdinov, T.A., Mukhutdinov, T.A. (2026). Application of modern information technologies to analyze the tensile strength of fasteners. *Modelling and Data Analysis*, 16(2), 166—179. (In Russ.). <https://doi.org/10.17759/mda.2026160209>

Введение

В настоящее время все больше возрастает актуальность использования в материаловедении современных информационных технологий, в частности систем автоматизированного проектирования (САПР) (Котов и др., 2019, с. 250; Ганин, 2010, с. 360.; Мухутдинов, Ефимов, Вахидова, 2020, с. 28; Мухутдинов и др., 2021, с. 79; Кудрявцев Е.М., 2008, 300 с.; Дриц, Москалев, 1990, с. 446) (Kotov et al., 2019, p. 250; Ganin, 2010, p. 360.; Mukhutdinov, Efimov, Vakhidova, 2020, p. 28; Mukhutdinov et al., 2021, p. 79; Kudryavtsev E.M., 2008, 300 s.; Dritz, Moskalev, 1990, p. 446). Сегодняшний уровень развития программного 3D-моделирования позволяет не только создавать непосредственно объемные модели будущих изделий и их чертежи, но и провести исследование физико-механических свойств. Современные вычислительные комплексы дают возможность смоделировать испытания деталей для определения прочностных характеристик с учётом их конструкционных особенностей и свойств применяемых материалов (Дриц, Москалев, 1990, с. 446; Магомедов, Алехин, 2010, с. 1; APM FEM, 2022, с. 71) (Drits, Moskalev, 1990, p. 446; Magomedov, Alekhine, 2010, p. 1; APM FEM, 2022, p. 71).

На основе результатов моделирования проводится инженерный анализ проектируемого изделия, что позволяет выявлять потенциальные зоны концентрации напряжений и повышенные риски разрушения. Такие данные дают возможность оптимизировать конструкцию, изменить материал или форму детали ещё на стадии проектирования. Применение САПР, использующих численное моделирование, для решения задач прочности изделий, существенно экономит время и ресурсы, сокращает объёмы натуральных испытаний и позволяет более тщательно оптимизировать конструкцию. Поэтому применение цифровых инструментов анализа прочности становится важным элементом современного инженерного подхода.

Однако использование современных информационных технологий от начальной стадии проектирования объекта до конечной стадии виртуального испытания в литературе освещено недостаточно, а данные о закономерностях протекания процессов в моделируемых элементах и результаты вычислительного эксперимента практически отсутствуют. Это формирует актуальную научную и практическую проблему,



требующую разработки системного подхода к компьютерному моделированию прочности конкретных крепёжных элементов.

- Известно, что в конструкциях различных строительных систем есть множество элементов, которые должны надёжно соединяться и выдерживать постоянное движение и нагрузку. Шпилька -построение поверхности и объёма детали;
- задание параметров материала и физических свойств;
- подготовку модели к последующему численному анализу.

Этап 2. Проведение численного моделирования растяжения

На втором этапе выполняются виртуальные испытания с использованием модуля APM-FEM, включающие:

- Задание граничных условий и закреплений модели.
- Определение направления и величины растягивающей силы.
- Генерация сетки конечных элементов для дискретизации модели.
- Расчёт распределения напряжений и деформаций.
- Вывод и анализ результатов, включая построение карт коэффициента запаса по пределу прочности и выявление критических зон напряжений.

Методика обеспечивает воспроизводимость и точность моделирования и может применяться как для стандартных образцов, используемых в лабораторных исследованиях, так и для реальных крепёжных элементов. Она позволяет выявлять потенциальные зоны концентрации напряжений, оценивать прочностные характеристики деталей и принимать инженерные решения по оптимизации конструкции или замене материала на ранних этапах проектирования.

Результаты

Апробация методики на тестовом образце

Для первичной проверки работоспособности предложенной методики был выбран образец III типа, предназначенный для испытаний на растяжение согласно ГОСТ 1497 (рисунок 1) (ГОСТ 1497-2023, 2023, с. 33) (GOST 1497—2023, 2023, p. 33). В качестве материала образца при виртуальных испытаниях была выбрана Сталь 45, что обеспечивает адекватное воспроизведение его прочностных характеристик в численном моделировании.

Проверка методики далее осуществлялась в соответствии с разработанным порядком действий.

На первом этапе проводится создание 3D-модели образца, применяемого для испытания на растяжение (согласно ГОСТ 1497) в программе Компас 3D V23 (рисунок 1).

Вторым этапом проводятся виртуальные испытания на растяжение компьютерных 3D-моделей образцов из материала Сталь 45 в программном модуле APM-FEM, являющийся частью программы Компас 3D V23:

- 1 шаг: загрузка в программу созданной 3D-модели образца;
- 2 шаг: выбор поверхности закрепления образца;
- 3 шаг: определение плоскости приложения тянущей силы;

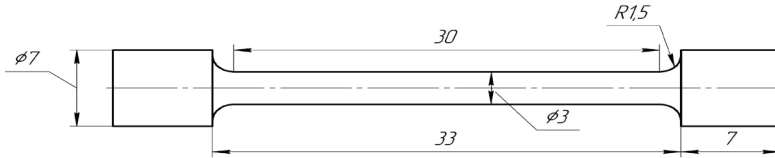


Рис. 1. Вид образца III типа

Fig. 1. Type III sample view

Гранью, к которой будет прилагаться сила, обозначаем нижний торец модели. Заключительным этапом является установление значения действующей силы и её направление в пространстве. Для этого в параметрах силы вводим проекцию этой силы по оси X в глобальной системе, тем самым, задав как значение, так и направление действия этой силы. Для этого в графе оси X указываем отрицательное значение силы 3000 Н (со знаком минус), чтобы имитировать растяжение. Важно отметить, что действия в этом этапе следует повторить, начиная со значения 3000 Н до 4000 Н с шагом 200 Н.

- 4 шаг: генерация конечных элементов сетки;
- 5 шаг: проведение расчета;
- 6 шаг: вывод карты результатов (рисунок 2);

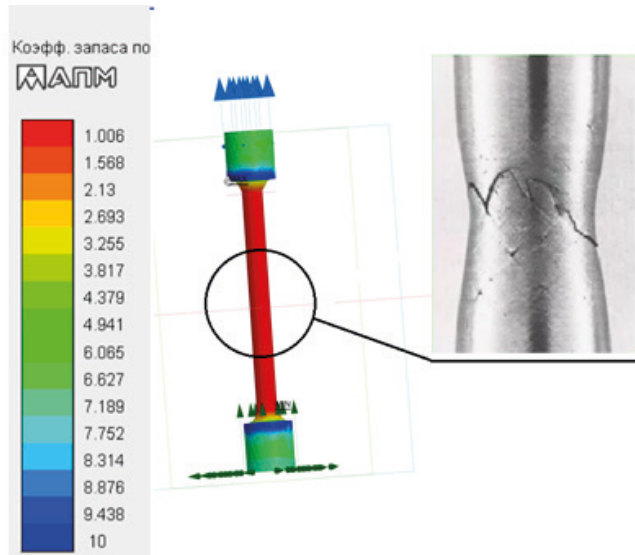


Рис. 2. Карта результатов коэффициента запаса по пределу прочности

Fig. 2. Safety factor results map for ultimate strength



Коэффициент запаса по пределу прочности — это отношение предела прочности материала к максимальному рабочему напряжению. Коэффициент запаса всегда больше единицы для безопасных конструкций. Значение, равное 1, означает, что конструкция находится на грани разрушения, а значение меньше 1 указывает на то, что разрушение уже произошло или неизбежно при данной нагрузке (INNER ENGINEERING, 2025) (INNER ENGINEERING, 2025). По разработанной методике заполнена таблица 1.

Таблица 1 / Table 1

Результаты растяжения образца из материала Сталь 45
Results of tensile testing of a specimen made of Steel 45 material

Нагрузка, Н / Load, N	Коэффициент запаса, n / Safety factor, n	Напряжение в образце, Н/мм ² / Stress in the sample, N/mm ²
3000	1,275	495,9
3200	1,214	513,7
3400	1,148	537
3600	1,079	561,3
3800	1,006	598
4000	0,949	629,4

Согласно ГОСТ 1050-2013, предел прочности $\sigma_{\text{пред}}$ (предельно допустимое напряжение) для материала Сталь 45 составляет 600 Н/мм².

Основываясь на результатах, полученных в ходе вычислительного эксперимента на растяжение образца материала и справочных данных, составлена таблица сравнения (таблица 2).

Таблица 2 / Table 2

Сравнение расчетных и справочных данных
Comparison of calculated and reference data

Материал / Material	Моделируемое значение предельного напряжения, Н/мм ² / Simulated value of ultimate stress, N/mm ²	Справочное значение пре- дельного напряжения, Н/мм ² / Reference value of ultimate stress, N/mm ²	Относительная погрешность, % / Relative error, %
Сталь 45 / Steel 45	598	600 (ГОСТ 1050-2013, 2015, с. 48) / (GOST 1050—2013, 2015, p. 48)	0,33

Разработанная методика проведения виртуального испытания образца на растяжение в соответствии (Магомедов, Алехин, 2010, с. 1) (Magomedov, Alekhine, 2010, p. 1) с использованием программы Компас АРМ-FEM, позволяет получить результаты



испытаний согласующиеся со справочными (ГОСТ 1050-2013, 2015, с. 48) (GOST 1050—2013, 2015, p. 48). Ошибка не более 1%.

Таким образом, проведенные исследования в первой части работы подтверждают, что программа Компас 3D V23 позволяет проводить компьютерное моделирование прочности образца III типа и получать точные результаты.

Применение методики на реальной детали

Успешная апробация методики открывает возможность её использования для анализа прочностных характеристик реальных крепёжных элементов, а также для оценки повышения их прочности за счёт изменения материала.

В последующих расчетах объектом исследования выступает крепёжный элемент «Шпилька», а предметом исследования его прочность.

Шпилька была выбрана в качестве объекта исследования по нескольким причинам. Во-первых, она является широко используемым элементом соединений в строительных и инженерных конструкциях, где на неё действуют значительные растягивающие нагрузки. Во-вторых, шпильки часто применяются в критических узлах, например, в креплении деформационных швов мостов, где они выполняют функцию якорей, удерживая конструкции при динамических и температурных воздействиях. Их геометрия и конструктивные особенности делают шпильки удобными для численного моделирования и проверки предложенной методики. Наконец, изучение прочностных характеристик шпильки позволяет оценить эффективность материала, формы и размеров детали, что имеет прямое прикладное значение для оптимизации её эксплуатации.

Убедившись, что программа Компас 3D V23 можно использовать для моделирования прочности, переходим ко второй части работы: повышение прочности крепёжного элемента «Шпилька» за счет замены материала. Она включает также два этапа.

Первым этапом проводится создание 3D-модели крепёжного элемента «Шпилька», применяемого в строительстве в программе Компас 3D V23 (рисунок 3).

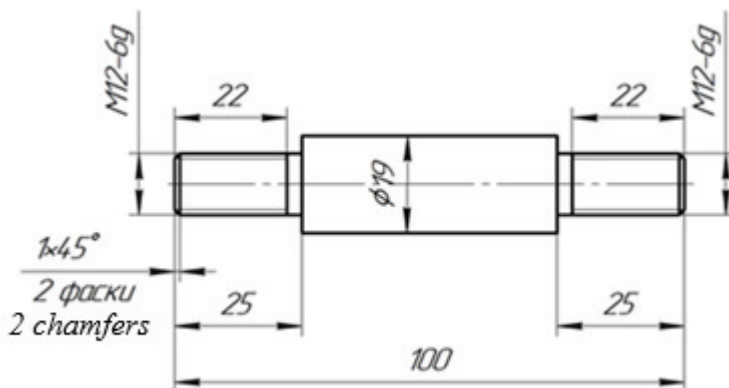


Рис. 3. Вид крепёжного элемента «Шпилька»

Fig. 3. Type of fastener “Stud”



Вторым этапом проводятся виртуальные испытания на растяжение компьютерных 3D-моделей крепежных элементов «Шпилька» из различных марок стали в программном модуле *APM-FEM*.

1 шаг: выбор и обоснование материала, который обеспечит лучшие прочностные характеристики и ценовые показатели (таблица 3).

В настоящее время в качестве материала крепежного элемента «Шпилька» используется Сталь 45. Для проведения сравнительного эксперимента выбран в качестве примера материал Сталь 45Г.

Таблица 3 / Table 3

Характеристики двух марок сталей Characteristics of two steel grades

Свойство / Property	Сталь 45 / Steel 45	Сталь 45Г / Steel 45G	Разница, % / Difference, %
Предел прочности, Н/мм ² / Tensile strength, N/mm ²	600	620	3,3
Предел текучести, Н/мм ² / Yield strength, N/mm ²	355	375	5,4
Стоимость, руб./т / Cost, RUB/t	48000 (МеталлНефтеПрокат. Металлургический Холдинг, 2025) / (MetalNefteProkat. Metallurgical Holding, 2025)	45100 (Металлопрокат. ру, 2025) / (Metalloprokat.ru, 2025)	6,1

Остальные шаги соответствуют второму этапу виртуальных испытаний на растяжение компьютерных 3D-моделей образцов (рисунок 1).

Для сравнения двух материалов с характеристиками, которые приведены в таблице 3, провели виртуальные испытания на растяжение 3D-моделей крепежных элементов «Шпилька» с помощью модуля *APM-FEM* (рис. 4). Результаты испытаний приведены в таблице 4.

Таблица 4 / Table 4

Результаты растяжения 3D-модели шпильки (нагрузка с шагом 500 Н) Results of tensile testing of a 3D model of a stud (load in 500 N increments)

Нагрузка, Н / Load, N		Коэффициент запаса, n / Safety factor, n		Напряжение в образце, Н/мм ² / Stress in sample, N/mm ²	
Сталь 45 / Steel 45	Сталь 45Г / Steel 45G	Сталь 45 / Steel 45	Сталь 45Г / Steel 45G	Сталь 45 / Steel 45	Сталь 45Г / Steel 45G
48000	54000	1,053	1,063	582,8	603,3
48500	54500	1,042	1,049	588,1	609,6
49000	55000	1,031	1,041	594,9	616,1



Нагрузка, Н / Load, N		Коэффициент запаса, n / Safety factor, n		Напряжение в образце, Н/мм ² / Stress in sample, N/mm ²	
Сталь 45 / Steel 45	Сталь 45Г / Steel 45G	Сталь 45 / Steel 45	Сталь 45Г / Steel 45G	Сталь 45 / Steel 45	Сталь 45Г / Steel 45G
49500	55500	1,019	1,032	601,3	621,9
50000	56000	1,010	1,021	607,1	629,2
50500	56500	1	1,007	613,2	636,8
51000	57000	0,9906	0,992	619,2	643,5

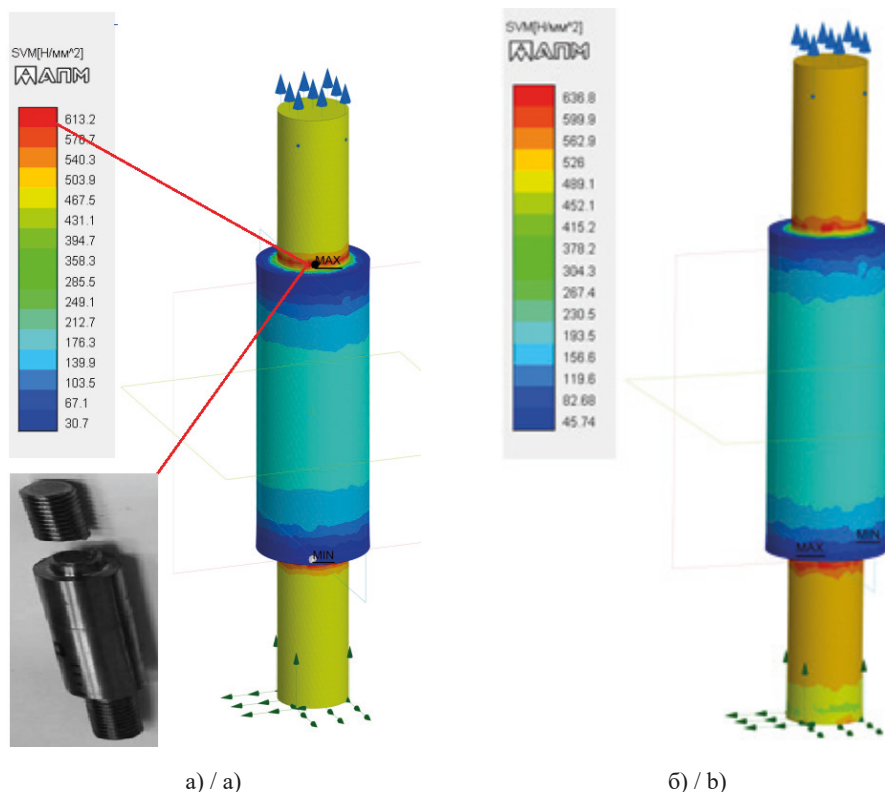


Рис. 4. Карта результатов по пределу прочности:
а — 3D-модель шпильки из материала Сталь 45;
б — 3D-модель шпильки из материала Сталь 45Г

Fig 4. Ultimate Strength Results Map:
a — 3D model of a stud made of Steel 45;
b — 3D model of a stud made of Steel 45G



Результаты вычислительного эксперимента и справочные данные растяжения 3D-модели шпильки из различных материалов приведены в таблице 5.

Таблица 5/ Table 5

Сравнение расчетных и справочных данных Comparison of calculated and reference data

Материал / Material	Расчетное напряжение, Н/мм ² / Calculated stress, N/mm ²	Справочные значение предельного напряжения, Н/мм ² / Reference value of ultimate stress, N/mm ²	Относительная погрешность, % / Relative error, %
Сталь 45 / Steel 45	613,2	600 (INNER ENGINEERING, 2025) / (INNER ENGINEERING, 2025)	2,8
Сталь 45Г / Steel 45G	636,8	620 (ГОСТ 4543-2016, 2017, с. 50) / (GOST 4543—2016, 2017, p. 50)	2,7

Результаты моделирования и анализ данных показал, что материал Сталь 45Г обеспечивает существенно более высокую прочность, особенно в сердцевине изделия (благодаря улучшенной прокаливаемости). Это критически важно для элементов, работающих на растяжение.

Обсуждение результатов

Разработанная методика позволяет реализовать полный цикл компьютерного анализа — от построения трёхмерной модели до определения напряжений и деформаций при приложении растягивающих нагрузок. Кроме того, разработанная методика позволяет не только предсказывать поведение крепёжного элемента под растягивающими нагрузками, но и оптимизировать конструкцию и выбор материала на ранних стадиях проектирования.

Заключение

В рамках проведённого исследования была разработана и апробирована комплексная методика виртуального моделирования прочности крепёжных элементов при растяжении с использованием программы КОМПАС-3D V23 и модуля APM-FEM. Методика успешно прошла проверку на стандартном образце III типа (согласно ГОСТ 1497), показав согласие результатов с справочными данными и максимальную ошибку не более 1%.

Применение методики к реальному крепёжному элементу «Шпилька» позволило оценить распределение напряжений и коэффициент запаса прочности для различных материалов. Выяснено, что шпилька из материала Сталь 45Г демонстрирует более высокий коэффициент запаса прочности при растяжении по сравнению



с аналогичной деталью из Сталь 45, что подтверждает эффективность предложенной методики и её пригодность для инженерного анализа.

На основе полученных данных дано научно-практическое обоснование замены материала крепёжных элементов с Сталь 45 на Сталь 45Г, что позволяет повысить надёжность и долговечность шпилек в конструкциях, подвергающихся значительным растягивающим нагрузкам. Предложенная методика может быть использована для оптимизации конструкций и материалов крепёжных элементов в различных инженерных системах.

Список источников / References

1. Ганин, Н.Б. (2010). Автоматизированное проектирование в системе КОМПАС-3D V12. (360 с). М.: ДМК Пресс.
Ganin, N.B. (2010). Automated design in the KOMPAS-3D V12 system. (360 p). M.: DMK Press.
2. ГОСТ 1050-2013 (2015).Metalлопродукция из нелегированных конструкционных качественных специальных сталей. Общие технические условия» (48 с.). Издательство: Ежегодный информационный указатель «Национальные стандарты». Стандартиформ.
GOST 1050—2013 (2015). Metal products made of non-alloy structural high-quality special steels. General specifications (48 p.). Publisher: Annual information index “National standards”. Standartinform.
3. ГОСТ 1497-2023 (2023). Металлы. Методы испытаний на растяжение (33 с.). И ПК Издательство стандартов. Стандартиформ.
GOST 1497—2023 (2023). Metals. Tensile testing methods (33 с.). And PC Publishing House of Standards. Standartinform.
4. ГОСТ 26303-84. (1984). Сосуды и аппараты высокого давления. Шпильки. Методы расчета на прочность (72 с.). Издательство стандартов.
GOST 26303—84. (1984). High-pressure vessels and apparatus. Studs. Strength calculation methods (72 p.). Standards Publishing House.
5. ГОСТ 4543-2016 (2017). Metalлопродукция их конструкционной легированной стали. Технические условия (50 с.). Издательство: Ежегодный информационный указатель «Национальные стандарты». Стандартиформ.
GOST 4543—2016 (2017). Metal products made of structural alloy steel. Specifications (50 p.). Publisher: Annual information index “National standards”. Standartinform.
6. ГОСТ Р 52627—2006. (2007). Болты, винты и шпильки. Механические свойства и методы испытаний (24 с.) Издательство: Ежегодный информационный указатель «Национальные стандарты». Стандартиформ.
GOST R 52627—2006. (2007). Bolts, screws and studs. Mechanical properties and test methods (24 p.) Publisher: Annual information index “National standards”. Standartinform.
7. Дриц М.Е., Москалев М.А. (1990). Технология конструкционных материалов и материаловедение (446 с.). Учебник для немашиностроит. спец. вузов. М.: Высш. шк.
Drits M.E., Moskalov M.A. (1990). Technology of structural materials and materials science (446 p.). Textbook for non-mechanical engineering special. universities. Moscow: Higher. school.
8. Дроздов, М.В. (2011). Прочность и виды разрушений резьбовых соединений шпилек при их применении в статических нагрузках (7 с.). Трубопроводы «Метизно-фланцевый завод»



- https://www.12821—80.ru/tech/72-Prochnost_rezbovykh_soedinenij_shpilek_Staticieskie_nagruzki (дата обращения 15.02.2026).
- Drozov, M.V. (2011). Strength and types of failure of threaded stud connections when used under static loads (7 p.). Pipelines “Hardware and Flange Plant” https://www.12821-80.ru/tech/72-Prochnost_rezbovykh_soedinenij_shpilek_Staticieskie_nagruzki (date of access 02/15/2026).
9. Котов, В.В., Нижник, Д.А., Асрян, Г.Р., Михалев, А.И., Иванов, А.Е. (2019). Моделирование в САД САЕ системах. (с. 250—254). Ростов-на-Дону, ДГТУ, ИНТЕРАГРОМАШ.
Kotov, V.V., Nizhnik, D.A., Asryan, G.R., Mikhalev, A.I., Ivanov, A.E. (2019). Modeling in CAD CAE systems. Rostov-on-Don, DSTU, (p. 250—254). INTERAGROMASH.
10. Кудрявцев, Е.М. (2008). КОМПАС-3D. Моделирование, проектирование и расчет механических систем (300с.). М.: ДМК Пресс.
Kudryavtsev, E.M. (2008). KOMPAS-3D. Modeling, design and calculation of mechanical systems (300 p.). M.: DMK Press.
11. Магомедов, А., Алехин, А. (2010). Интегрированный конечно-динамический анализ в КОМПАС 3D (с. 1—4). САМ, САД, САЕ Observer № 8.
Magomedov, A., Alekhine, A. (2010). Integrated finite-dynamic analysis in KOMPAS 3D (pp. 1—4). SAM, CAD, CAE Observer № 8.
12. Мальков, О.В., Головки, И.М. (2011). Статические испытания на растяжение наружных резьб, изготовленных резьбофрезерованием (с. 58—64). Известия высших учебных заведений. Машиностроение № 12.
Malkov, O.V., Golovko, I.M. (2011). Static tensile tests of external threads produced by thread milling (pp. 58—64). News of higher educational institutions. Mechanical Engineering, No. 12.
13. МеталлНефтеПрокат. Metallurgical Holding. (2025). https://kazan.metallnp.ru/catalog/krug_stalnoy/filter/alloy-is-st%2045/apply/?ysclid (дата обращения 22.05.2025).
MetallNefteProkat. Metallurgical Holding. (2025). https://kazan.metallnp.ru/catalog/krug_stalnoy/filter/alloy-is-st%2045/apply/?ysclid (accessed 22.05.2025).
14. Металлопрокат.ру (2025). Сайт продажи металлопроката / Режим доступа: <https://www.metalloprokat.ru/sort/krug/45g/> (дата обращения 22.05.2025).
Metalloprokat.ru (2025). Website for the sale of rolled metal products / Access mode: <https://www.metalloprokat.ru/sort/krug/45g/> (date of access 05/22/2025).
15. Мухутдинов, А.Р., Ефимов, М.Г., Вахидова, З.Р. (2020). Модернизация элемента изделия на основе вычислительного эксперимента (с. 28—37). Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. № 2(66).
Mukhutdinov, A.R., Efimov, M.G., Vakhidova, Z.R. (2020). Modernization of a product element based on a computational experiment (pp. 28—37). Modern technologies. Systems analysis. Modeling. No. 2(66).
16. Мухутдинов, А.Р., Ефимов, М.Г., Гарифулин, Р.Ш., Вахидова, З.Р. (2021). Изучение распределения напряжений при прессовании энергонасыщенных материалов в сборке пресс-инструмента в AUTODESK INVENTOR (с. 79—86) Научно-технический сборник «Взрывное дело» № 133/90.
Mukhutdinov, A.R., Efimov, M.G., Garifulin, R.Sh., Vakhidova, Z.R. (2021). Study of stress distribution during pressing of energy-saturated materials in the assembly of a press tool in AUTODESK INVENTOR (pp. 79—86) Scientific and technical collection “Explosive Engineering” No. 133/90.



17. Фасхиев, Х.А. (2013). Повышение долговечности шпилечного соединения: экспериментальное исследование (7с). Вестник УГАТУ — Уфа.
Faskhiev H.A. (2013). Increasing the durability of stud connections: an experimental study (7с). Bulletin of Ufa State Agrarian University — Ufa.
18. Шестериков, В.И. (2006). Контроль качества работ при содержании, ремонте и реконструкции мостов. Транспорт Российской Федерации № 6. С. 66—70. <https://cyberleninka.ru/article/n/kontrol-kachestva-rabot-pri-soderzhanii-remonte-i-rekonstruksii-mostov/viewer> (дата обращения 15.02.2026).
Shesterikov, V.I. (2006). Quality control of works during maintenance, repair and reconstruction of bridges. Transport of the Russian Federation No. 6. P. 66—70. <https://cyberleninka.ru/article/n/kontrol-kachestva-rabot-pri-soderzhanii-remonte-i-rekonstruksii-mostov/viewer> (date of access 15.02.2026).
19. Якушев, А.И., Мустаев, Р.Х., Мавлютов, Р.Р. (1979). Повышение прочности и надежности резьбовых соединений (214 с.). М.: Машиностроение.
Yakushev, A.I., Mustae, R.Kh., Mavlyutov, R.R. (1979). Increasing the strength and reliability of threaded connections (214 p.). Moscow: Mechanical Engineering.
20. АРМ FEM. Руководство Пользователя. (2022). Система прочностного анализа для КОМПАС-3D (71 с.). Версия для КОМПАС-3D v21. Научно-технический центр «АПИМ».
APM FEM. User's Manual. (2022). Strength analysis system for KOMPAS-3D (71 p.). Version for KOMPAS-3D v21. Scientific and Technical Center "APM".
21. INNER ENGINEERING. (2025). Коэффициент запаса прочности: профессиональный анализ. <https://inner.su/services/koeffitsient-zapasa-prochnosti-professionalnyu-analiz/> (дата обращения 15.02.2026).
INNER ENGINEERING. (2025). Safety Factor: Professional Analysis. <https://inner.su/services/koeffitsient-zapasa-prochnosti-professionalnyu-analiz/> (date of access 02/15/2026).

Информация об авторах

Аглям Рашидович Мухутдинов, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Технология твердых химических веществ», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский национальный исследовательский технологический университет», Казань, Российская Федерация, ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-8871-4941>, e-mail: muhutdinov@rambler.ru

Амир Русланович Раимов, магистрант кафедры «Оборудования химических заводов», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский национальный исследовательский технологический университет», Казань, Российская Федерация, ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-9904-0308>, e-mail: amir.raimov.87@mail.ru

Тимерхан Аглямович Мухутдинов, старший преподаватель кафедры программной инженерии, Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань, Российская Федерация, ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-9463-3906>, e-mail: timerking@rambler.ru

Information about the authors

Aglyam Rashidovich Mukhutdinov, Doctor of Engineering Sciences, Associate Professor, Professor in the Department of Solid Chemicals Technology, Kazan National Research Technological University, Kazan, Russian Federation, ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-8871-4941>, e-mail: muhutdinov@rambler.ru



Amir Ruslanovich Raimov, Master's Student in the Department of Chemical Plant Equipment, Kazan National Research Technological University, Kazan, Russian Federation, ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-9904-0308>, e-mail: amir.raimov.87@mail.ru

Timerkhan Aglyamovich Mukhutdinov, Senior Lecturer in the Department of Software Engineering, Kazan (Volga Region) Federal University, Kazan, Russian Federation, ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-9463-3906>, e-mail: timerking@rambler.ru

Вклад авторов

Мухутдинов А.Р. — идеи исследования; аннотирование, написание и оформление рукописи; планирование исследования; контроль за проведением исследования.

Раимов А.Р. — сбор и анализ данных; визуализация результатов исследования; проведение виртуального эксперимента (2 часть — апробация методики); написание рукописи.

Мухутдинов Т.А. — применение прикладного программного обеспечения и математических методов для анализа данных; проведение виртуального эксперимента (1 часть — разработка и отработка методики); написание рукописи.

Все авторы приняли участие в обсуждении результатов и согласовали окончательный текст рукописи.

Contribution of the authors

A.R. Mukhutdinov — research concept; annotation, writing, and formatting of the manuscript; study planning; study supervision.

A.R. Raimov — data collection and analysis; visualization of study results; conducting the virtual experiment (Part 2 — methodology validation); manuscript writing.

T.A. Mukhutdinov — application of application software and mathematical methods for data analysis; conducting the virtual experiment (Part 1 — methodology development and refinement); manuscript writing.

All authors participated in the discussion of the results and approved the final text of the manuscript.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Декларация об этике

Исследование было рассмотрено и одобрено экспертной комиссией ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет» (Заключение от 12.11.2025 г.).

Ethics statement

The study was reviewed and approved by the expert committee of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Kazan National Research Technological University” (Conclusion dated November 12, 2025).

Поступила в редакцию 25.02.2026

Поступила после рецензирования 11.03.2026

Принята к публикации 12.03.2026

Опубликована 30.06.2026

Received 2025.02.25

Revised 2026.03.11

Accepted 2026.03.12

Published 2026.06.30