УДК 624.01:69.059.3:669:719

ИДЕНТИФИКАЦИЯ ИСТОРИЧЕСКИХ МЕТАЛЛОВ КАК ОБЯЗАТЕЛЬНЫЙ ЭТАП ОЦЕНКИ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ КОНСТРУКЦИЙ ОБЪЕКТОВ КУЛЬТУРНОГО НАСЛЕДИЯ

Гарькина Ирина Александровна,

Пензенский государственный университет архитектуры и строительства,

г. Пенза,

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Математика и математическое моделирование».

Гарькин Игорь Николаевич,

Российский университет дружбы народов,

г. Москва,

Кандидат технических наук, заведующий кафедрой «Архитектура и реставрация».

Кудишина Алина Эдуардовна,

Пензенский государственный университет архитектуры и строительства,

г. Пенза,

студент.

Аннотация

Обосновывается необходимость обязательной идентификации исторических металлов (чугуна, сварочного и литого железа) на начальном этапе работ с объектами культурного наследия или реконструируемыми конструкциями. Дается сравнительный анализ ключевых характеристик этих материалов: механических свойств, анизотропии, склонности к хрупкому разрушению и свариваемости. Показывается, что различия в структуре и составе предопределяют выбор методов обследования, допустимых способов ремонта и критериев оценки несущей способности. Систематизируются основные признаки, позволяющие дифференцировать указанные материалы в

условиях натурного обследования, а также обозначены риски ошибочной идентификации.

Ключевые слова: объект культурного наследия, металлические конструкции, исторические металлы, идентификация материалов, механические свойства, техническая диагностика, неразрушающий контроль, коррозионный износ, расчётное сопротивление, принцип минимального вмешательства

IDENTIFICATION OF HISTORIC METALS AS A MANDATORY STAGE IN ASSESSING THE LOAD-BEARING CAPACITY OF STRUCTURES IN CULTURAL HERITAGE ASSETS

Garkina Irina Aleksandrovna,

Penza State University of Architecture and Construction, Penza,

Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Mathematics and Mathematical Modeling.

Garkin Igor Nikolaevich,

Peoples' Friendship University of Russia, Moscow,

PhD in Engineering, Head of the Department of Architecture and Restoration.

Kudishina Alina Eduardovna,

Penza State University of Architecture and Construction, Penza,

student.

Abstract

The necessity of identifying historical metals (cast iron, wrought iron, and cast steel/iron) at the initial stage of work on cultural heritage sites or structures undergoing reconstruction is substantiated. A comparative analysis of the key characteristics of these materials—including mechanical properties, anisotropy, susceptibility to brittle fracture, and weldability—is provided. It is demonstrated that differences in structure and composition dictate the selection of inspection methods, permissible repair techniques, and criteria for evaluating load-bearing capacity. The primary indicators used to differentiate these materials during on-site

inspections are systematized, and the risks associated with misidentification are highlighted.

Keywords: cultural heritage site, metal structures, historical metals, material identification, mechanical properties, technical diagnostics, non-destructive testing, corrosion-related deterioration, design resistance, principle of minimal intervention.

Металлические конструкции стали массово применяться в архитектуре в середине XIX века. Сначала использовали чугунные колонны и арки, затем балки и фермы из сварочного железа. С 1880–1890-х годов распространилось литое железо, полученное бессемеровским, томасовским и мартеновским способами. Многие здания этого периода (вокзалы, торговые пассажи, рынки, заводские корпуса, библиотеки, музеи, доходные дома) сегодня охраняются как объекты культурного наследия федерального, регионального или местного значения.

Обследование таких конструкций нужно перед реставрацией, приспособлением к современному использованию, сменой функционального назначения и после аварийных воздействий [1…3]. Здесь сталкиваются две группы требований. Инженерная безопасность требует достоверно знать механические характеристики материала и фактическое состояние сечений. Охрана памятника требует сохранить подлинный материал и свести к минимуму вмешательство в историческую ткань. Эти требования закреплены в Федеральном законе № 73-ФЗ, ГОСТ Р 55567-2013, Венецианской хартии (1964) и Принципах ИКОМОС по анализу, консервации и структурной реставрации архитектурного наследия (2003).

Общий порядок обследования строительных конструкций устанавливают ГОСТ 31937 и СП 13-102-2003. Специфику исторических металлов эти документы практически не учитывают. Поэтому нужна методика, которая позволит оценить несущую способность конструкций с достаточной надёжностью и при этом минимально затронет предмет охраны.

Особенности обследования металлоконструкций объектов наследия объединены ниже в пять групп.

Неопределённость материала. До 1930-х годов металл не классифицировали по маркам в современном смысле. Проектная документация чаще всего утрачена, а сертификаты на прокат отсутствуют. Внешне похожие элементы одного здания могут быть выполнены из разных материалов: колонны из чугуна, балки из сварочного железа, позднейшие вставки из стали. Если такой неоднородности не заметить, расчётная модель будет принципиально неверной.

Специфические свойства исторических металлов. Серый чугун хорошо работает на сжатие, но хрупок при растяжении и изгибе. В нём бывают скрытые литейные дефекты: раковины, рыхлоты, неравномерная толщина стенок. Сварочное железо слоистое и насыщено шлаковыми включениями, поэтому оно анизотропно: прочность поперёк прокатки заметно ниже, чем вдоль. Ранние литые стали часто содержат много фосфора и серы, что повышает хладноломкость и порог хрупкости.

Особый характер повреждений. Основной вид износа — атмосферная и щелевая коррозия. Она особенно интенсивна в пакетах заклёпочных соединений, в местах опирания балок на кладку и в зонах длительного замачивания под кровлей и в перекрытиях. Продукты коррозии в зазорах увеличиваются в объёме, «распирают» пакеты, срывают головки заклёпок и разрушают окружающую кладку.

Ограничения на отбор проб. Стандартные образцы для испытаний на растяжение по ГОСТ 1497 и ударный изгиб по ГОСТ 9454 вырезаются из несущих элементов. Это повреждает подлинную конструкцию и часто требует согласования с органом охраны наследия. Отсюда противоречие: чем меньше проб, тем выше статистическая неопределённость и тем консервативнее, то есть тем более «разрушительны» для памятника, проектные решения по усилению.

Ограничения при выборе мероприятий. Сварочное железо и чугун практически не свариваются, а ранние стали свариваются ограниченно. Поэтому типовые приёмы усиления (приварка накладок, рёбер, дополнительных элементов) часто неприменимы. Объём вмешательства нужно обосновать как можно точнее, а для этого нужны достоверные исходные данные.

Отсюда цель работы: разработать и обосновать методику обследования металлических конструкций объектов наследия, которая обеспечивает достоверную оценку несущей способности при минимальном объёме разрушающих испытаний [4…7].

Предлагается пять этапов, каждый из которых уточняет результаты предыдущего.

Этап 1. *Историко-архивные исследования:* изучаются проектные чертежи, сметы, переписка подрядчиков, клейма прокатных заводов, фотофиксация разных лет и сведения о перестройках. Датировка конструкции сразу сужает круг вероятных материалов (до 1860-х годов типичен чугун, в 1860–1890-х годах — сварочное железо, после 1890-х годов преобладает литое железо (сталь)).

Этап 2. *Предварительное (визуально-инструментальное) обследование***:** выполняются визуально-измерительный контроль, фотофиксация и лазерное сканирование геометрии; определяется конструктивная схема, тип соединений (заклёпки, болты, замки чугунного литья) и зоны вероятного износа; сканирование позволяет зафиксировать прогибы и искривления без контакта с поверхностью.

Этап 3. *Детальное неразрушающее обследование* включает следующие методы:

- ультразвуковую толщинометрию по сетке с шагом, сгущённым в зонах коррозии;

- портативную твердометрию по ГОСТ 22761, по которой ориентировочно оценивается временное сопротивление;

- спектральный анализ химического состава (портативный оптико-эмиссионный или рентгенофлуоресцентный) для идентификации материала и оценки свариваемости;

- металлографию на репликах, которая отличает слоистую структуру сварочного железа со шлаковыми строчками от однородной структуры литого металла и графитные включения чугуна.

Этап 4. *Ограниченный отбор малых проб* выполняется только там, где без этого нельзя обосновать расчёт; пробы берут из ненагруженных или малонагруженных зон: свесов полок, концевых участков, элементов, заменяемых по другим причинам. Неразрушающие измерения разбивают на однородные группы, а малые пробы используются для калибровки корреляционной связи «твёрдость — прочность» внутри каждой группы. Так, статистически обоснованные характеристики получаются при 3–6 пробах на группу вместо десятков.

Этап 5. *Поверочные расчёты и оценка технического состояния.* Расчёт ведётся по фактическим сечениям, за вычетом коррозионных потерь и ослаблений отверстиями под заклёпки, с расчётными сопротивлениями, полученными на этапах 3–4. Категория технического состояния назначается по ГОСТ 31937. Мероприятия выбираются по принципу «минимально необходимого». Предпочтение отдаётся обратимым решениям: разгрузке, болтовым накладкам, дополнительным независимым элементам и мониторингу вместо замены.

Для разделения исторических металлов удобно опираться на совокупность признаков. Чугун отличается высоким содержанием углерода (2,5–4,0 %) и графитной структурой. Сварочное железо содержит очень мало углерода (до 0,1 %) и много шлаковых включений, по которым характерно повышено содержание кремния и фосфора. Литое железо содержит $0{,}1 - 0{,}25\%$ углерода и имеет однородную ферритно-перлитную структуру. Для оценки свариваемости литого металла используется углеродный эквивалент:

$$C_{\text{экв}} = C + \frac{Mn}{6} + \frac{C_r + Mo + V}{5} + \frac{Ni + Cu}{15}.$$

При $C_{\text{экв}} \geq 0{,}45\%$, а также при повышенном содержании фосфора и серы сварка без специальных технологических мер считается недопустимой.

Таблица 1 - Сравнение методов контроля металлоконструкций с точки зрения применимости на объектах культурного наследия

Метод	Получаемые данные	Воздействие на подлинный материал	Применимость к чугуну	Применимость к сварочному железу	Достоверность для расчёта	Основные ограничения
Визуально-измерительный контроль	Схема, дефекты, деформации	Отсутствует	Высокая	Высокая	Низкая (качественная)	Не выявляет скрытых дефектов
Лазерное сканирование	Геометрия, прогибы, искривления	Отсутствует	Высокая	Высокая	Средняя	Нужен доступ и обработка облака точек
Ультразвуковая толщинометрия	Остаточная толщина элементов	Минимальная (зачистка пятна)	Ограниченная (затухание на графите)	Средняя (расслоения искажают сигнал)	Высокая	Нужна зачистка покрытий, в том числе исторических
Портативная твердометрия	Твёрдость, оценка $\sigma_в$	Минимальная	Средняя	Средняя	Средняя (нужна калибровка)	Корреляции для современных сталей к историческим металлам неприменимы
Спектральный анализ (портативный)	Химический состав	Минимальная	Высокая	Средняя (шлак даёт разброс)	Средняя	Плохо определяет углерод и фосфор у части приборов
Металлография на репликах	Тип металла, структура	Минимальная (полировка до 1 см²)	Высокая	Высокая	Средняя	Нужна квалификация исполнителя
Вырезка проб и механические испытания	$\sigma_т$, $\sigma_в$, δ, KCV	Значительная	Высокая	Высокая	Очень высокая	Нужно согласование, проба повреждает элемент
Магнитные и вихретоковые методы	Поверхностные трещины	Отсутствует	Низкая	Средняя	Низкая	Чувствительны к коррозии и покрытиям
Акустическая эмиссия	Активные развивающиеся дефекты	Отсутствует	Средняя	Средняя	Средняя	Требуется нагружение, сложная интерпретация
Динамические испытания и мониторинг	Собственные частоты, жёсткость	Отсутствует	Высокая	Высокая	Средняя (интегральная оценка)	Не локализуют дефекты

Ни один метод в отдельности не решает задачу. Рациональна комбинация, в которой основной объём информации дают неразрушающие методы, а разрушающие испытания служат калибровкой.

На рисунке 1 сравниваются типичные механические характеристики исторических металлов и современной строительной стали. Значения

обобщены по литературным данным и усреднены, фактический разброс может быть значительным.

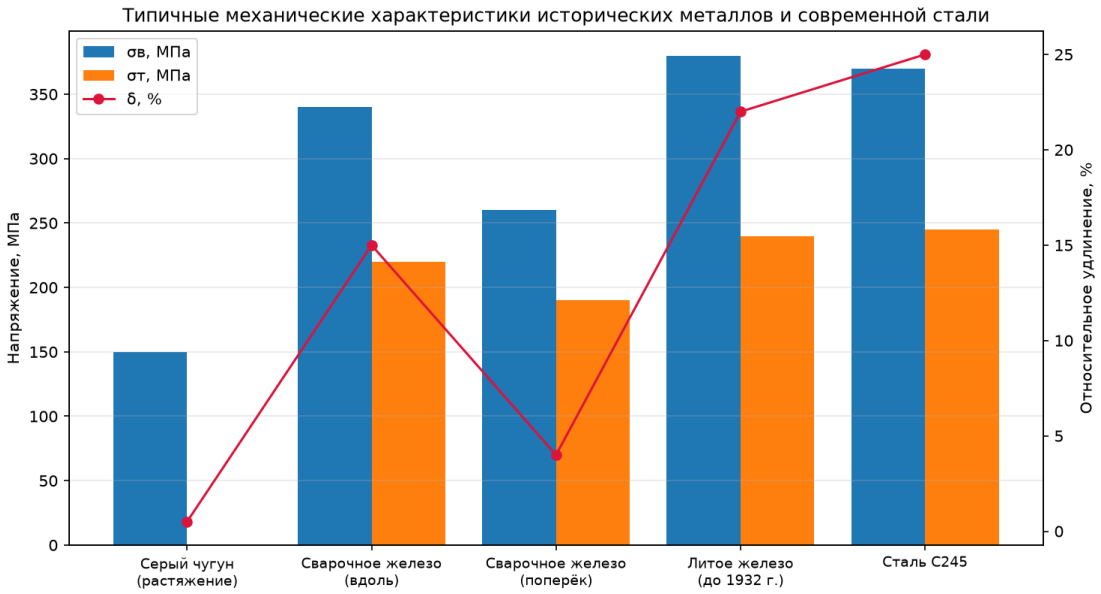


Рисунок 1 – Типичные механические характеристики исторических металлов и современной стали

Видна резкая анизотропия сварочного железа: поперёк прокатки пластичность падает в несколько раз. Это нужно учитывать при оценке работы узлов, где металл нагружен поперёк волокон, например, полок в зоне заклёпок. У серого чугуна выраженного предела текучести нет, поэтому на графике он условно показан нулевым значением.

Для оценки остаточного ресурса используется степенная модель атмосферной коррозии, принятая в ISO 9224:

$$d(t) = r_{corr} t^{b},$$

d - глубина коррозии, мм; r_{corr} - скорость коррозии в первый год, зависящая от категории коррозионной агрессивности атмосферы (ISO 9223); t — время, лет; b — показатель степени, для углеродистых сталей и железа принимаемый 0,5–0,6.

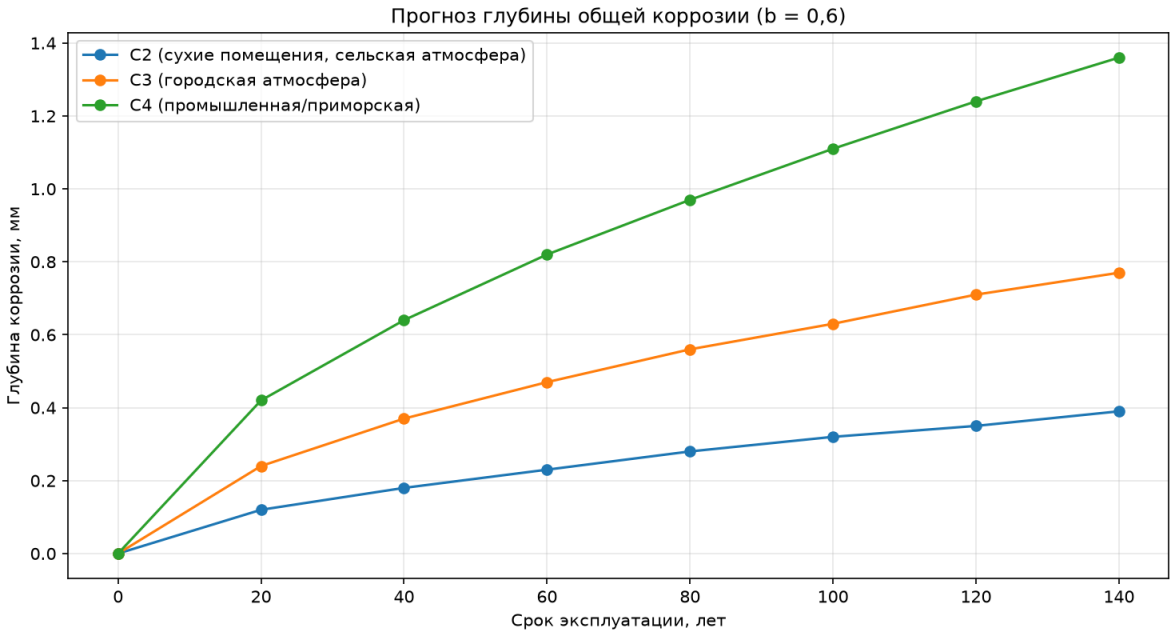


Рисунок 2 – Прогноз глубины общей коррозии по степенной модели (b = 0,6)

Модель описывает только общую равномерную коррозию. В щелевых зонах заклёпочных пакетов и в местах опирания на влажную кладку фактическая скорость коррозии бывает в 2–4 раза выше. Поэтому толщинометрия в таких зонах обязательна, а прогноз по модели служит лишь фоновой оценкой.

Исходные данные. Обследуется клёпаная балка междуэтажного перекрытия здания 1890-х годов. На этапе 3 по металлографии на репликах материал идентифицирован как сварочное железо. Номинальный момент сопротивления сечения брутто $W_{x0} = 1250$ см³. Коэффициент ослабления сечения отверстиями под заклёпки в растянутой зоне $k_n = 0{,}90$. Толщина полки $t = 12$, средняя потеря толщины по данным ультразвуковой толщинометрии $\Delta = 1{,}2$ мм. Расчётный изгибающий момент от проектных нагрузок нового назначения $M = 158$ кН·м, коэффициент условий работы $\gamma_c = 0{,}9$.

Шаг 1. **Статистическая обработка данных испытаний** [8,9]**.** Из свесов полок заменяемых элементов вырезано 6 малых образцов с пределами текучести соответственно: 228, 241, 219, 235, 247 и 226 МПа.

Среднее значение: $\overline{\sigma}_y = 232{,}7$ *МПа.*

Среднеквадратическое отклонение: $S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(\sigma_i - \overline{\sigma}_y)^2}{n-1}} = 10{,}33$ *МПа.*

Коэффициент вариации V = 4,4% (выборка однородна).

Нормативное сопротивление с обеспеченностью 0,95 при коэффициенте Стьюдента $t_{0{,}95;5} = 2{,}015$: $R_{yn} = \overline{\sigma}_y - tS = 211{,}9$ *МПа.*

Расчётное сопротивление определяется с повышенным коэффициентом надёжности по материалу $\gamma_m = 1{,}2$, учитывающим анизотропию и шлаковые включения сварочного железа:

$$R_y = \frac{R_{yn}}{\gamma_m} = 176{,}6 \text{ МПа} = 17{,}66 \text{ кН/см}^2.$$

Шаг 2. **Учёт коррозионного износа.**

Около 85 % момента сопротивления клёпаного двутавра обеспечивают полки ($W_{n\ ef} = W_{x,0} k_n \left(1 - 0{,}85\frac{\Delta}{t}\right) = 1029{,}4$ см³).

Шаг 3. **Проверка прочности по результатам испытаний.**

$M_u = R_y \gamma_c W_{nef} = 16361$ кН·см = 163,6 кН·м;

тогда $\frac{M}{M_u} = 0{,}966 < 1$ — прочность обеспечена.

Шаг 4. **Проверка при консервативном нормативном значении.** Если испытаний нет, для металла (изготовленного до 1932 года) по сложившейся нормативной практике принимается:

$R_y = 165$ Мпа; $M_u = 15287$ кН·см = 152,9 кН·м; $\frac{M}{M_u} = 1{,}0331 > 1/$

Результат. Без испытаний балку пришлось бы признать недостаточно прочной и усиливать, причём сварка для сварочного железа неприменима. Шесть малых образцов, вырезанных из второстепенных зон, подтвердили, что несущая способность достаточна, и позволили сохранить подлинную конструкцию без изменений.

На рисунке 3 показывается зависимость коэффициента использования этой балки от коррозионной потери толщины полок при двух подходах к назначению расчётного сопротивления.

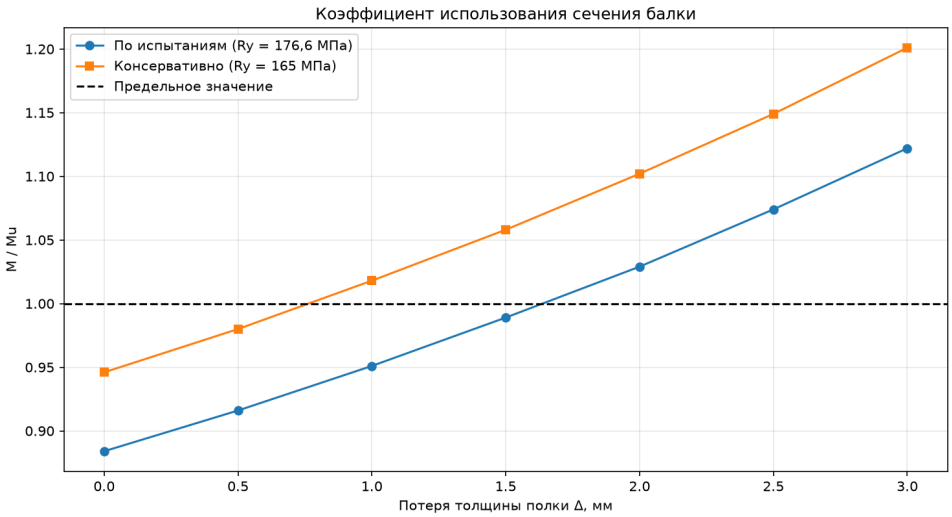


Рисунок 3 – Коэффициент использования сечения балки в зависимости от коррозионной потери толщины полок

При консервативном подходе предел достигается уже при потере толщины около 0,8 мм, при расчёте по результатам испытаний — около 1,6 мм. Если по рисунку 2 и измеренной фактической скорости коррозии оценить, сколько времени займёт износ между этими значениями, получится обоснованный срок до следующего обследования или до вмешательства. Разница обычно составляет несколько десятилетий, если наладить защиту от замачивания.

Выводы

1. Идентификация материала (чугун, сварочное или литое железо) является обязательным и первоочередным этапом при обследовании исторических металлических конструкций, поскольку от этого зависят корректность расчётов и безопасность дальнейших работ.

2. Существенные различия в механических свойствах, анизотропии и склонности к хрупкому разрушению требуют индивидуального подхода к оценке несущей способности для каждого типа металла.

3. Свариваемость материалов существенно различается: чугун требует специальных технологий и несёт повышенные риски трещинообразования, тогда как сварочное железо допускает более широкий спектр ремонтных решений.

4. Для дифференциации материалов целесообразно использовать комплекс методов: визуальный и микроструктурный анализ, оценку характера излома, твёрдостные измерения и, при возможности, химический анализ.

5. Систематизация признаков идентификации позволяет минимизировать риски ошибочного выбора методов ремонта и повысить достоверность оценки технического состояния конструкций.

6. Результаты могут быть использованы при разработке методик технической диагностики и при планировании реставрационных и ремонтных мероприятий.

Библиографический список:

1. Лахтин Ю. М., Леонтьева В.П. Материаловедение. - 3-е изд., перераб. и доп. - Москва: Машиностроение, 1990. - 528 с.

2. Ерёмин К.И., Шишкина Н.А. Обзор аварий и сооружений, произошедших в 2010 году // Предотвращение аварий зданий и сооружений: сборник научных трудов. Магнитогорск: ООО «Велд». –2011. – С. 1-20.

3. Малахова А. Н., Малахов Д.Ю. Оценка несущей способности строительных конструкций при обследовании технического состояния зданий: учебное пособие // - Москва: АСВ. - 2015. - 96 с.

4. Гарькин И.Н. Математическая модель применения риск ориентированного подхода при ремонте сложной кровли объектов культурного наследия // Системные технологии. – 2025. – № 2 (55). – С. 92-97

5. Арискин М.В., Гарькин И.Н. Анализ причин падения башенного крана на основе построения модели в SCAD 11.5 // Фундаментальные исследования. – 2016. – № 10-2. – С. 243-247

6. Волков В.П. Геометрические характеристики тонкостенного Z-образного стержня с закруглением и с наружной отбортовкой // Моделирование и механика конструкций. – 2025. – № 22. – С. 53-61.

7. Будылина Е.А., Гарькина И.А., Данилов А.М. Системный анализ как методология решения проблем // Региональная архитектура и строительство. 2023. № 2 (55). С. 14-20.

8. Данилов А.М., Гарькина И.А. Теория вероятностей и математическая статистика с инженерными приложениями. - Пенза: ПГУАС, 2010. - 228 с.

9. Гарькин И.Н., Сабитов Л.С., Киямова Л.И., Гарькина И.А., Глебова Т.А. Стохастическая модель процесса развития повреждений на объектах культурного наследия / Научно-технический вестник Поволжья. - 2025. - № 5. - С. 24-26.