

## Моделирование развития аварийности строительных конструкций

С.Г. Шеина<sup>1</sup>, Ю.Д. Сергеев<sup>2</sup>, Р.Ю. Мясищев<sup>2</sup>, А.Ю. Сергеева<sup>2</sup>,  
А.В. Мищенко<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Донской государственной технической университет, Ростов-на-Дону

<sup>2</sup>Воронежский государственный технический университет, Воронеж

**Аннотация:** В данной статье анализируется оценка признаков, приводящих к возможному разрушению исследуемой строительной конструкции. Используя математическую основу диагностики разрушения строительной конструкции, можно определить, как признаки, влияющие на разрушение конструкции или их группы, влияют на определение степени разрушения. Применяя байесовский подход к определению степени неисправности строительной конструкции и ее разрушению, приводим сравнение вероятности разрушения каждой исследуемой строительной конструкции. Выяснено, как на расчетную вероятность каждого разрушения конструкции повлияло наличие каждого признака и какой вклад в повышение или уменьшение вероятности аварии внес анализируемый признак, влияющий на разрушение конструкции. Предлагается использовать искусственные модельные разрушения строительных конструкций для выяснения влияния на определение степени разрушения различных факторов, так сказать, в чистом виде и в различных вариантах. Кроме этого, можно получить тестовые примеры для проверки эффективности различных методов диагностики и выяснить ряд теоретических вопросов. Учитывая это и другие перечисленные выше цели, были построены модели. Показана оценка влияния признака, влияющего на вероятность разрушения строительной конструкции, одним из множества способов. По предлагаемым методикам определены значения признака, влияющего на разрушение строительной конструкции. Определяется вероятность разрушения.

**Ключевые слова:** строительно-техническая экспертиза, дефекты, надежность, диагностические задачи, методики диагностики, эффективность.

Эксплуатирование конструкций здания, находящихся под негативным влиянием агрессивных факторов окружающей среды, а также сама специфика данного процесса меняет свойства и характеристики строительных конструкций и материалов, из которых они состоят [1]. Это ведет к повышению риска снижения качества конструкции, причинению вреда окружающей среде. Не обнаруженные своевременно и своевременно не устраненные дефекты строительных конструкций могут развиваться в очень сложные для ремонта и серьезные неисправности, а также переходить в аварийное состояние и приводить к аварии всю конструкцию. Все вышеперечисленное может вызвать не только социальный, но и

экологический ущерб, а также значительные материальные потери, затраты, которые были вызваны необходимостью проведения ремонтных работ по восстановлению технического состояния конструкций и их эксплуатационных характеристик [2, 3]. Вследствие вышеперечисленного, требуется обязательно вовремя оценивать точное текущее техническое состояние строительных конструкций, как и оборудования, а также иметь возможность сделать прогноз вероятности прогрессирующего дефектов строительных конструкций, своевременно проводить мероприятия по устранению дефектов и стабилизации технического состояния стройконструкций [4 - 6].

Строительно-техническая экспертиза, проводимая экспертами (специалистами) исследует причины аварий, разрушений строительных конструкций, возникающих при строительстве и эксплуатации зданий, а также выявляет признаки, по которым состояние сооружения можно считать аварийным [7, 8]. Эксперты исследуют конструкции зданий и сооружений и устанавливают ее взаимосвязь с обеспечением эксплуатационной надежности [9].

Можно проанализировать, как отдельные признаки, влияющие на разрушение конструкции, влияют на определение степени разрушения. Говоря нестрого, определение степени разрушения – это наиболее вероятное разрушение, и определяется степень разрушения сравнением вероятностей рассматриваемых дефектов [10]. Расчетные вероятности разрушения конструкции зависят от всех признаков, влияющих на ее разрушение [11], и важно определить, каким образом на рассчитываемую вероятность возникновения каждого дефекта или разрушения конструкции повлияло присутствие признаков, влияющих на данный дефект строительной конструкции [12, 13]. Также важно определить, увеличивает или уменьшает ли вероятность аварии каждый анализируемый признак, который влияет на

---

техническое состояние конструкции. Для определения и вычисления влияния признака на вероятность снижения технического состояния строительной конструкции можно пользоваться различными методами и способами [14]. Приведем один из них. Согласно данному способу, кроме вероятности приобретения конструкцией аварийного состояния и вероятности полученной вследствие ухудшения технического состояния степени разрушения конструкции  $d_\gamma$ , определяется  $d_\gamma^{j-}$ .  $d_\gamma^{j-}$  - дефектная вероятность, рассчитанная с исключением  $j$  - го признака, анализ влияния на конструкцию которого проводится. Параметры  $d_\gamma$  и  $d_\gamma^{j-}$  будут являться основой для определения влияния рассматриваемого признака на строительную конструкцию. Примером может служить следующее отношение:

$$E_{j\gamma}^b = \frac{d_\gamma}{d_\gamma^{j-}}, \quad (1)$$

которое определяет роль рассматриваемого  $j$ -го признака, влияющего на снижение технического состояния конструкции, посреди  $b$  остальных признаков технического состояния строительной конструкции в величине  $d_\gamma$ , которая показывает вероятность  $\gamma$  -го разрушения.

Также есть возможность определить вероятность появления  $\gamma$  -го разрушения или дефекта, пользуясь исключительно  $j$  - м признаком, который влияет на возможность деструкции (когда используется только один конкретный признак разрушения). Вероятность, полученная данным расчётом, будет обозначена нами как  $d_\gamma^j$ . Эта вероятность будет характеризовать роль  $j$ -го признака разрушения (в вычисленной вероятности

---

аварии) обособленно, отдельно от воздействия других признаков, которые влияют на разрушение конструкции.

Соотнеся  $d_{\gamma}^j$  с остальной средней вычисленной вероятностью разрушений строительных конструкций, которая была определена по анализируемому (тому же) признаку, который влияет на разрушение, получим:

$$E_{j\gamma} = \frac{d_{\gamma}^j}{\frac{1}{n-1} \sum_{m=1}^{n-1} d_{\gamma}^j} \text{ для } m \neq \gamma. \quad (2)$$

Соотнеся два признака разрушения, получим отношение, которое показывает оценку роли отдельного признака:

$$E_{j1} = \frac{d_1^j}{d_2^j} = \frac{\pi_1 Q_1(a_{0j}^t)}{\pi_2 Q_2(a_{0j}^t)} \text{ при } d_1(a_{0j}^t) \geq d_2(a_{0j}^t) \quad (3a)$$

$$E_{j2} = \frac{d_2^j}{d_1^j} = \frac{\pi_2 Q_2(a_{0j}^t)}{\pi_1 Q_1(a_{0j}^t)} \text{ при } d_1(a_{0j}^t) < d_2(a_{0j}^t) \quad (3b)$$

Оценка вероятностей и плотностей вероятностей признаков, которые влияют на разрушение конструкции для двух рассматриваемых разрушений, в таком случае будет выглядеть следующим образом:

$$E_{j1} = \frac{d_1^j}{d_2^j} = \frac{Q_1(a_{0j}^t)}{Q_2(a_{0j}^t)} \text{ при } Q_1(a_{0j}^t) \geq Q_2(a_{0j}^t) \quad (4a)$$

$$E_{j2} = \frac{d_2^j}{d_1^j} = \frac{Q_2(a_{0j}^t)}{Q_1(a_{0j}^t)} \text{ при } Q_1(a_{0j}^t) < Q_2(a_{0j}^t) \quad (4b)$$

Последняя формула была реализована в компьютерной вычислительной программе, которая определяет степень неисправности конструкции. (При этом надо учесть, что оценка (формула 1) является более представительной). Для каждого отдельного дефекта и разрушения величины  $E_{j\gamma}$  должны указываться исключительно больше единицы, что, в свою очередь, очень удобно при проведении анализирования причин, из-за которых было назначено и проведено диагностирование. Аргументация в пользу других (конкурирующих) разрушений и дефектов в таком случае размещается именно в информации о разрушениях – конкурентах и, соответственно, удаляется из общей информации о самой аварии.

Таким образом, с помощью построения модели типовых или характерных признаков, которые ведут к возможному разрушению или появлению дефектов исследуемой конструкции, есть возможность ответить на большое число вопросов теоретического характера, которые связаны с этим разрушением. Также можно изобрести и создать специальные искусственно - смоделированные разрушения конструкций. Это даст возможность преследовать как минимум три очень важные цели.

Первая цель – выявление влияния на определение степени снижения технического состояния строительной конструкции и степени ее разрушения множественных негативных, нейтральных и позитивных факторов, причём как в различных комбинациях, так и индивидуально. Это будет возможно в данном случае, т.к. дефекты строительных конструкций, которые уже содержатся в расчетных базах строительных дефектов, и анализы их разрушений, их признаки, характеристики и т.д., априори содержат дефекты, которые являются естественными или специфическими для конкретной конструкции, что ограничивает и не дает возможность полного анализа их влияния. (Требуется вносить корректировки, поправки и т.п. Вычислительная точность значительно снижается).

---

Второй целью будет являться возможность получения тестовых примеров, на которых можно будет проверить эффективность разных множественных методов диагностики. Моделированные примеры, в отличие от реальных примеров, не имеют ограничения на объем данных, а это значит, что есть возможность произвести моделирование любого числа конструкций, которое не будет содержать при этом ошибки диагностики и ошибки сбора данных.

Третьей целью будет являться выяснение ряда вопросов теоретического характера. Так как и вид разрушений модели, и число, и характер признаков и факторов, влияющих на разрушение строительных конструкций, можно будет выбрать при производстве моделирования, то вопросы, которые возникают при диагностике, будут прояснены и решены.

Как один из хороших примеров использования моделей на моделированных авариях, есть возможность выявить принципы объединения дискретных и, наоборот, непрерывных признаков, которые оказывают своё влияние на разрушение конструкций, объединив в некий многомерный признак, выявить и доказать эффективность проведения диагностирования с помощью таких многомерных признаков.

При этом важно учесть и произвести моделирование как всех независимых, так и зависимых признаков, которые влияют на разрушение, так, чтобы установить и учитывать взаимозависимость этих признаков разрушения строительных конструкций при установлении самой степени разрушения.

Также, в результате моделирования можно выявить количество данных (объем базы данных), начиная с которого, объединение признаков, которые влияют на разрушение строительных конструкций, в многомерные, получает преимущество перед одномерными независимыми признаками, влияющими на разрушение конструкций.

---

В планах определить конкретные признаки, которые наиболее продуктивно и рационально можно будет свести к многомерным признакам. Понимая и принимая в учет все вышеперечисленное, предлагается несколько моделей разрушения конструкций (снижения технического состояния конструкций, аварий).

Простейшей моделью является однопризнаковая модель, в которой техническое состояние строительной конструкции, включающее все дефекты, будет характеризоваться только одним признаком, влияющим на разрушение конструкции. В таком случае признаки, влияющие на разрушение строительной конструкции, будем считать связанными со временем, прошедшим с начала запуска процесса разрушения конструкции.

В этом случае, модель аварии будет задана зависимостью ожидания признака от прошедшего времени. А независимым признаком будет являться такой признак, который будет при заданном ожидании и распределении вычисляться как некая случайная величина. Тогда, в качестве модели с нулевым уровнем сложности, мы сможем принять модель единственного вида разрушения с независимым признаком, при том, что математическое ожидание у него будет либо постоянно, либо изменяться линейно. Эта модель является очень полезной для того, чтобы контролировать правильность и нормативность реализации.

У следующей модели – первый уровень сложности, т.к. у нее присутствует уже два вида разрушений. При этом, значение единственного признака при каждой отдельной аварии, будет выражаться константой, т.к. будет постоянно. Также оно будет индивидуально для данного разрушения, т.е. значения признака, влияющего на разрушение при аварии – разные. Протекание таких разрушений (зависимость математического ожидания величины признака, влияющего на разрушение от времени) отображено специальными линиями (рис. 1). По оси времени (ось  $x$ ) можно отложить

---

время в днях от начала процесса снижения технического состояния конструкции или разрушения.

Большим значением признака, влияющего на разрушение в таком случае будем называть для удобства разрушение конструкции №1, а разрушение конструкции №2 – «маленькое значение признака, влияющего на разрушение».

Для конкретной конструкции, в которой присутствует дефект 1, величину признака, влияющего на разрушение, будем вычислять по данному известному рассчитанному математическому ожиданию признака (изображено на рисунке линией 1), к распределению. В таком случае, значение самого признака снижения технического состояния конструкции будет определено в первый день начала всего разрушения и снижения технического состояния конструкции. Согласно созданной модели постоянного признака в оставшиеся дни, когда происходит разрушение, значение этого признака для данной конструкции в конкретном варианте моделирования разрушения показано с помощью пунктира (рис. 1).

Расчёт значения признака для второго дефекта будет отличаться исключительно использованием иной величины математического ожидания данного признака. (Исключение будут составлять случаи, в которых проводится специальное исследование разных распределений для дефектов).

В рассмотренных дефектах и разрушениях, разрушения постоянного признака будут находиться в зависимости. Данное утверждение вытекает из предсказуемости значений признаков, т.к., определив величину самого признака, можно с помощью прогноза определить величину признака, который влияет на разрушение в любой заданный день. Модели, которые показывают постоянные признаки, оказывающие влияние на разрушение конструкции, требуются для определения эффективности усреднения всех

---



этих признаков в сравнении с использованием данных признаков как независимых.

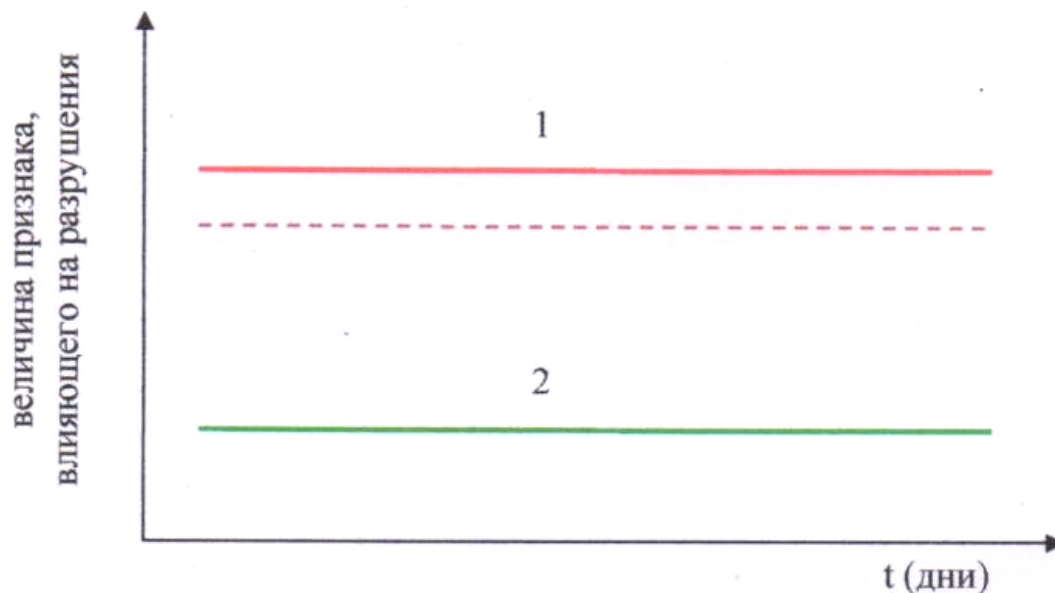


Рис. 1. – Зависимость математического ожидания величины признака, влияющего на разрушение, от времени

Более сложным случаем является следующая ситуация, в которой признак, влияющий на разрушение конструкции при одних и тех же разрушениях и дефектах, изменяется линейно, а при изменении данных разрушений и дефектов становится постоянным (рис. 2). В нём происходит изменение математического ожидания признака дефекта конструкции в функции времени, прошедшего с начала разрушения (в днях).

Первым из показанных на рисунке 2 дефектом и разрушением можно назвать тот признак, который изменяется (изменяющийся признак), признак, влияющий на разрушение конструкции (конструкция с дефектом с изменяющимся признаком, влияющий на разрушение конструкции). Вторым – постоянный признак, влияющий на разрушение конструкции. Величины переменного признака, влияющего на разрушение конструкции для

конкретной стройконструкции, находятся так. Во время первого дня начала процесса разрушения значение признака, который влияет на деструкцию, будет получено случайным образом при учете выбранного распределения и математического ожидания этого признака в первый день. В качестве оси ординат на рисунке изображено математическое ожидание в первый день. В таком случае, значения остальных признаков в остальные дни будут показаны, как ординарные линии, которые проходят сквозь ординату дня номер 1, они также будут параллельны изображенной линии математического ожидания величины признака дефекта, который влияет на разрушение конструкции. Это изменение величины признака, которое было получено способом, указанным выше, выделено пунктиром (рис. 2).

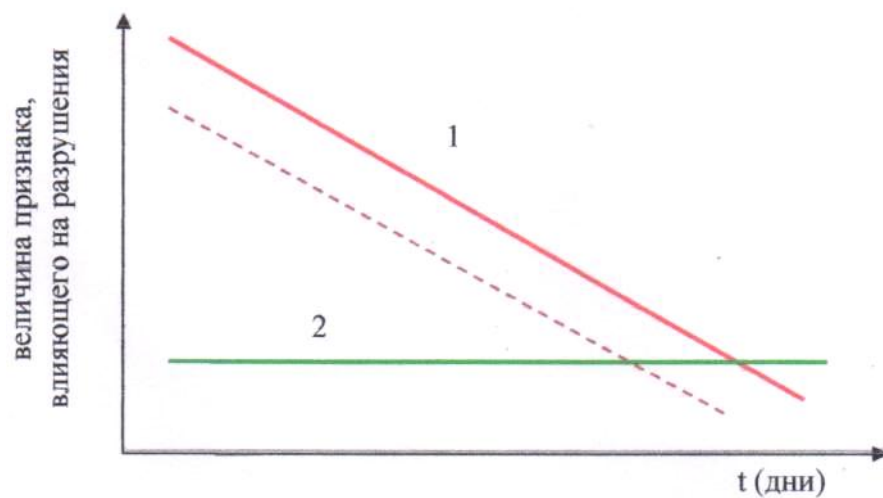


Рис. 2. – Прохождение процесса изменения мат. ожидания признака, который влияет на разрушение конструкции в функции времени.

Для того, чтобы исследовать допустимость усреднения величин признаков, влияющих на разрушение, было сделано и показано пересечение линий математического ожидания.

Для конструкций с изменяющимся признаком, влияющим на разрушение (разрушение №1), будет совершена ошибка, если будут взяты

попарно признаки, влияющие на разрушение строительной конструкции, которые будут равноудалены от места пересечения линий данных признаков (пунктирная линия и линия мат. ожидания дефекта, разрушения). Также диагностическая ошибка будет совершена, если произойдет усреднение значения признаков, влияющих на разрушение строительной конструкции в парах и использование усредненных значений в ходе диагностирования. Эта ошибка произойдет из-за того, что усредненные значения переменного признака, влияющего на разрушение, будут исключительно точно равняться признаку при втором разрушении (постоянный признак, влияющий на разрушение строительной конструкции).

Стоит отметить, что величины самих признаков, влияющих на разрушение, в два любых дня являются достаточной информацией для вычисления и степени разрушения. Разрушение будет переменным признаком, если их величины разные, и постоянным, если одинаковые.

До того, как у стройконструкции определены две величины признака, влияющего на разрушение конструкции, признаки, влияющие на разрушение конструкции, будут независимыми. А из этого следует, что по одному значению признака, который влияет на разрушение в какой-то определенный заданный день, нельзя найти значение другого признака в другой день, т.к. достоверно не понятно, вследствие чего происходит разрушение строительной конструкции. Однако стоит также учесть, что существует зависимость признаков разрушения при каждом дефекте. Т.к. известна линия математического ожидания, по любому значению одного выбранного признака, влияющего на снижение технического состояния и разрушение строительной конструкции, можно определить значение такового в любой интересующий нас заданный день.

Из всего вышеперечисленного можно сделать вывод, что вероятностные и статистические методы, которые применяются в данной

---

работе, вкупе с использованием баз данных о строительных конструкциях, восстановленных после дефектов, могут являться одной из форм высокоэффективного использования накопленного опыта экспертной и иной строительной деятельности, а также помочь поднять уровень строительной диагностики.

### Литература

1. Шеина С.Г., Чубарова К.В., Москаленко И.А. Принципы сохранения архитектурного наследия на примере восстановления архитектурно-планировочной структуры города Ростова-на-Дону после Великой Отечественной войны // Инженерный вестник Дона, 2022, №5. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n5y2022/7669](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n5y2022/7669).
2. Hussamadinu Raafat., Jansson Gustav, Mukkavaara Jani. Digital Quality Control System—A Tool for Reliable On-Site Inspection and Documentation // Luleå University of Technology. Sweden Buildings 2023. 13(2), 358 p; URL: [doi.org/10.3390/buildings13020358](https://doi.org/10.3390/buildings13020358).
3. Yuan Shuo, Wang Yanqing, Kang Limin, Yu Zhengquan, Fen Yong. Discussion on Quality Management and Control in Construction Engineering. // Smart Construction Research. vol. 2 Issue 1. June 2018. pp. 1-5. DOI: 10.18063/scrv.0.653.
4. Ройтман А.Г. Предупреждение аварий жилых зданий. М.: Стройиздат, 1990. 240 с.
5. Гроздов В.Т. Техническое обследование строительных конструкций зданий и сооружений. СПб: Центр качества строительства, 1998. 96 с.
6. Абрашитов В.С., Жуков А.Н., Устинова А.В. Определение категорий технического состояния строительных конструкций зданий и

сооружений // Региональная архитектура и строительство. Научно-технический журнал. 2016. № 4 (29). С. 67-70.

7. Петров К.С., Федоряка А.В., Лами Каррар, Семенец В.Г. Модернизация зданий и сооружений как способ восстановления жилищного фонда РФ // Инженерный вестник Дона. 2018. №1. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2018/4717.

8. Бутырин А.Ю Теория и практика судебной строительно - технической экспертизы. М.: Издательский дом "Городец", 2006. С. 147-160.

9. Сергеева А.Ю., Сергеев Ю.Д., Мясищев Ю.В., Мясищев Р.Ю. Анализ факторов, влияющих на организационно-технологическую надежность строительства // IX Международная научно-практическая конференция "Проблемы современных экономических, правовых и естественных наук в России - синтез наук в конкурентной экономике". Воронеж: ВГТУ, 2021. С. 223-232.

10. Mishchenko V.Ya., Sergeev Yu., Sergeeva A., Myasishev Yu., Myasishev R. Selection of methods of inspection of building structures to prevent damage // In the collection: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. International Conference Safety Problems of Civil Engineering Critical Infrastructures. Ural Federal University. 2020. pp. 012063. DOI: 10.1088/1757-899X/972/1/012063.

11. Henley E.J., Kumamoto H. Probabilistic risk assessment: Reliability Engineering, Design, and Analysis // IEEE Press. New York. 1992. 596 p.

12. Федотова М. И., Шмелев Г. Д. Прогноз риска аварии несущих строительных конструкций на основе расчета снижения несущей способности // Жилищное хозяйство и коммунальная инфраструктура. Научный журнал. 2022. № 2(21). С. 30-37. DOI: 10.36622/VSTU.2021.21.2.003.

13. Чернышева А.С., Чернышева Е.В. Технический надзор в строительстве // VI международная научно-практическая интернет-

---

конференция "Актуальные проблемы менеджмента качества и сертификации". Белгород: БГТУ им В.Г. Шухова, 2016. С. 188-192.

14. Ведяков И. И., Соловьев Д. В., Коваленко А. И. Вероятностный подход к оценке риска прогрессирующего обрушения // Промышленное и гражданское строительство. Ежемесячный научно-технический и производственный журнал. 2021. №10. С. 36-43. DOI: 10.33622/0869-7019.2021.10.36-43.

### References

1. Sheina S.G., Chubarova K.V., Moskalenko I.A. Inzhenernyj vestnik Dona, 2022, №5. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n5y2022/7669](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n5y2022/7669).
2. Hussamadinu Raafat., Jansson Gustav, Mukkavaara Jani. Luleå University of Technology. Sweden Buildings 2023. 13(2), 358 p. URL: [doi.org/10.3390/buildings13020358](https://doi.org/10.3390/buildings13020358).
3. Yuan Shuo, Wang Yanqing, Kang Limin, Yu Zhengquan, Fen Yong. Smart Construction Research. vol. 2 Issue 1. June 2018. pp. 1-5. DOI:10.18063/scrv.0.653.
4. Rojzman A.G. Preduprezhdenie avarij zhilyx zdaniy [Prevention of accidents in residential buildings]. M.: Strojizdat, 1990. 240 p.
5. Grozdov V.T. Texnicheskoe obsledovanie stroitelnyx konstrukcij zdaniy i sooruzhenij [Technical inspection of building structures of buildings and structures]. SPb.: Centr kachestva stroitelstva, 1998. 96 p.
6. Abrashitov V.S., Zhukov A.N., Ustinova A.V. Regionalnaya arhitektura i stroitelstvo. Nauchno-texnicheskij zhurnal. 2016. № 4 (29). pp. 67-70.
7. Petrov K.S., Fedoryaka A.V., Lami Karrar, Semenez V.G. Inzhenernyj vestnik Dona. 2018. №1. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2018/4717](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2018/4717).

8. Butyrin A.Yu Teoriya i praktika sudebnoy stroitel'no-tehnicheskoy ekspertizy. [Theory and practice of judicial construction and technical expertise]. M.: Izdatel'skiy dom "Gorodets", 2006. pp. 147-160.
9. Sergeeva A.Yu., Sergeev Yu.D., Myasishhev Yu.V., Myasishhev R.Yu. IX Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferenciya "Problemy` sovremenny`x e`konomicheskix, pravovy`x i estestvenny`x nauk v Rossii - sintez nauk v konkurentnoj e`konomie". Voronezh, 2021. pp. 223-232.
10. Mishchenko V.Ya., Sergeev Yu., Sergeeva A., Myasishev Yu., Myasishev R. In the collection: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. International Conference Safety Problems of Civil Engineering Critical Infrastructures. Ural Federal University. 2020. pp. 012063. DOI: 10.1088/1757-899X/972/1/012063.
11. Henley E.J., Kumamoto H. IEEE Press. New York. 1992. 596 p.
12. Fedotova M. I., Shmelev G. D. Housing and communal infrastructure. Scientific Journal. 2022. No. 2(21). pp. 30-37. DOI: 10.36622/VSTU.2021.21.2.003.
13. Cherny`sheva A.S., Cherny`sheva E.V. VI mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya internet-konferenciya "Aktual`ny`e problemy` menedzhmenta kachestva i sertifikacii". Belgorod: BGTU im V.G. Shuxova, 2016. pp. 188-192.
14. Vedyakov I.I., Solov`ev D.V., Kovalenko A.I. Promy`shlennoe i grazhdanskoe stroitel`stvo. Ezhemesyachny`j nauchno-texnicheskij i proizvodstvenny`j zhurnal. 2021. №10. pp. 36-43. DOI: 10.33622/0869-7019.2021.10.36-43.