

УДК 624.21.014

DOI: 10.31675/1607-1859-2022-24-5-169-177

*Б.С. СЕМУХИН,**Томский государственный архитектурно-строительный университет*

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛЕЙ НАПРЯЖЕНИЙ В СТАЛЬНЫХ АВТОДОРОЖНЫХ МОСТАХ

Аннотация. В настоящей статье в качестве объектов исследования взяты стальные конструкции автодорожных мостов.

Рассмотрены задачи построения многомерных динамических эпюр напряжений в стальных автодорожных мостах, решение которых позволяет анализировать и делать качественные и количественные выводы по безаварийной работе сложно нагруженных конструкций.

Предложено описывать пространственное распределение механических напряжений в строениях и конструкциях путем экспериментального их определения в процессе работы при различных нагрузках и одновременно с этим строить статистические распределения для разных точек и зон объекта. Для решения такой задачи были проведены измерения напряжений акустическим методом в процессе работы моста и построены математические распределения для всех измеренных точек.

Показано, что при определении всего массива нагрузок можно получить критерий безаварийной работы мостовых элементов и всей конструкции в целом. Для этого производится построение математических распределений.

Вводится еще один параметр критерия – X^2 . Отмечено, что реальное трехмерное распределение хорошо описывает работу различных узлов, деталей, частей стальных автодорожных мостов.

Полученные выводы подтверждают нашу гипотезу о возможности такого описания.

Ключевые слова: математическое распределение, многофакторная задача, динамические напряжения, строительные конструкции

Для цитирования: Семухин Б.С. Исследование полей напряжений в стальных автодорожных мостах // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2022. Т. 24. № 5. С. 169–177.

DOI: 10.31675/1607-1859-2022-24-5-169-177

*B.S. SEMUKHIN,**Tomsk State University of Architecture and Building*

STRESS FIELDS IN STEEL BRIDGES

Abstract. The paper deals with steel structures of road bridges. Multidimensional dynamic stress diagrams are suggested for steel road bridges. The analysis and quantitative conclusions are presented for the trouble-free operation of complex loaded structures. The paper describes the spatial distribution of mechanical stresses in buildings based on the obtained data on the operation under various loads and the statistical distribution of different points and zones of the object. Acoustic stress measurements are carried out during the bridge operation, and mathematical distributions are obtained for all measured points. It is shown that in determining the entire array of loads, a criterion can be identified for the trouble-free operation of bridge elements and the structure as a whole. Mathematical distributions are obtained or all measured points. The criterion parameter X^2 is introduced. It is found that the real three-dimensional distribution clearly describes the operation of various units and parts of steel road bridges. The findings confirm the proposed hypothesis about the possibility of such a description.

It is noted that the real three-dimensional distribution well describes the work of various nodes, parts, parts of steel road bridges.

The findings confirm our hypothesis about the possibility of such a description.

Keywords: mathematical distribution, multifactorial problem, dynamic stress, building

For citation: Semukhin B.S. Issledovanie polei napryazhenii v stal'nykh avtodorozhnykh mostakh [Stress fields in steel bridges]. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2022. V. 24. No. 5. Pp. 169–177.

DOI: 10.31675/1607-1859-2022-24-5-169-177

Введение

При проектировании современных мостовых конструкций, обладающих большими габаритами, конструкторы всячески стремятся уменьшить их вес, что приводит к изменению действующих в конструкции напряжений. К тому же использование новых композиционных материалов значительно усложняет анализ полей напряжений. Вес моста определяет, естественно, самую полную эпюру напряжений работающих конструкций [1–3]. Много работ посвящено таким проблемам, как связь степеней неравномерности «напряжения – деформации» с механическими свойствами материала труб. Также регулярно публикуются отчеты по моделированию полей напряжений в самой актуальной нефтегазоперекачивающей отрасли [5, 7].

В статьях за последние годы уделяется большое внимание проблемам остаточных действующих напряжений и влиянию остаточных напряжений на механические свойства [2, 3]. Определены четыре теоретически возможных вида распределений остаточных напряжений по толщине тонких холоднодеформированных изделий. Результаты получены при исследовании разных видов диаграмм зависимости напряжений от интенсивности деформаций. Полученные теоретические зависимости подтверждены экспериментальными исследованиями.

Показано, что наличие кривизны полей напряжений практически всегда приводит к появлению дополнительных изгибающих моментов и увеличению сжимающих и растягивающих продольных напряжений. Отклонение экспериментальных данных от нормального закона не влияет на качественный вывод, и его часто можно использовать в качестве первого приближения. При этом нередко оказывается, что подобное приближение дает удовлетворительные с точки зрения конкретных целей результаты. В настоящее время методики прогнозирования остаточного ресурса газопроводов, учитывающие фактический спектр изменения внешних нагрузок и процессы накопления от них усталостных повреждений в стенке трубы, отсутствуют [Там же].

Имеются статьи по оценке остаточного ресурса металлических мостов, по анализу характера нагрузок и напряженно-деформированного состояния коэффициента интенсивности напряжения и коэффициента трещиностойкости при нагружениях. Предложены зависимости параметров напряженно-деформированного состояния [4].

Распределение напряжений в строительных элементах мостовых сооружений в период монтажа может значительно отличаться от полей напряжений во время эксплуатации законченного объекта. Таким образом, возникает необходи-

мость разработки критерия распределения напряжений в одно-, двух- и трехмерных схемах. Однако это свойство распределения напряжений практически не отмечается в литературе. Поэтому актуальность и новизна настоящей работы заключалась в поисках экспериментальных данных, однозначно показывающих, как распределяются напряжения разной мерности, производится построение одно-, двух- и трехмерных зависимостей. В качестве промышленного образца выбрана система распределения напряжений в стальных автомобильных мостах. Хорошо известно, что автодорожный мост – достаточно простой технический объект, и обычно рассматривается работа конструкций при статических нагрузках. А все мосты – это конструкции, работающие при динамических нагрузках. Поэтому следующей процедурой становится задача построения эпюр динамических нагрузок. Отметим, что это более трудная задача по сравнению вышеупомянутыми напряжениями в трубах нефтегазопроводов. Таким образом, после построения графиков при динамической нагрузке можем выбрать уровень достоверности. Такую процедуру обеспечивает единственная на сегодняшний день методика математических распределений, которая обеспечивает нейтральную оценку напряжений. Последний шаг – это выбор типичных распределений и присвоения маркера главного распределения.

Приборы и методы эксперимента

В качестве неразрушающего метода контроля был выбран акустический метод измерения скорости звука для последующего перерасчета в напряжения. Отметим, что такая методика была разработана и проверена при аттестации различных автомобильных мостов доцентами ТГАСУ П.А. Катцыным и Б.Г. Акимовым. Они показали возможность ее использования на самых различных металлических автомобильных мостах, причем в одном из самых сложных по климатическим условиям месте страны – Западной Сибири. Ими была разработана и аттестована методика выполнения измерений (МВИ) («Напряжения в металлических конструкциях мостов и сооружений», 2002 г.). Акустический прибор, использованный в работе, позволял с высокой точностью измерять скорость ультразвука в исследуемом месте конструкции, т. е. локально изучать распределение напряжений.

Для построения самых различных полей напряжений необходимо проанализировать возможность измерения скорости звука во всех критически важных местах любой конструкции мостов. Это можно сделать по следующей схеме:

1. Вырезать из металла моста необходимое число образцов. Для получения наиболее достоверных значений их число не может быть менее 3–10 для одной точки и столько же для оценки влияния температуры. Наиболее ответственные узлы конструкции требуют еще большего числа образцов.

2. Построить, используя лабораторную технику, градуировочные графики для всех образцов.

3. Найти и решить уравнения, связывающие напряжения с деформацией и скоростью звука для всех измеряемых точек.

Считается что в практике большинства измерений все напряжения мостов упругие и определяются законом Гука, т. е. прямо пропорциональной зависимостью. Однако, как следует из большого количества статей, примерно 90–95 %

конструкций уже при изготовлении их в заводских условиях подвергаются сильным деформациям, что приводит к переходу стали моста из пластической в упруго-пластическую область, причем многие конструкции переходят практически в зону пластичности при некоторых природных условиях (низких или высоких температурах). Напряжения определяют путем перерасчета скорости звука в напряжения [8, 9].

В результате испытаний (измерений) мостовых конструкций возможно построить поля напряжений для любых частей моста. Предполагаем, что такие поля позволяют рассчитывать и использовать критерий прочности и надежности для любой мостовой конструкции.

Построение распределений напряжений в мостах

Для определения напряженного состояния металлических балок автодорожных мостов было проведено испытание главных балок Коммунального моста через р. Томь в г. Томске. Испытание проводилось в середине восьмого пролета. При проведении измерений движение по мосту не прерывалось. По полученным при испытании измерениям построена эпюра нормальных напряжений в заданном сечении балки (рис. 1).

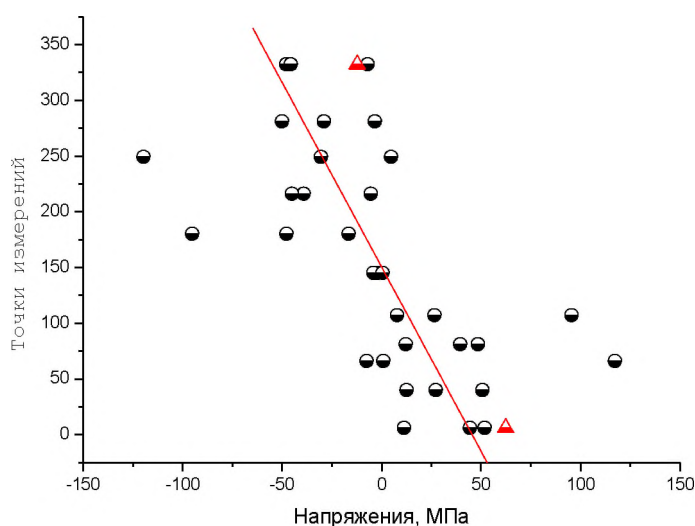


Рис. 1. Эпюра нормальных напряжений в заданном сечении балки моста (р. Томь, Томск, Коммунальный мост)

В результате анализа полученной эпюры напряжений установлено, что данным методом зафиксированы нормальные напряжения от собственного веса конструкции в крайних контрольных точках, причём значения напряжений достаточно близки к расчетным. Выбросы значений напряжений по полученной эпюре соответствуют местам расположения горизонтальных рёбер жёсткости и продольного заводского сварного шва стенки.

Описанным методом были оценены напряжения в конструкциях при испытании виадука через ручей Змеинка на 156-м км автомобильной дороги

Алтай – Кузбасс. При освидетельствовании мостового путепровода установлено распределение действующих и остаточных напряжений в нем и подтверждена возможность его безаварийной дальнейшей эксплуатации. Однако полученные эпюры не позволяли выработать какой-либо критерий прочности и надежности как для всей конструкции в целом, так и для локальных, но больших участков конструкции. Кроме того, было не ясно, в каких местах и как ведут себя поля напряжений в процессе эксплуатации, т. е. при динамических периодических нагрузках. Для решения таких задач предложено построение распределений массивов полей напряжений. На рис. 2 представлено такое распределение для виадука. Для исследуемого массива характерно существенное неоднородное распределение напряжений.

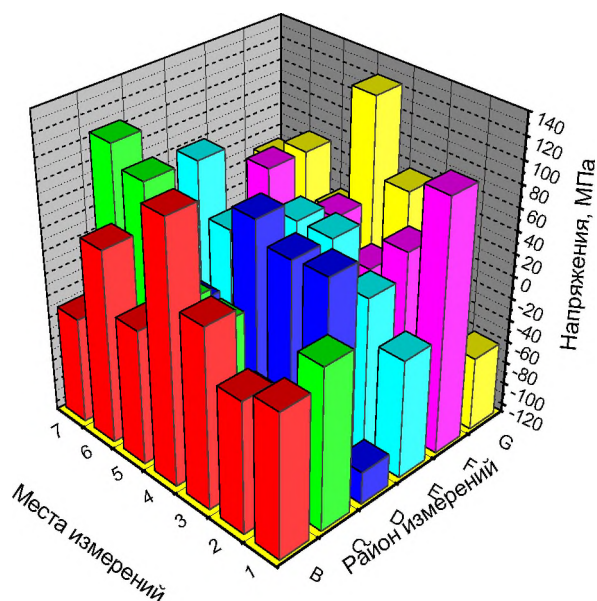


Рис. 2. Распределение массивов полей напряжений

Рассмотрим отдельно эти участки. На рис. 3 хорошо видно, что на всей длине виадука имеет место распределение напряжений локального характера. Очевидно, что большая нагрузка при работе и долгое время работы конструкций заставляют структурные элементы в стали 09Г2С перераспределяться с целью более прочной связи этих элементов друг с другом. К такому перераспределению приводит самоорганизация локальных напряжений. Таким образом, для любого состояния мостовой конструкции распределение напряжений состоит из двух частей: на концах конструкции, как правило, распределение нормальное, по Гауссу, а распределения между ними не описываются.

С помощью программы Origin были построены распределения напряжений и рассчитаны вероятность и коэффициент корреляции. В случае такого распределения (рис. 3) получаем высокий коэффициент корреляции и возможность применения χ^2 (хи-квадрат) распределения. Таким же образом нами построены распределения напряжений во всех трех мостах.

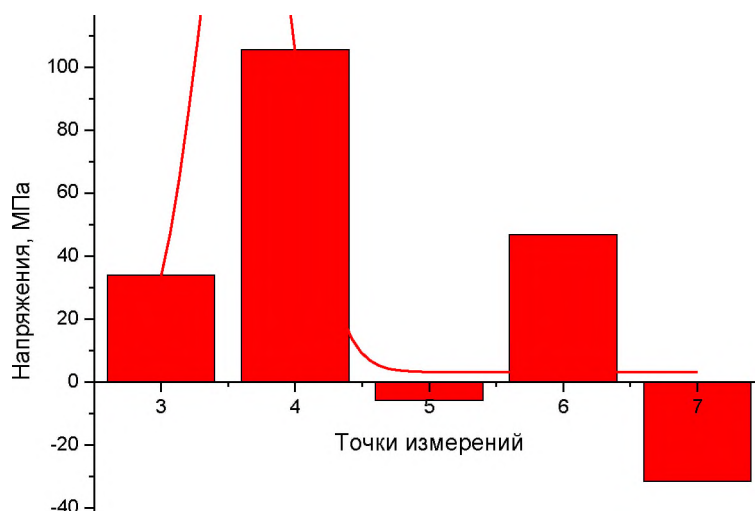


Рис. 3. Локальные распределения массивов полей напряжений при статической нагрузке

Из графических распределений (χ^2/DoF 1091, 43047; R^2 0,85246) видно, что имеются серьезные отличия как по величине напряжений, так и по месту образования, хотя все они удовлетворяют χ^2 (хи-квадрат) распределению и могут считаться нормальными распределениями по Гауссу.

Распределения напряжений при динамической нагрузке подобны напряжениям при статической нагрузке. Единственное, что их различает, – картина распределения, смещающаяся по длине конструкции (рис. 4).

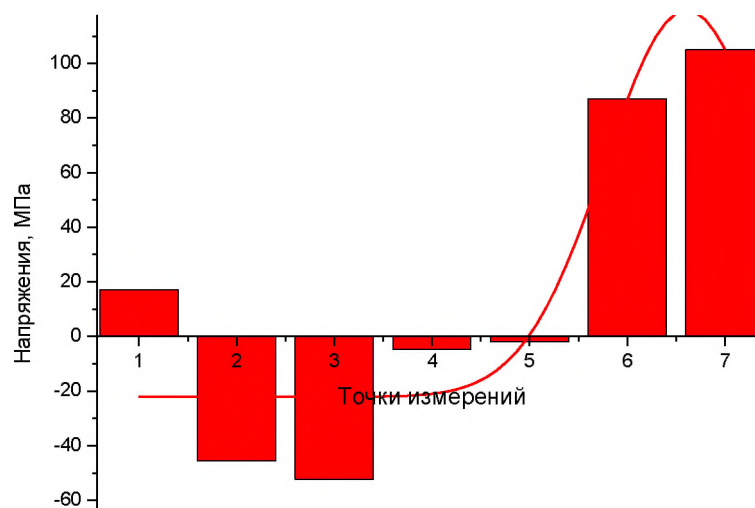


Рис. 4. Распределение напряжений при динамической нагрузке

Исходя из зависимости напряжений, отмечаем, что при динамических нагрузках отличий между разными участками значительно больше, чем при

статических. Таким образом, ясно, что при определении коэффициента корреляции и χ^2 (хи-квадрат) анализе можно различать наиболее опасные участки моста при нагрузках в разное время и при разных температурах [1, 8, 9]. Для всех стадий эксплуатации можно утверждать подчиненность количественно хи-квадрат распределению.

Особо надо выделить построение трехмерных распределений. На рис. 5 представлен такой объемный пример для виадука. Отчетливо можно выявить опасные зоны на разных стадиях эксплуатации. Однако, как показывает практический опыт, достоверность даже такого нормального распределения бывает завышенной [4–7].

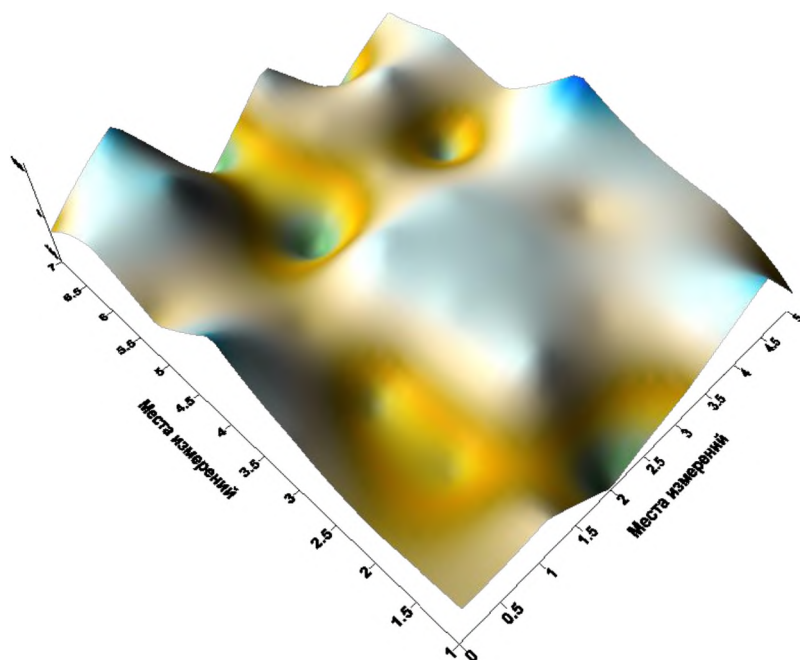


Рис. 5. Объемное распределение динамических напряжений (виадук)

Это возможно по следующим причинам:

- 1) слишком большие объемы измеренных данных;
- 2) измеренные данные получены не прямыми измерениями;
- 3) данные не могут использоваться при наличии действия внешних непроверяемых методик измерений;
- 4) МВИ для разных металлов различаются на очень маленькие значения измеряемых величин, что не позволяет их использовать.

Поэтому еще при разработке методов расчета распределения пришли к заключению о необходимости нормировки данных.

Сначала проводят анализ на наличие ошибок и отбраковывают недостоверные данные. Затем выбирают то распределение, под которое строят распределение. А далее нормируют данные путем деления всех значений по всем уровням на максимальное значение и строят распределения первого и второго

уровня. По формуле применим способ минимизации среднеквадратичного отклонения. Функция будет иметь вид

$$F = 1 - \Sigma(K_{\max} - K_i)^2,$$

где K_i – среднеквадратичное отклонение в квадрате; K_{\max} – максимальный коэффициент измеренного параметра.

Удастся получить аналитическую зависимость, по минимумам которой можно найти распределение, позволяющее оценить надежность данного моста. Таким образом, можно предлагать новый критерий надежности стальных автодорожных мостов. Он формулируется так: наличие на концах балки, фермы и т. д. хорошего нормального распределения и там же высокого коэффициента корреляции и хи-квадрат коэффициента обеспечивают доказательства надежности и живучести объекта.

Выводы

В результате проведения анализа действующих напряжений в стальных автодорожных мостах было получено поле таких величин.

Построены динамические распределения для разных сталей и мостов.

Установлен факт связи коэффициента корреляции с величиной и временем нагрузки.

Разработан новый критерий надежности для стальных автодорожных мостов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Семухин Б.С. Динамические напряжения автомобильных мостовых металлических сооружений // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2018. № 4. С. 170–176. URL: <https://doi.org/10.31675/1607-1859-2018-20-4-170-176>
2. Новак А.Г., Трофимов В.А., Шеванова М.И. Математическое моделирование полей деформаций и напряжений в дисковых оптических элементах // Научно-технический вестник Санкт-Петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики. 2011. № 5 (75) С. 5–11.
3. Третьяков Е.М. Остаточные напряжения в холоднодеформированных тонких изделиях и в тонколистовом дросселированном металле // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2008. № 1. С. 49–61.
4. Козлов В.А. Напряженно-деформированное состояние многосвязных призматических конструктивных элементов мостовых сооружений // Научный вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета. Строительство и архитектура. 2011. № 4. С. 110–117.
5. Сызранцев В.Н., Антонов М.Д. Восстановление функции плотности распределения предельных напряжений материала газопровода на основе значений их квантильных оценок // Газовая промышленность. 2020. № 12 (810). С. 86–93.
6. Трусов П.В., Соколов А.С. Двухуровневая упруговязкопластическая модель: анализ влияния распределения ориентаций кристаллитов в отсчетной конфигурации и сложности нагружения на поведение поликристаллических материалов // Вычислительная механика сплошных сред. 2021. Т. 14. № 4. С. 398–412.
7. Картопольцев В.М., Боровиков А.А., Картопольцев А.В. Оценка остаточного ресурса конструкций металлических мостов по критерию трещинообразования // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2015. № 2 (49). С. 176–183.
8. Акимов Б.Г., Катцын П.А., Гавриленко С.М., Семухин Б.С., Андреев М.И., Шурыгин Ю.А. Акустический метод определения напряжений и состояние металла в мостовых конструкциях // Наука и техника в дорожной отрасли. 2001. № 4. С. 22–26.

9. Катцын П.А., Семухин Б.С., Акимов Б.Г., Чиков С.А. Применение ультразвуковых методов для оценки напряженного состояния мостовых конструкций // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2000. № 2. С. 257–264.

REFERENCES

1. Semukhin B.S. Dinamicheskie napryazheniya avtomobil'nykh mostovykh metallicheskiykh sooruzheniy [Dynamic stress in automobile bridgeworks]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture*. 2018. No. 4. Pp. 170–176. (rus)
2. Novak A.G., Trofimov V.A., Shvanova M.L. Matematicheskoe modelirovaniye polei deformatsii i napryazheniy v diskovykh opticheskikh elementakh [Mathematical modeling of deformation and stress fields in disk optical elements]. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo universiteta informatsionnykh tekhnologii, mekhaniki i optiki*. 2011. No. 5 (75). Pp. 5–11. (rus)
3. Tretyakov E.M. Ostatochnyye napryazheniya v kholodnodeformirovannykh tonkikh izdeliyakh i v tonkolistovom dressirovannom metalle [Residual stresses in cold-formed thin products and in thin-sheet trained metal]. *Problemy mashinostroyeniya i nadezhnosti mashin*. 2008. No. 1. Pp. 49–61. (rus)
4. Kozlov V.A. Napryazhenno-deformirovannoye sostoyaniye mnogosvyaznykh prizmaticheskikh konstruktivnykh elementov mostovykh sooruzheniy [Stress-strain state of multi-connected prismatic structural elements of bridge structures]. *Nauchnyi vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Stroitel'stvo i arkhitektura*. 2011. No. 4. Pp. 110–117. (rus)
5. Syzrantsev V.N., Antonov M.D. Vosstanovleniye funktsii plotnosti raspredeleniya predel'nykh napryazheniy materiala gazoprovoda na osnove znacheniy ikh kvantil'nykh otsenok [Restoration of distribution density function of limiting stresses in gas pipeline material based on their quantile estimates]. *Gazovaya promyshlennost'*. 2020. No.12 (810). Pp. 86–93. (rus)
6. Trusov P.V., Sokolov A.S. Dvukhurovnevaya uprugovyazkoplasticheskaya model': analiz vliyaniya raspredeleniya orientatsii kristallitov v otschetnoi konfiguratsii i slozhnosti nagruzheniya na povedeniye polikristallicheskiykh materialov [Two-level elastic-viscoplastic model: Analysis of orientation distribution of crystallites in the reference configuration and complexity of loading depending on polycrystalline material behavior]. *Vychislitel'naya mekhanika sploshnykh sred*. 2021. V. 14. No. 4. Pp. 398–412. (rus)
7. Kartopoltsev V.M., Borovikov A.A., Kartopoltsev A.V. Otsenka ostatochnogo resursa konstruktivnykh metallicheskiykh mostov po kriteriyu treshchinoobrazovaniya [Residual life of metal bridge structures estimated by crack formation]. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2015. No. 2 (49). Pp. 176–183. (rus)
8. Akimov B.G., Katsyn P.A., Gavrilenko S.M., Semukhin B.S., Andreev M.I., Shurygin Yu.A. Akusticheskii metod opredeleniya napryazheniy i sostoyaniya metalla v mostovykh konstruktsiyakh [Acoustic method for stress state identification in metal bridge structures]. *Nauka i tekhnika v dorozhnoy otrasli*. 2001. No. 4. Pp. 22–26. (rus)
9. Katsyn P.A., Semukhin B.S., Akimov B.G., Chikov S.A. Primeneniye ul'trazvukovykh metodov dlya otsenki napryazhennogo sostoyaniya mostovykh konstruktсий [Application of ultrasonic methods for assessing the stress state of bridge structures]. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2000. No. 2. Pp. 257–264. (rus)

Сведения об авторе

Семухин Борис Семенович, докт. техн. наук, профессор, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2.

Author Details

Boris S. Semukhin, DSc, Professor, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia.