

А.П. ЛОКТИОНОВ<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Россия

## ОБРАТНАЯ ЗАДАЧА КОШИ ДЛЯ СТОЕЧНО-БАЛОЧНОЙ КОНСТРУКТИВНОЙ СИСТЕМЫ

**Аннотация.** Объектом исследования являются стоечно-балочные конструктивные системы зданий с жестким сопряжением балки со стойкой. Цель исследования состоит в оценке влияния на точность решения задачи погрешности входных данных и числа заданных коэффициентов уравнения прогибов. Исследования проведены аналитическо-экспериментальными методами сеточной регуляризации, редукции измерений, решений на измерительном компакте, полиномиальной аппроксимации, линейной лагранжевой интерполяции и численного дифференцирования.

Аналитически и натурным экспериментом смоделировано жесткое сопряжение балки со стойкой. Для количественной оценки эффективности решения задачи определены значения целевого параметра и критерия оптимизации по минимуму функции Лебега. Предложено использовать полученные результаты решения обратной задачи Коши при экспериментально-теоретических исследованиях стоечно-балочных конструктивных систем.

**Ключевые слова:** балка, обратная задача Коши, модель измерения, прогиб, аппроксимация, критерий оптимизации.

A.P. LOKTIONOV<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Southwest State University, Kursk, Russia

## INVERSE CAUCHY PROBLEM FOR RACK-AND-BEAM STRUCTURE

**Abstract.** The object of this study is the building frames with rigid beam-to-column assemblies. The aim of the study is to assess the impact on the accuracy of the solution of the problem of the error of the input data and the number of given coefficients of the deflection equation. The studies were carried out using analytical and experimental methods of regularization, reduction of measurements, solutions on a measuring compact, polynomial approximation, linear Lagrangian interpolation and numerical differentiation.

Rigid coupling of a beam with a rack is modeled analytically and by a full-scale experiment. For a quantitative assessment of the effectiveness of solving the problem, the values of the target parameter and the optimization criterion are determined through the minimum of the Lebesgue function. It is proposed to use the obtained results of solving the inverse Cauchy problem in experimental and theoretical studies of rack-and-beam structures.

**Keywords:** beam, inverse Cauchy problem, measurement model, deflection, approximation, optimization criterion.

© Локтионов А.П., 2023

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Tusnina O.A., Danilov A.I. The stiffness of rigid joints of beam with hollow section column // Magazine of Civil Engineering. 2016. Vol. 64(4). Pp. 40–51. <https://doi.org/10.5862/MCE.64.4>.
2. Tusnina V.M. Semi-rigid steel beam-to-column connections // Magazine of Civil Engineering. 2017. Vol. 73(5). Pp. 25-39. <https://doi.org/10.18720/MCE.73.3>.

3. Кашеварова Г.Г., Тонков Ю.Л., Тонков И.Л. Интеллектуальная автоматизация инженерного обследования строительных объектов // *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2017. Vol. 13(3). Pp. 42–57. <https://doi.org/10.22337/1524-5845-2017-13-3-42-57>.
4. Локтионов А.П. Информационно-измерительная система с лагранжевой аппроксимацией для экспериментально-расчетного определения усилий в элементах конструктивных систем при обследовании зданий текстильной и химической промышленности // *Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности*. 2017. Т. 370. № 4. С. 252–258. URL:[http://tftp.ivgpu.com/wp-content/uploads/2017/12/370\\_55.pdf](http://tftp.ivgpu.com/wp-content/uploads/2017/12/370_55.pdf) (дата обращения: 26.12.2022).
5. Yang C. Sensor placement for structural health monitoring using hybrid optimization algorithm based on sensor distribution index and FE grids // *Structural Control and Health Monitoring*. 2018. Vol. 5(6). <https://doi.org/0.1002/stc.2160>.
6. Люблинский В.А., Томина М.В. Экспериментальное исследование прочности и податливости вертикального сварного стыка // *Системы. Методы. Технологии*. 2018. № 3 (39). С. 154-158. doi:10.18324/2077-5415-2018-3-154-158.
7. Lehmhus D., Busse M. Structural health monitoring (SHM). In: Bosse S., Lehmhus D., Lang W. (eds). *Material Integrated Intelligent Systems Technology and Applications: Technology and Applications*. John Wiley & Sons Inc.; 2018. Pp. 529–570. 696 p. <https://doi.org/10.1002/9783527679249>.
8. Малахова А.Н., Маринина Д.А. Податливость вертикальных стыков крупнопанельных зданий на закладных деталях // *Строительство и реконструкция*. 2019. № 6 (86). С.10-18. doi:10.33979/2073-7416-2019-86-6-10-18.
9. Локтионов А.П. Информационная система анализа балочных элементов под комбинированной нагрузкой // *Строительная механика и расчет сооружений*. 2021. № 2. С. 45-52. doi:10.37538/0039-2383.2021.2.45.52.
10. Локтионов А.П. Информационно-измерительная система мониторинга балок в строительных конструкциях // *Известия Юго-Западного государственного университета*. 2021. Т. 25. № 4. С. 23–51. doi:10.21869/2223-1560-2021-25-4-29-51.
11. Авдеев К.В., Мамин А.Н., Бобров В.В., Бамматов А.А., Мартыанов К.В., Пряхин С.Н. Петлевые стыки стержневой арматуры. История развития, проблемы и актуальность // *Строительство и реконструкция*. 2022. № 6 (104). С. 4-11.
12. Локтионов А. П. Об измерении изгибающих нагрузок навесными электротензометрическими преобразователями // *Изв. вузов. Авиационная техника*. 1982. № 2. С. 73-75.
13. Локтионов А.П. Обзор и анализ способов и устройств измерения поперечной изгибной нагрузки на элементы шасси / *Курск. политехн. ин-т. Курск*, 1991. 45 с. – Деп. В ЦНТИ ГА 15.09.91, № 835-га91.
14. Ватульян А.О., Плотников Д.К. Обратные коэффициентные задачи в механике // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика*. 2019. № 3. С. 37-47. doi: 10.15593/perm.mech/2019.3.0.
15. Shi Z., O'Brien W. Development and implementation of automated fault detection and diagnostics for building systems: A review // *Automation in Construction*. 2019. No. 104. Pp. 215-229. doi:10.1016/j.autcon.2019.04.002.
16. Favorskaya A.V., Petrov I.B. Grid-characteristic calculation of multistorey buildings destruction // *Mathematical Models and Computer Simulations*. 2020. No. 32(3). Pp. 102-114. doi:<https://doi.org/10.20948/mm-2020-03-06>.
17. Перельмутер А.В. Обратные задачи строительной механики // *Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета*. 2020. № 22(4). С. 83-101. doi:10.31675/1607-1859-2020-22-4-83-101.
18. Siraya T.N. Methods of data processing in measurements and metrological models // *Measurement Techniques*. 2018. No. 61. Pp. 9-16. <https://doi.org/10.1007/s11018-018-1380-y>.
19. Smirnova A., Bakushinsky A. On iteratively regularized predictor-corrector algorithm for parameter identification // *Inverse Problems*. 2020. Vol. 36. No. 12. id.125015. P. 30. doi:10.1088/1361-6420/abc530.
20. Кудрявцев К.Я. Алгоритм построения полинома наилучшего равномерного приближения по экспериментальным данным // *Вестник национального исследовательского ядерного университета МИФИ*. 2019. Т. 8(5). С. 480-486. <https://doi.org/10.1134/S2304487X1905002X>.
21. Bakushinsky A. B., Kokurin, M. M., Kokurin, M. Yu. *Regularization Algorithms for Ill-Posed Problems. Inverse and Ill-Posed Problems Series*, 61. Boston. USA: De Gruyter; 2018. <https://doi.org/10.1515/9783110557350>.
22. Балакин Д.А., Пытьев Ю.П. Редукция измерения при наличии субъективной информации // *Математическое моделирование и численные методы*. 2018. Т. 30. № 12. С. 84–110. doi:10.31857/S023408790001938-5.
23. Verbrugge M.W., Wampler C.W., Baker D.R. Smoothing methods for numerical differentiation to identify electrochemical reactions from open-circuit-potential data // *Journal of The Electrochemical Society*. 2018. Vol. 165 No. 16. Pp. A4000-A4011. <https://doi.org/10.1149/2.0951816.jes>.
24. Loktionov A.P. Numerical differentiation in the measurement model // *Measurement Techniques*. 2019. No. 62. Pp. 673-680. <https://doi.org/10.1007/s11018-019-01677-z>.

25. Kalenchuk-Porkhanova A. Best Chebyshev approximation for compression of big information arrays // Proceedings of the 10th International Scientific and Practical Conference named after A. I. Kitov "Information Technologies and Mathematical Methods in Economics and Management (IT&MM-2020)". October 15-16, 2020. Moscow, Russia. P1-13. URL:<http://sunsite.informatik.rwth-aachen.de/ftp/pub/publications/CEUR-WS/Vol-2830.zip.paper25.pdf>. (дата обращения 20.12.2022).
26. Boykov I.V., Krivulin N.P. An approximate method for recovering input signals of measurement transducers // Measurement Techniques. 2022. V. 64. No. 4. Pp. 943-948. <https://doi.org/10.1007/s11018-022-020263>.
27. Loktionov A.P. Regularization of the lattice time function of the signal in the communication channel // Telecommunications and Radio Engineering. 2013. Vol. 72. No. 2. Pp. 161-171. doi:10.1615/TelecomRadEng.v72.i2.70.
28. Мещихин И.А., Гаврюшин С.С. Критерии качества и алгоритм выбора редуцированных моделей для мониторинга технических конструкций // Математическое моделирование и численные методы. 2016. Т. 12. № 4. С. 103-121. <https://doi.org/10.18698/2309-3684-2016-4-103121>.
29. Ibrahimoglu B.A. Lebesgue functions and Lebesgue constants in polynomial interpolation // Journal of Inequalities and Applications. 2016. No. 93. Pp. 1-15. <https://doi.org/10.1186/s13660-016-1030-3>.
30. Loktionov A.P. Information measuring system of numerical differentiation for the analysis of elements of mechanical structures // Journal of the Serbian Society for Computational Mechanics. 2018. Vol. 12. No. 2. Pp. 53-71. doi: 10.24874/jsscm.2018.12.02.04.
31. Meshchikhin I.A., Gavryushin S.S. The envelope method in the problem of choosing a rational composition of measuring instruments // Measurement Techniques. 2021. No. 64. Pp. 151-155. doi:<https://doi.org/10.1007/s11018-021-01910-8>.
32. Локтионов А.П. Обратная задача коши для балок в строительных конструкциях // Строительство и реконструкция. 2022. № 2 (100). С. 13-25. doi:10.33979/2073-7416-2022-100-2-13-25.
33. Локтионов А.П. Восстановление начальных параметров балки при заданных младших коэффициентах уравнения прогибов // Строительная механика и расчет сооружений. 2022. № 6. С. 2-7. doi:10.37538/0039-2383.2022.6.2.7 ИФ =0,552.

## REFERENCES

1. Tushina O.A., Danilov A.I. The stiffness of rigid joints of beam with hollow section column. Magazine of Civil Engineering. 2016. Vol. 64. No. 4. Pp. 40-51. <https://doi.org/10.5862/MCE.64.4>.
2. Tushina V.M. Semi-rigid steel beam-to-column connections. Magazine of Civil Engineering. 2017. Vol. 73. No. 5. Pp. 25-39. <https://doi.org/10.18720/MCE.73.3>.
3. Kashevarova G.G., Tonkov, Y.L., Tonkov I.L. Intellectuall'naya avtomatizatsiya inzhenernogo obsledovaniya stroitel'nykh ob'ektov [Intellectual automation of engineering survey of building objects] // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering, 2017. Vol. 13. No. 3. Pp. 42-57. <https://doi.org/10.22337/1524-5845-2017-13-3-42-57>. (rus).
4. Loktionov A.P. Informacionno-izmeritel'naya sistema s lagranzhevoj approksimaciej dlya e'ksperimental'no-raschetnogo opredeleniya usilij v e'lementax konstruktivny'x sistem pri obsledovanii zdaniy tekstil'noj i ximicheskoy promy'shennosti [Information-measuring system of experimental and calculation determination of a bending moment with the Lagrange approximation at inspection of buildings]. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promy'shennosti. 2017. Vol. 370. No. 4. Pp. 252-258. URL:[http://tp.ivgpu.com/wp-content/uploads/2017/12/370\\_55.pdf](http://tp.ivgpu.com/wp-content/uploads/2017/12/370_55.pdf) (data obrashheniya: 26.12.2022). (rus).
5. Yang C. Sensor placement for structural health monitoring using hybrid optimization algorithm based on sensor distribution index and FE grids. Structural Control and Health Monitoring. 2018. Vol. 5. No. 6. P. 2160. <https://doi.org/10.1002/stc.2160>.
6. Lyublinskiy V.A., Tomina M.V. E'ksperimental'noe issledovanie prochnosti i podatlivosti vertikal'nogo svarnogo sty'ka [Experimental study of the strength and suppleness of a vertical welded joint]. Sistemy. Metody. Tekhnologii. 2018. Vol. 3. No. 39. Pp. 154-158. doi:10.18324/2077-5415-2018-3-154-158. (rus).
7. Lehmhus D., Busse M., Structural Health Monitoring (SHM). In: Bosse S., Lehmhus D., Lang W. (eds). Material Integrated Intelligent Systems Technology and Applications: Technology and Applications. John Wiley & Sons Inc.; 2018. Pp. 529–570. 696 p. <https://doi.org/10.1002/9783527679249>.
8. Malakhova A.N., Marinina D.A. Podatlivost' vertikal'ny'x sty'kov krupnopanel'ny'x zdaniy na zakladny'x detal'yax [The compliance of vertical joints of large-panel buildings made on embedded parts]. Building and Reconstruction. 2019. Vol. 86. No. 6. Pp. 10-18. doi:10.33979/2073-7416-2019-86-6-10-18. (rus).
9. Loktionov A.P. Informacionnaya sistema analiza balochny'x e'lementov pod kombinirovannoj nagruzkoy [Information system for analysis of beam elements under combined load]. Structural Mechanics and Analysis of Constructions. 2021. No. 2. Pp. 45-52. doi:10.37538/0039-2383.2021.2.45.52. (rus).

10. Loktionov A.P. Informacionno-izmeritel'naya sistema monitoringa balok v stroitel'nykh konstrukciyax [Information and Measurement System for Monitoring Beams in Building Structures]. Proceedings of the Southwest State University. 2021. Vol. 25. No. 4. Pp. 29-51. doi:10.21869/2223-1560-2021-25-4-29-51. (rus).
11. Avdeev K.V., Mamin A.N., Bobrov V.V., bammатов A.A., Martyanov K.V., Pryakhin S.N. Petlevy'e sty'ki sterzhnevoj armatury'. Istoriya razvitiya, problemye i aktual'nost' [The loop joins of rebars. development history, problems and relevance]. Building and reconstruction. 2022. No. 6 (104). Pp. 4-11. (rus).
12. Loktionov A.P. Measurement of bending loads with suspended electric strain gages // Soviet Aeronautics. 1982. No. 25(2). Pp. 85-88.
13. Loktionov A.P. Obzor i analiz sposobov i ustrojstv izmereniya poperechnoj izgibnoj nagruzki na e'lementy` shassi [Review and analysis of methods and devices for measuring transverse bending load on chassis elements]. Kursk. politehn. in-t. Kursk, 1991. 45 p. Dep. V CNTI GA 15.09.91, № 835-ga91. (rus).
14. Vatulyan A.O., Plotnikov D.K. Obratny'e koefficientny'e zadachi v mexanike [Inverse coefficient problems in mechanics]. Vestnik Permskogo nacional'nogo issledovatel'skogo politexnicheskogo universiteta. Mexanika. 2019. No. 3. Pp. 37-47. doi:10.15593/perm.mech/2019.3.04. (rus).
15. Shi Z., O'Brien W. Development and implementation of automated fault detection and diagnostics for building systems: A review. Automation in Construction. 2019. No. 104. Pp. 215-229. doi:10.1016/j.autcon.2019.04.002.
16. Favorskaya A.V., Petrov I.B. Grid-characteristic calculation of multistorey buildings destruction // Mathematical Models and Computer Simulations. 2020. No. 32(3). Pp. 102-114. doi:https://doi.org/10.20948/mm-2020-03-06.
17. Perelmuter A.V. Obratnye zadachi stroitel'noi mekhaniki [Inverse problems of structural mechanics]. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. 2020. Vol. 22. No. 4. Pp. 83-101. doi:10.31675/1607-1859-2020-22-4-83-101. (rus).
18. Siraya T.N. Methods of data processing in measurements and metrological models // Measurement Techniques. 2018. No. 61. Pp. 9-16. https://doi.org/10.1007/s11018-018-1380-y.
19. Smirnova A., Bakushinsky A. On iteratively regularized predictor-corrector algorithm for parameter identification. Inverse Problems. 2020. Vol. 36. No. 12. id.125015. P. 30. doi:10.1088/1361-6420/abc530.
20. Kudryavcev K.Ya. Algoritm postroeniya polinoma nailuchshego ravnomernogo priblizheniya po eksperimental'nym dannym [Algorithm for constructing a polynomial of the best uniform approximation from experimental data]. Vestnik nacional'nogo issledovatel'skogo yadernogo universiteta MIFI. 2019. Vol. 8. No. 5. Pp. 480-486. https://doi.org/10.1134/S2304487X1905002X. (rus).
21. Bakushinsky A. B., Kokurin, M. M., Kokurin, M. Yu. Regularization Algorithms for Ill-Posed Problems. Inverse and Ill-Posed Problems Series, 61. Boston. USA: De Gruyter; 2018. https://doi.org/10.1515/9783110557350.
22. Balakin D. A., Pyt'ev Yu. P. Measurement reduction in the presence of subjective information // Mathematical Models and Computer Simulations. 2019. Vol. 11, No. 4. Pp. 596-610. https://doi.org/10.1134/S2070048219040033.
23. Verbrugge M.W., Wampler C.W., Baker D.R. Smoothing methods for numerical differentiation to identify electrochemical reactions from open-circuit-potential data // Journal of The Electrochemical Society. 2018. Vol. 165. No. 16. Pp. A4000-A4011. https://doi.org/10.1149/2.0951816jes.
24. Loktionov A.P. Numerical differentiation in the measurement model // Measurement Techniques. 2019. No. 62. Pp. 673-680. https://doi.org/10.1007/s11018-019-01677-z.
25. Kalenchuk-Porkhanova A. Best Chebyshev approximation for compression of big information arrays. Proceedings of the 10th International Scientific and Practical Conference named after A. I. Kitov "Information Technologies and Mathematical Methods in Economics and Management (IT&MM-2020)". October 15-16. 2020. Moscow. Russia. Pp. 1-13. URL:http://sunsite.informatik.rwth-aachen.de/ftp/pub/publications/CEUR-WS/Vol-2830.zip. paper25.pdf. (accessed 20.12.2022).
26. Boykov I.V., Krivulin N.P. An approximate method for recovering input signals of measurement transducers // Measurement Techniques. 2022. Vol. 64. No. 4. Pp. 943-948. https://doi.org/10.1007/s11018-022-020263.
27. Loktionov A.P. Regularization of the lattice time function of the signal in the communication channel // Telecommunications and Radio Engineering. 2013. Vol. 72. No. 2. Pp. 161-171. doi:10.1615/TelecomRadEng.v72.i2.70.
28. Meschikhin I.A., Gavryushin S.S. Algoritm postroeniya polinoma nailuchshego ravnomernogo priblizheniya po eksperimental'nym dannym [Algorithm for constructing a polynomial of the best uniform approximation from experimental data]. Mathematical Models and Computer Simulations. 2016. Vol. 12. No. 4. Pp. 103-121. https://doi.org/10.18698/2309-3684-2016-4-103121. (rus).
29. Ibrahimoglu B.A. Lebesgue functions and Lebesgue constants in polynomial interpolation // Journal of Inequalities and Applications. 2016. No. 93. Pp. 1-15. https://doi.org/10.1186/s13660-016-1030-3.
30. Loktionov A.P. Information measuring system of numerical differentiation for the analysis of elements of mechanical structures // Journal of the Serbian Society for Computational Mechanics. 2018. Vol. 12. No. 2. Pp. 53-71. doi:10.24874/jsscm.2018.12.02.04.

31. Meshchikhin I.A., Gavryushin S.S. The envelope method in the problem of choosing a rational composition of measuring instruments // Measurement Techniques. 2021. No. 64. Pp. 151-155. doi:<https://doi.org/10.1007/s11018-021-01910-8>.

32. Loktionov A.P. Obratnaya zadacha koshi dlya balok v stroitel'ny`x konstrukciyax [Inverse cauchy problem for beams in building structures]. Building and reconstruction. 2022. No. 2 (100). Pp. 13-25. doi:[10.33979/2073-7416-2022-100-2-13-25](https://doi.org/10.33979/2073-7416-2022-100-2-13-25). (rus)

33. Loktionov A.P. Vosstanovlenie nachal'ny`x parametrov balki pri zadanny`x mladshix koe`fficientax uravneniya progibov [Recovery of the initial parameters of the beam with the given junior coefficients of the deflection equation]. Structural Mechanics and Analysis of Constructions. 2022. No. 6. Pp. 2-7. doi:[10.37538/0039-2383.2022.6.2.7](https://doi.org/10.37538/0039-2383.2022.6.2.7), (rus)

**Информация об авторе:**

**Локтионов Аскольд Петрович**

ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Россия,  
доктор технических наук, доцент.

E-mail: [loapa@mail.ru](mailto:loapa@mail.ru)

**Information about authors:**

**Loktionov Askold P.**

Southwest State University, Kursk, Russia,  
doctor of engineering, associate professor.

E-mail: [loapa@mail.ru](mailto:loapa@mail.ru)