

А.П. ЛОКТИОНОВ¹

¹ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Россия

ОБРАТНАЯ ЗАДАЧА КОШИ ДЛЯ БАЛОК В СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЯХ

Аннотация. Предложен показатель качества коэффициентной сеточной обратной задачи Коши для балок в строительных конструкциях. Показатель построен на основе теории регуляризации обратных задач. Аналитически и натурным экспериментом смоделировано шарнирное опирание балки на колонну. Информационно-измерительной системой исследованы модели измерения и вычислений при равномерной непрерывной норме погрешности измерения прогибов и вычисления параметров идентификации балки. Модели отличаются различными сочетаниями видов внешней нагрузки.

Мера влияния погрешности средства измерений и распределения узлов сетки аппроксимации на погрешность определения коэффициентов уравнения прогибов балки с фиксированным младшим коэффициентом описана безразмерным абсолютным числом обусловленности задачи. Проанализированы значения безразмерного абсолютного числа обусловленности и показателя качества задачи в зависимости от распределения узлов сетки аппроксимации, погрешности средства измерений и типа модели измерения и вычислений.

Предложено использовать полученные аналитические зависимости для анализа строительных конструкций на стадии экспериментально-теоретических исследований.

Ключевые слова: балка, обратная задача Коши, модель измерения, прогиб, информационно-измерительная система, численное дифференцирование.

A.P. LOKTIONOV¹

¹Southwest State University, Kursk, Russia

INVERSE CAUCHY PROBLEM FOR BEAMS IN BUILDING STRUCTURES

Abstract. A quality index of the coefficient grid inverse Cauchy problem for beams in building structures is proposed. The indicator is based on the theory of regularization of inverse problems. An articulated support of a beam on a column is modeled analytically and by a full-scale experiment. Models of measurement and calculation are investigated for a uniform continuous error rate of deflection measurement and calculation of beam identification parameters. Models differ in various combinations of types of external load.

A measure of the influence of the error of the measuring instrument and the distribution of approximation grid nodes on the error in determining the coefficients of the beam deflection equation with a fixed first coefficient is proposed. The measure of influence is described by the dimensionless absolute condition number of the problem. The values of the dimensionless absolute condition number and the quality index of the problem are analyzed depending on the distribution of approximation grid nodes, the error of the measuring instrument, and the type of measurement and calculation model.

It is proposed to use the obtained analytical dependencies for the analysis of building structures at the stage of experimental and theoretical studies.

Keywords: beam, inverse Cauchy problem, measurement model, deflection, information-measuring system, numerical differentiation.

© Локтионов А.П., 2022

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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.

2. 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>.
3. Shi Z., O'Brien W. Development and implementation of automated fault detection and diagnostics for building systems: A review // *Automation in Construction*. 2019. № 104. P. 215-229. doi: 10.1016/j.autcon.2019.04.002
4. Meshchikhin I.A., Gavryushin S.S. The envelope method in the problem of choosing a rational composition of measuring instruments // *Measurement Techniques*. 2021. № 64. P. 151-155. doi: <https://doi.org/10.1007/s11018-021-01910-8>.
5. 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. P. 529–570. 696 p. <https://doi.org/10.1002/9783527679249>.
6. Chen H-P., Ni Yi-Q. Structural health monitoring of large civil engineering structures. 111 River Street, Hoboken, NJ 07030, USA: John Wiley & Sons Inc., 2018. 302 p. doi:10.1002/9781119166641.
7. Бойков И.В., Кривулин Н.П. Приближённый метод восстановления входных сигналов измерительных преобразователей // *Измерительная техника*. 2021. № 12. С. 3-7. doi: 10.32446/0368-1025it.2021-12-3-7.
8. Building structural health monitoring using dense and sparse topology wireless sensor network / M.E. Haque, M.F.M. Zain, M.A. Hannan, M.H. Rahman // *Smart Structures and Systems*. 2015. Vol. 16(4). P. 607-621. <https://doi.org/10.12989 / sss.2015.16.4.623>.
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. Tushina 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>.
11. Tushina 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>.
12. 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.
13. 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.
14. Siraya T.N. Methods of data processing in measurements and metrological models // *Measurement Techniques*. 2018. №61. P. 9-16. <https://doi.org/10.1007/s11018-018-1380-y>.
15. 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](https://doi.org/10.1088/1361-6420/abc530).
16. Danilov M.F., Savel'eva A.A. Analysis of basic data of unstable problems of coordinate measurements of geometrical parameters of products // *Measurement Techniques*. 2018. Vol. 61(6). P. 588-594. doi:10.1007/s11018-018-1469-3.
17. 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](https://doi.org/10.31857/S023408790001938-5).
18. Chekushkin V.V., Mikheev K.V. Fast search algorithms for the best approximation polynomials for reproduction of functional dependences in data-measurement systems // *Measurement Techniques*. 2016. Vol. 59(4). P. 351-356. <https://doi.org/10.1007/s11018-016-0970-9>.
19. 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>.
20. 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. P. A4000-A4011. <https://doi.org/10.1149/2.0951816.jes>.
21. 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.
22. Denisov A. M. Iterative Method for Solving an Inverse Coefficient Problem for a Hyperbolic Equation // *Differential Equations*. 2017. Vol. 53. No. 7. Pp. 916–922. doi:[10.1134/S0012266117070084](https://doi.org/10.1134/S0012266117070084).
23. Loktionov A.P. A measuring system for determination of a cantilever beam support moment // *Smart Structures Systems*. 2017. No. 4. Pp. 431-439. doi: 10.12989 / sss.2017.19.4.431.
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. 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>.
26. 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. P. 1-13. URL: <http://sunsite.informatik.rwth-aachen.de/ftp/pub/publications/CEUR-WS/Vol-2830.zip.paper25.pdf>. (дата обращения 20.03.2022).
27. Калиткин Н.Н., Колганов С.А. Построение аппроксимаций, удовлетворяющих чебышевскому альтернансу. Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша, 2020. № 91. 33 с. <https://doi.org/10.20948/prepr-2020-91>.
28. Локтионов А.П. О численном дифференцировании при полиномиальном приближении Курск. Гос. техн. ун-т. Курск, 1999. 28 с. Деп. в ВИНТИ 28.06.99, № 2080-B99. <https://elibrary.ru/item.asp?id=24302755>.
29. Локтионов А.П., Максимов Ю.А., Титов В.С. О численном дифференцировании в обратной задаче Коши // Сварка и родственные технологии в машиностроении и Информатика, вычислительная техника и электронике: сборник научных тр. Вып. 4. Курск., 2002. С. 263-268. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=21788616>. (дата обращения: 20.03.2022).
30. Korytov M.S., Shcherbakov V.S., Shershneva E.O., Breus I.V. Approximation methods for the actual trajectory of load carried by overhead crane to the required one – a comparative analysis // Journal of the Serbian Society for Computational Mechanics. 2016. Vol. 10. No. 2. P. 45-56. URL: http://www.sscm.kg.ac.rs/jsscm/downloads/Vol10No2/Vol10No2_05.pdf. (дата обращения: 20.03.2022).
31. Ibrahimoglu B.A. Lebesgue functions and Lebesgue constants in polynomial interpolation // Journal of Inequalities and Applications. 2016. No. 93. P. 1-15. <https://doi.org/10.1186/s13660-016-1030-3>.
32. 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/10.1002/stc.2160>.
33. Золотарёв Е.И. Приложение эллиптических функций к вопросам о функциях, наименее и наиболее отклоняющихся от нуля // В кн.: Золотарёв Е.И. Полное собрание сочинений. Выпуск второй. Л.: Изд-во АН СССР, 1932. С. 1–59. <https://doi.org/10.21638/11701/spbu01.2020.101>.

REFERENCES

1. 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. (rus). doi: 10.31675/1607-1859-2020-22-4-83-101 (rus).
2. Kashevarova G.G., Tonkov, Y.L., Tonkov I.L. Intellektual'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. (rus). <https://doi.org/10.22337/1524-5845-2017-13-3-42-57> (rus).
3. 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.
4. 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>.
5. 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>.
6. Chen H-P., Ni Yi-Q. Structural health monitoring of large civil engineering structures. 111 River Street, Hoboken, NJ 07030, USA: John Wiley & Sons Inc., 2018. 302 p. doi:10.1002/9781119166641.
7. Boikov I.V., Krivulin N.P. Priblizhennyj metod vosstanovleniya vxodnyx signalov izmeritel'nyx preobrazovatelej [On an approximate method for reconstructing input signals of measuring transformers]. Izmeritel'naya tekhnika. 2021. No. 12. Pp. 3-7. doi: 10.32446/0368-1025it.2021-12-3-7 (rus).
8. Haque M.E., Zain M.F.M., Hannan M.A., Rahman M.H. Building structural health monitoring using dense and sparse topology wireless sensor network. Smart Structures and Systems. 2015. Vol. 16. No. 4. Pp. 607-621. <https://doi.org/10.12989/sss.2015.16.4.623>.
9. Loktionov A.P. Informacionnaya sistema analiza balochnyx elementov 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. 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>.

11. 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>.
12. Lyublinskiy V.A., Tomina M.V. Eksperimental'noe issledovanie prochnosti i podatlivosti vertikal'nogo svarnogo styka [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).
13. 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).
14. 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>.
15. 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](https://doi.org/10.1088/1361-6420/abc530).
16. Danilov M.F., Savel'eva A.A. Analysis of basic data of unstable problems of coordinate measurements of geometrical parameters of products. Measurement Techniques. 2018. Vol. 61. No. 6. Pp. 588-594. doi:10.1007/s11018-018-1469-3.
17. Balakin D. A., Pyt'ev Yu. P. Redukciya izmereniya pri nalichii sub`ektivnoj informacii [Measurement reduction in the presence of subjective information]. Matematicheskoe modelirovanie i chislenny'e metody. 2018. Vol. 30. No. 12. C. 84–110. doi: [10.31857/S023408790001938-52016](https://doi.org/10.31857/S023408790001938-52016).
18. Chekushkin V.V., Mikheev K.V. Fast search algorithms for the best approximation polynomials for reproduction of functional dependences in data-measurement systems. Measurement Techniques. 2016. Vol. 59. No. 4. Pp. 351-356. <https://doi.org/10.1007/s11018-016-0970-9>.
19. Meschikhin I.A., Gavryushin S.S. Kriterii kachestva i algoritm vy'bora reducirovanny'x modelej dlya monitoringa texnicheskix konstrukcij [Quality criteria and algorithm for selecting reduced finite element models for technical design monitoring]. Matematicheskoe modelirovanie i chislenny'e metody. 2016. Vol. 12. No. 4. Pp. 103-121. <https://doi.org/10.18698/2309-3684-2016-4-103121> (rus).
20. 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>.
21. 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.
22. Denisov A.M. Iterative Method for Solving an Inverse Coefficient Problem for a Hyperbolic Equation. Differential Equations. 2017. Vol. 53. No. 7. Pp. 916–922. doi:[10.1134/S0012266117070084](https://doi.org/10.1134/S0012266117070084).
23. Loktionov A.P. A measuring system for determination of a cantilever beam support moment. Smart Structures Systems. 2017. Vol. 19. No. 4. Pp. 431-439. <https://doi.org/10.12989/ss.2017.19.4.431>.
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. 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>.
26. 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 20.03.2022).
27. Kalitkin N.N., Kolganov S.A. Postroenie approksimatsii, udovletvoryayushchikh chebyshevskomu al'ternansu, The construction of approximations satisfying the Chebyshev alternance Preprinty IPM im. M.V. Keldysha, 2020. № 91. 33 s. <https://doi.org/10.20948/prepr-2020-91> (rus).
28. Loktionov A.P. O chislenom differencirovanii pri polinomial'nom priblizhenii [On numerical differentiation under polynomial approximation]. Kursk. Gos. texn. un-t. Kursk., 1999. P. 28. Dep. v VINITI 28.06.99. № 2080-B99. <https://elibrary.ru/item.asp?id=24302755>. (rus)
29. Loktionov A. P., Maksimov Yu.A., Titov V.S. O chislenom differencirovanii v obratnoj zadache Koshi [Numerical differentiation in the inverse Cauchy problem]. Svarka i rodstvennyye tekhnologii v mashinostroyenii i elektronike. Sbornik nauchnykh tr. Is. 4. Kursk., 2002. Pp. 263-268. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=21788616>. (accessed 20.04.2021) (rus).
30. Korytov M.S., Shcherbakov V.S., Shershneva E.O., Breus I.V. Approximation methods for the actual trajectory of load carried by overhead crane to the required one – a comparative analysis. Journal of the Serbian Society for Computational Mechanics. 2016. Vol. 10. No. 2. Pp. 45-56. URL: http://www.sscm.kg.ac.rs/jsscm/downloads/Vol10No2/Vol10No2_05.pdf. (accessed 20.03.2022).

31. 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>.
32. 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>.
33. Zolotarev E.I. Application of elliptic functions to questions of functions deviating least and most from zero, In: Collected works 2. 1–59 (Izdat. Akad. Nauk SSSR, Moscow, 1932). (rus). <https://doi.org/10.21638/11701/spbu01.2020.101>.

Информация об авторе:

Локтионов Аскольд Петрович

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

E-mail: loapa@mail.ru

Information about author:

Loktionov Askold P.

Southwest State University, Kursk, Russia,
doctor of Engineering, Associate Professor.

E-mail: loapa@mail.ru