

Совершенствование математической модели получения мелкодисперсного материала для создания автоматизированной системы управления процессом производства

С. С. Закожурников¹, Г. С. Закожурникова²,
Т. А. Горшунова¹, О. А. Пихтилькова¹, Е. В. Пронина¹

¹МИРЭА – Российский технологический университет
119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, 78

²Волгоградский государственный технический университет
400005, Россия, г. Волгоград, пр-т Ленина, 28

Аннотация. Основные требования, предъявляемые к крупным промышленным предприятиям, заключаются в повышении энергетической эффективности технологических процессов и повышении экологичности производства. Одним из возможных решений этих проблем являются моделирование основных процессов, протекающих в установках, и создание автоматизированной системы управления на основе математических моделей. Рассмотрен промышленный процесс производства карбида кремния. Повышение эффективности данного процесса происходит за счет создания более совершенных режимов работы печей сопротивления на основе полученной в ходе математического моделирования информации о процессах, оказывающих наибольшее влияние на плавку. На основе математической модели можно построить автоматизированную систему управления процессом производства, которая на основе данных о температуре в различных точках печи сопротивления будет поддерживать наиболее эффективные режимы плавки карбида кремния. В математической модели учтены основные процессы, протекающие в печи сопротивления в течение плавки, а именно: химические реакции, фильтрация газовой компоненты, сушка материала, энерговыделение, приходящееся на нагреватель печи сопротивления. Усовершенствована математическая модель технологического процесса производства карбида кремния за счет учета влияния на распределение температуры теплоты химических реакций. Предложены теоретические основы построения автоматизированной системы управления процессом производства на основе данных о температуре в различных точках печи. В работе изложено современное состояние промышленного производства карбида кремния. Рассмотрена математическая модель процессов теплообмена в высокотемпературной печи сопротивления на примере технологического процесса производства SiC. Работоспособность разработанной математической модели проверена путем сопоставления проведенных экспериментов и численных расчетов. Применение автоматизированной системы управления на основе усовершенствованной математической модели возможно на промышленных предприятиях, занимающихся производством мелкодисперсных материалов, например, карбида кремния. Достоверность полученных результатов подтверждается сопоставлением экспериментальных данных и данных, полученных с помощью математического моделирования, в наиболее важных точках (у поверхности зерна и у периферии) без учета этапов нагрева и остывания печи сопротивления. Расхождение данных в точке, близкой к ядру, составило максимум 15 %, в точке на периферии – 5 %, что является удовлетворительным результатом.

Ключевые слова: карбид кремния, математическая модель, система управления

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кузеванов В. С., Закожурникова Г. С., Закожурников С. С. Модель тепломассопереноса в печах при производстве карбида кремния // *Альтернативная энергетика и экология*. 2015. № 7(171). С. 75–81. DOI: [10.15518/isjace.2015.07.006](https://doi.org/10.15518/isjace.2015.07.006)

Kuzevanov V.S., Zakozhurnikova G.S., Zakozhurnikov S.S. Model of heat and mass transfer in furnaces in the production of silicon carbide. *Al'ternativnaya energetika i ekologiya* [Alternative energy and ecology]. 2015. No. 7(171). Pp. 75–81. DOI: 10.15518/isjace.2015.07.006. (In Russian)

2. Гаряев А. Б., Закожурников С. С., Кузеванов В. С. Модель осадки шихты при производстве карбида кремния // *Промышленная энергетика*. 2016. № 9. С. 27–31. EDN: WWCMYR

Garyaev A.B., Zakozhurnikov S.S., Kuzevanov V.S. The model of charge precipitation in the production of silicon carbide. *Promyshlennaya energetika* [Industrial energy]. 2016. No. 9. Pp. 27–31. EDN: WWCMYR. (In Russian)

3. Kuzevanov V.S., Garyaev A.B., Zakozhurnikova G.S. The calculating study of the moisture transfer influence at the temperature field in a porous wet medium with internal heat sources. *Journal of Physics*. The calculating study of the: Conference Series. Moscow. 2017. Vol. 891. P. 012114. DOI: [10.1088/1742-6596/891/1/012114](https://doi.org/10.1088/1742-6596/891/1/012114)

4. Ожерелкова Л. М., Савин Е. С. Температурная зависимость нестационарной теплопроводности твердых тел // *Российский технологический журнал*. 2019. Т. 7. № 2. С. 49–60. DOI: [10.32362/2500-316X-2019-7-2-49-60](https://doi.org/10.32362/2500-316X-2019-7-2-49-60)

Ozherelkova L.M., Savin E.S. Temperature dependence of unsteady thermal conductivity of solids. *Rossiiskii tekhnologicheskii zhurnal*. 2019. Vol. 7. No. 2. Pp. 49–60. DOI: [10.32362/2500-316X-2019-7-2-49-60](https://doi.org/10.32362/2500-316X-2019-7-2-49-60). (In Russian)

5. Kuzevanov V.S., Zakozhurnikova G.S., Zakozhurnikov S.S. Peculiarities of heat and mass transfer in porous moistened mediums at high thermal loads. *Solid State Phenomena*. 2020. Vol. 299. Pp. 14–19. DOI: [10.4028/www.scientific.net/SSP.299.14](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.299.14)

6. Мазлов А. А., Елфимов Н. А., Закожурникова Г. С., Закожурников С. С. Влияние фильтрационного переноса на изменение температуры в реакционной зоне печи сопротивления для получения карбида кремния // *Материалы Международной научно-технической конференции «Состояние и перспективы развития электро- и теплотехнологии» (XIX Бенардосовские чтения)*. Иваново, 2017. С. 208–210.

Mazlov A.A., Elfimov N.A., Zakozhurnikova G.S., Zakozhurnikov S.S. *Vliyanie fil'tratsionnogo perenosa na izmenenie temperatury v reaktivnoy zone pechi soprotivleniya dlya polucheniya karbida kremniya* [The effect of filtration transfer on the temperature change in the reaction zone of the resistance furnace for the production of silicon carbide]. *Materialy Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferencii «Sostoyanie i perspektivy razvitiya elektro- i teplotekhnologii» (XIX Benardosovskie chteniya)* [Materials of the International Scientific and Technical Conference “The state and prospects of development of electrical and thermal technology” (XIX Benardos readings)]. Ivanovo, 2017. Pp. 208–210. (In Russian)

7. Кузеванов В. С., Закожурников С. С., Гаряев А. Б. Оптимизация процесса плавки карбида кремния с целью повышения ее производительности и снижения расхода электроэнергии // *Промышленная энергетика*. 2015. № 6. С. 29–33. EDN: UEAGQD

Kuzevanov V.S., Zakozhurnikov S.S., Garyaev A.B. Optimization of the silicon carbide melting process in order to increase its productivity and reduce energy consumption. *Promyshlennaya energetika* [Industrial energy]. 2015. No. 6. Pp. 29–33. EDN: UEAGQD. (In Russian)

8. Кузеванов В. С., Закожурников С. С., Закожурникова Г. С., Гаряев А. Б. Модели процессов и расчет температурного поля в печи сопротивления для производства

карбида кремния // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. 2017. № 4. С. 21–29. DOI: [10.17588/2072-2672.2017.4.021-029](https://doi.org/10.17588/2072-2672.2017.4.021-029)

Kuzevanov V.S., Zakozhurnikov S.S., Zakozhurnikova G.S., Garyaev A.B. Process models and calculation of the temperature field in a resistance furnace for the production of silicon carbide. *Vestnik Ivanovskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta* [Bulletin of the Ivanovo State Energy University]. 2017. № 4. Pp. 21–29. DOI: [10.17588/2072-2672.2017.4.021-029](https://doi.org/10.17588/2072-2672.2017.4.021-029). (In Russian)

9. *Закозжурников С. С.* Совершенствование процесса производства карбида кремния путем изменения организации подвода теплоты: специальность 05.14.04 «Промышленная теплоэнергетика»: автореф. дисс. ... канд. техн. наук. М., 2016. 22 с.

Zakozhurnikov S.S. *Sovershenstvovanie processa proizvodstva karbida kremniya putyom izmeneniya organizatsii podvoda teploty* [Improvement of the silicon carbide production process by changing the organization of heat supply]: abstract of the dissertation for the degree of Candidate of technical sciences 05.14.04. Moscow, 2016. 22 p. (In Russian)

10. Kuzevanov V.S., Garyaev A.B., Zakozhurnikov S.S., Zakozhurnikova G.S. Model of continuous production of fine silicon carbide. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering : International Workshop «Advanced Technologies in Material Science, Mechanical and Automation Engineering – MIP: Engineering – 2019»*. Krasnoyarsk, 2019. P. 32106. DOI: [10.1088/1757-899X/537/3/032106](https://doi.org/10.1088/1757-899X/537/3/032106)

11. Kuzevanov V.S., Zakozhurnikov S.S., Zakozhurnikova G.S., Garyaev A.B. Finely dispersed silicon carbide synthesis model in the electrothermal reactor with periodic batch loading. *Journal of Physics: Conference Series: 3*. Moscow, 2020. P. 022054. DOI: [10.1088/1742-6596/1683/2/022054](https://doi.org/10.1088/1742-6596/1683/2/022054)

12. Kuzevanov V.S., Zakozhurnikov S.S., Zakozhurnikova G.S. Model and results of a study of the synthesis of finely dispersed silicon carbide in an electro-thermal reactor. *Solid State Phenomena*. 2021. Vol. 316. Pp. 147–152. DOI: [10.4028/www.scientific.net/ssp.316.147](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/ssp.316.147)

13. Kuzevanov V.S., Zakozhurnikov S.S., Zakozhurnikova G.S. Silicon carbide synthesis investigation in an electrothermal fluidized bed. *Journal of Materials Science*. 2023. Vol. 58. No. 43. Pp. 16742–16752. DOI: [10.1007/s10853-023-09071-5](https://doi.org/10.1007/s10853-023-09071-5)

14. Семейко К. В., Малиновский А. И., Гребеньков А. Ж. и др. Разработки технологий получения карбида кремния (обзор) // Вестник НЯЦ РК. 2021. № 2. С. 30–41. DOI: [10.52676/1729-7885-2021-2-30-41](https://doi.org/10.52676/1729-7885-2021-2-30-41)

Semeiko K.V., Malinovsky A.I., Grebenkov A.Zh. et al. Development of technologies of silicon carbide producing (review). *NNC RK BULLETIN*. 2021. No. 2. Pp. 30–41. DOI: [10.52676/1729-7885-2021-2-30-41](https://doi.org/10.52676/1729-7885-2021-2-30-41). (In Russian)

15. *Полубелова А. С., Крылов В. Н., Карлин В. В., Ефимова И. С.* Производство абразивных материалов. Ленинград: Машиностроение, 1968. 180 с.

Polubelova A.S., Krylov V.N., Karlin V.V., Efimova I.S. *Proizvodstvo abrazivnykh materialov* [Abrasive materials production]. Leningrad: Mashinostroenie, 1968. 180 p. (In Russian)

16. *Кац И. С.* Образование карбида кремния в промышленной печи электросопротивления // Абразивы. 1970. № 3. С. 8.

Katz I.S. *Obrazovanie karbida kremniya v promyshlennoy pechi elektrosoprotivleniya* [Formation of silicon carbide in an industrial electrical resistance furnace]. *Abrazivy* [Abrasives]. 1970. No. 3. P. 8. (In Russian)

17. Zinkle S.J. Fusionmaterials science: overview of challenges and recent progress. *Physics of Plasmas*. 2005. Vol. 12. P. 058101.

18. *Рожнова Т. В.* Структура и свойства медных порошковых изделий сельскохозяйственного назначения с карбидом кремния, изготовленных

электроконтактным спеканием // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. 2021. № 4(90). С. 178–181. EDN: HUXKXO

Rozhnova T.V. Structure and properties of copper powder products for agricultural purposes with silicon carbide made by electrocontact sintering. *Izvestiya Orenburgskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* [Proceedings of the Orenburg State Agricultural University]. 2021. No. 4 (90). Pp. 178–181. EDN: HUXKXO. (In Russian)

19. Мизонов В. Е., Костарев В. В., Зайцев В. А. Моделирование влагопереноса в многослойной пористой среде при неравномерной укладке слоев материала // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. 2013. № 4. С. 76–79. EDN: QZXKHN

Mizonov V.E., Kostarev V.V., Zaitzev V.A. Modeling of moisture transfer in multilayer porous medium at uneven stacking of material layers. *Vestnik Ivanovskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta* [Bulletin of the Ivanovo State Energy University]. 2013. No. 4. Pp. 76–79. EDN: QZXKHN. (In Russian)

20. Балагуров И. А., Мизонов В. Е., Berthiaux H. Gatamel C. Моделирование кинетики смешивания разнородных сыпучих материалов // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. 2014. № 6. С. 67–70. EDN: TEJAYX

Balagurov I.A., Mizonov V.E., Berthiaux N., Gatamel S. Simulation of mixing kinetics of dissimilar granular materials. *Vestnik Ivanovskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta* [Bulletin of the Ivanovo State Energy University]. 2014. No. 6. Pp. 67–70. EDN: TEJAYX. (In Russian)

21. Мисбахов Р. Ш., Мизонов В. Е. Моделирование теплопроводности в составной области с фазовыми переходами // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. 2015. № 4. С. 39–44. DOI: 10.17588/2072-2672.2015.4.039-043

Misbakhov R.Sh., Mizonov V.E. Simulation of heat conduction in a composite domain with phase transformation. *Vestnik Ivanovskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta* [Bulletin of the Ivanovo State Energy University]. 2015. No. 4. Pp. 39–44. DOI: 10.17588/2072-2672.2015.4.039-043. (In Russian)

22. Митрофанов А. В., Шпейнова Н. С., Camelo A.F. и др. Расчетно-экспериментальное исследование тепловой обработки дисперсного топлива в аппарате с кипящим слоем // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. 2016. № 1. С. 58–62. DOI: 10.17588/2072-2672.2016.1.058-062

Mitrofanov A.V., Shpeynova N.S., Camelo A.F. et al. Experimental and computational study of thermal treatment of particulate fuel in a fluidized bed reactor. *Vestnik Ivanovskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta* [Bulletin of the Ivanovo State Energy University]. 2016. No. 1. Pp. 58–62. DOI: 10.17588/2072-2672.2016.1.058-062. (In Russian)

23. Bozkurt Y.E., Emanetoğlu U., Yıldız A. et al. 3D printable CNTs and BN hybridized PEEK composites for thermal management applications. *Journal of Materials Science*. 2023. Vol. 58. No. 38. Pp. 1–14. DOI: [10.1007/s10853-023-08923-4](https://doi.org/10.1007/s10853-023-08923-4)

24. Reva D., Lisyatnikov M., Prusov E. Mechanical behavior of aluminum matrix composites in the elements of building structures. *Proceedings of MPCPE 2022. Lecture Notes in Civil Engineering*. 2022. Vol. 335. DOI: [10.1007/978-3-031-30570-2_29](https://doi.org/10.1007/978-3-031-30570-2_29)

25. Wu Y., Zhao R., Liang B. et al. Construction of C/SiC–Cu₃Si–Cu interpenetrating composites for long-duration thermal protection at 2500°C by cooperative active-passive cooling. *Composites Part B: Engineering*. 2023. Vol. 266. DOI: [10.1016/j.compositesb.2023.111015](https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2023.111015)

26. Zhao Ch., Tu Z., Mao J. The dynamic thermophysical properties evolution and multi-scale heat transport mechanisms of 2.5D C/SiC composite under high-temperature air oxidation

environment. *Composites Part B: Engineering*. 2023. Vol. 263. P. 110831. DOI: [10.1016/j.compositesb.2023.110831](https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2023.110831)

27. Feng K., Hu Sh., Li L. et al. Preparation of low residual silicon content Si-SiC ceramics by binder jetting additive manufacturing and liquid silicon infiltration. *Journal of the European Ceramic Society*. 2023. Vol. 43. No. 13. Pp. 5446–5457. DOI: [10.1016/j.jeurceramsoc.2023.05.038](https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2023.05.038)

28. Zheng Yi, Zou J., Liu W. et al. High pressure sintering of fully dense tantalum carbide ceramics with limited grain growth. *Journal of the European Ceramic Society*. 2023. Vol. 43. No. 12. Pp. 5117–5124. DOI: [10.1016/j.jeurceramsoc.2023.04.032](https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2023.04.032)

29. Zhang S., Zhang J., Li F. et al. Thermal conductivity of Ca α -SiAlON ceramics with varying m and n values. *Journal of the American Ceramic Society*. 2023. Vol. 106. No. 10. Pp. 5642–5647. DOI: [10.1111/jace.19264](https://doi.org/10.1111/jace.19264)

30. Xu J., Tatarko P., Chen L. et al. High-strength SiC joints fabricated at a low-temperature of 1400°C using a novel low activation filler of Praseodymium. *Journal of the American Ceramic Society*. 2023. Vol. 106. No. 10. Pp. 5679–5688. DOI: [10.1111/jace.19229](https://doi.org/10.1111/jace.19229)

31. Mousavi A., Vyatkin V. Energy efficient agent function block: A semantic agent approach to IEC 61499 function blocks in energy efficient building automation systems. *Automation in construction*. 2015. Vol. 54. Pp. 127–142. DOI: [10.1016/j.autcon.2015.03.007](https://doi.org/10.1016/j.autcon.2015.03.007)

32. Sleptsov V.V., Afonin V.L., Ablaeva A.E., Dinh B. Development of an information measuring and control system for a quadcopter. *Russian technological journal*. 2021. No. 9(6). Pp. 26–36. DOI: [10.32362/2500-316X-2021-9-6-26-36](https://doi.org/10.32362/2500-316X-2021-9-6-26-36)

33. Лавренов С. С. Разработка автоматизированной системы сортировки // Тезисы докладов XXIX международной научно-технической конференции студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика». М., 2023. С. 152.

Lavrenov S.S. *Razrabotka avtomatizirovannoy sistemy sortirovki* [Development of an automated sorting system]. *Tezisy докладov XXIX mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferencii studentov i aspirantov* [Abstracts of reports of the XXIX International Scientific and Technical Conference of Undergraduate and Postgraduate Students “Radio electronics, electrical engineering and power engineering”]. Moscow, 2023. P. 152. (In Russian)

34. Лавренов С. С., Закожурников С. С. Применение фотоэлектрических датчиков на производстве // Сборник докладов Международной научно-технической конференции ИПТИП РТУ МИРЭА «Оптические технологии, материалы и системы». М.: МИРЭА – Российский технологический университет, 2022. С. 206–209.

Lavrenov S.S., Zakozhurnikov S.S. *Primenenie fotoelektricheskikh datchikov na proizvodstve* [Application of photovoltaic sensors in production]. *Sbornik докладov Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferencii “Opticheskie tekhnologii, materialy i sistemy” IPTIP RTU MIREA* [A collection of Reports of the International Scientific and Technical Conference “Optical technologies, materials and systems” IPTIP RTU MIREA]. Moscow: MIREA – Rossijskiy tekhnologicheskij universitet, 2022. Pp. 206–209. (In Russian)

35. Меркулов А. В., Харитонов К. Ю., Закожурников С. С. и др. Некоторые вопросы создания электронно-управляющих систем вращающихся объектов // Сборник докладов Российской научно-технической конференции с международным участием «Инновационные технологии в электронике и приборостроении». М.: МИРЭА – Российский технологический университет, 2021. С. 212–215.

Merkulov A.V., Kharitonova K.Yu., Zakozhurnikov S.S. et al. *Nekotorye voprosy sozdaniya elektronno-upravlyayushchih sistem vrashchayushchihsya ob"ektov* [Some issues of creating electronic control systems of rotating objects]. *Sbornik докладov Rossijskoy nauchno-tekhnicheskoy konferencii s mezhdunarodnym uchastiem «Innovacionnye tekhnologii v elektronike i priborostroenii»* [Collection of reports of the Russian Scientific and Technical Conference with international participation “Innovative technologies in electronics and

instrumentation”]. Moscow: MIREA – Rossijskiy tekhnologicheskii universitet, 2021. Pp. 212–215. (In Russian)

36. Zakozhurnikov S., Zakozhurnikova G. Development of a control system for sorting agricultural products according to specified criteria. *E3S Web of Conference*. 2023. Vol. 390. P. 03019. DOI: [10.1051/e3sconf/202339003019](https://doi.org/10.1051/e3sconf/202339003019)

37. Zakozhurnikov S., Gorshunova T., Pronina E., Raff O. Development of an automated lighting control system in agricultural premises to save energy resources. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2023. Vol. 1231. P. 012061. Pp. 1–7. DOI: [10.1088/1755-1315/1231/1/012061](https://doi.org/10.1088/1755-1315/1231/1/012061)

38. Tang Y., Li L., Liu X. State-of-the-art development of complex systems and their simulation methods. *Complex system modeling and simulation*. 2021. Vol. 1. No. 4. Pp. 271–290. DOI: [10.23919/CSMS.2021.0025](https://doi.org/10.23919/CSMS.2021.0025)

39. Mammadova K.A., Aliyeva E.N. Solving the problem of building an automatic control system for the process of water chemical treatment using fuzzy logic. *Lecture Notes in networks and systems*. 2022. Vol. 362. Pp. 748–756. DOI: [10.1007/978-3-030-92127-9_99](https://doi.org/10.1007/978-3-030-92127-9_99)

40. Zhang L. Electric automation control simulation system based on intelligent technology. *Lecture Notes on data engineering and communications technologies*. 2022. Vol. 125. Pp. 732–738. DOI: [10.1007/978-3-030-97874-7_98](https://doi.org/10.1007/978-3-030-97874-7_98)

41. Renjini G.S., Thangavelusamy D. Robust reference tracking and load rejection on non-linear system using controllers. *Gazi University Journal of Science*. 2022. Vol. 35. No. 4. Pp. 1454–1569. DOI: [10.35378/gujs.947882](https://doi.org/10.35378/gujs.947882)

42. Li J., Liu C., Sun Y., Shao L. A new event-triggered adaptive tracking controller for nonlinear systems with unknown virtual control coefficients. *European journal of control*. 2022. Vol. 69. P. 100759. DOI: [10.1016/j.ejcon.2022.100759](https://doi.org/10.1016/j.ejcon.2022.100759)

43. Dorokhov A., Aksenov A., Sibirev A. Results of laboratory studies of the automated sorting system for root and onion crops. *Agronomy*. 2021. Vol. 11. No. 6. P. 1257. DOI: [10.3390/agronomy11061257](https://doi.org/10.3390/agronomy11061257)

44. Morozov S., Kuzmin K., Vershinin V. Development of a simulation automated system for address sorting of correspondence. *Lecture Notes in networks and systems: XIV international scientific conference “INTERAGROMASH 2021”*. Vol. 247. 2022. Pp. 927–933.

45. Tamizi M.G., Kashani A.A., Azad F.A., Kalthor A. Experimental study on a novel simultaneous control and identification of a 3-DOF delta robot using model reference adaptive control. *European journal of control*. 2022. Vol. 67. No. 5. P. 100715. DOI: [10.1016/j.ejcon.2022.100715](https://doi.org/10.1016/j.ejcon.2022.100715)

46. Azad F.A., Ansari Rad S., Hairi Yazdi M.R. et al. Dynamics analysis, offline–online tuning and identification of base inertia parameters for the 3-DOF Delta parallel robot under insufficient excitations. *Meccanica*. 2022. Vol. 57. No. 2. Pp. 473–506.

47. Zakozhurnikov S., Pikhtilkova O., Pronina E., Raff O. The smart home automated control system development. *AIP Conference Proceedings*. 2024. Vol. 3102 (1). P. 030024. DOI: [10.1063/5.0200045](https://doi.org/10.1063/5.0200045)

Информация об авторах

Закожурников Сергей Сергеевич, канд. техн. наук, доцент, кафедра высшей математики – 3, [Институт перспективных технологий и индустриального программирования](https://www.mirea.ru), МИРЭА – Российский технологический университет;

119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, 78;

zakozhurnikov@mirea.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2354-9656>, SPIN-код: 1864-0437

Закожурникова Галина Сергеевна, канд. техн. наук, доцент, кафедра теплотехники и гидравлики, Волгоградский государственный технический университет;

400005, Россия, Волгоград, пр-т Ленина, 28;

galya.vlz@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4870-0749>, SPIN-код: 7209-9481

Горшунова Татьяна Алексеевна, канд. физ.-мат. наук, доцент, кафедра высшей математики – 3, Институт перспективных технологий и индустриального программирования, МИРЭА – Российский технологический университет;

119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, 78;

gorshunova@mirea.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9580-595X>, SPIN-код: 6120-6367

Пихтилькова Ольга Александровна, канд. физ.-мат. наук, доцент, кафедра высшей математики – 3, Институт перспективных технологий и индустриального программирования, МИРЭА – Российский технологический университет;

119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, 78;

pihtilkova@mirea.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-4632-5158>, SPIN-код: 5589-7411

Пронина Елена Владиславовна, канд. физ.-мат. наук, доцент, кафедра высшей математики – 3, Институт перспективных технологий и индустриального программирования, МИРЭА – Российский технологический университет;

119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, 78;

pronina@mirea.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2447-7175>, SPIN-код: 3391-3440