

Научная статья

УДК 669.017.3

DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.30407>



О.Г. Зотов, Н.А. Голубков,
С.А. Блинов , А.М. Левитский

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Россия

 blinov_sa@spbstu.ru

ОСОБЕННОСТИ ФАЗОВЫХ ПРЕВРАЩЕНИЙ В РАВНОВЕСНОМ И НЕРАВНОВЕСНОМ СОСТОЯНИИ В ИЗДЕЛИЯХ ИЗ СТАЛИ 40С2

Аннотация. В данной работе были изучены процессы формирования микроструктуры стали 40С2 в зависимости от различных скоростей охлаждения. Работа началась с построения политермического разреза равновесной диаграммы состояния для рассматриваемого химического состава стали с использованием программы Thermo-Calc. Это позволило определить температуры начала и конца фазовых превращений. Затем была исследована микроструктура стали при различных скоростях охлаждения: 1, 10, 20, 50 и 100 °С/с. Каждая из этих скоростей охлаждения привела к образованию в стали различных структурных элементов, таких как феррит, перлит и мартенсит. Эти структурные изменения непосредственно влияют на механические характеристики материала, такие как прочность и твердость. В итоге была построена термокинетическая диаграмма распада аустенита для стали 40С2. Эта диаграмма отражает зависимость между температурой и временем, необходимым для превращения аустенита в более стабильные фазы при различных скоростях охлаждения. Результаты исследования имеют большое значение для понимания и оптимизации технологий термообработки с учетом требований к заданным механическим свойствам конечной продукции.

Ключевые слова: термокинетическая диаграмма, микроструктура, скорость охлаждения, клемма.

Для цитирования:

Зотов О.Г., Голубков Н.А., Блинов С.А., Левитский А.М. Особенности фазовых превращений в равновесном и неравновесном состоянии в изделиях из стали 40С2 // Глобальная энергия. 2024. Т. 30, № 4. С. 87–95. DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.30407>



O.G. Zotov, N.A. Golubkov,
S.A. Blinov  , A.M. Levitsky

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University,
St. Petersburg, Russia

 blinov_sa@spbstu.ru

FEATURES OF PHASE TRANSFORMATIONS IN EQUILIBRIUM AND NONEQUILIBRIUM STATE IN 40C2 STEEL PRODUCTS

Abstract. In this paper, the processes of microstructure formation in 40C2 steel depending on various cooling rates were studied. The study began with constructing a polythermal section of the equilibrium phase diagram for the given chemical composition of steel using Thermo-Calc software. This made it possible to determine the temperatures at the start and end of phase transformations. Next, the microstructure of steel was examined at various cooling rates: 1, 10, 20, 50 and 100 °C/s. Each of these cooling rates led to the formation of different structural elements in steel, such as ferrite, pearlite and martensite. These structural changes directly affect the mechanical properties of the material, such as strength and hardness. As a result, a thermokinetic diagram of austenite decomposition for 40C2 steel was constructed. This diagram reflects the relationship between temperature and time required to transform austenite into more stable phases at various cooling rates. The results of the study are of significant importance for understanding and optimizing heat treatment technologies in accordance with the requirements for the specified mechanical properties of the final product.

Keywords: thermokinetic diagram, microstructure, cooling rate, clip.

Citation:

Zotov O.G., Golubkov N.A., Blinov S.A., Levitsky A.M., Features of phase transformations in equilibrium and nonequilibrium state in 40C2 steel products, *Global Energy*, 30 (04) (2024) 87–95, DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.30407>

Введение. Строительство новых высокоскоростных железнодорожных магистралей и повышение грузооборота обуславливают повышение требований к надежности рельсового скрепления, основным элементом которого является пружинный элемент – клемма.

В настоящее время изготовление клемм производится из стали 40C2, которая обладает оптимальным соотношением прочности, упругости и пластичности после термической обработки, заключающейся в закалке и отпуске [1–11]. Однако получаемые свойства не удовлетворяют возросшим требованиям к рельсовому скреплению. По этой причине в данной работе была поставлена задача повышения комплекса свойств железнодорожных клемм за счет корректировки режимов термической обработки [12, 13].

Выбор режима термической обработки, позволяющий гарантировано получать требуемую структуру и свойства материала, осуществляется на основе знаний о фазовых превращениях, реализующихся как при равновесных условиях, так и при различных условиях нагрева–охлаждения. Эти данные отражены в равновесных и термокинетических диаграммах распада аустенита для каждой конкретной марки стали. В работах [14, 15] представлены термокинетические диаграммы распада аустенита для стали 40C2. Однако химические составы сталей несколько отличаются от исследуемого в данной работе, и предварительные результаты показали отсутствие корреляции литературных данных с экспериментом.

Поэтому в данной работе были построены равновесная и метастабильная диаграммы распада аустенита для конкретного химического состава стали 40С2.

Для достижения поставленной цели в данной работе решались следующие задачи:

- 1) построение политермического разреза равновесной диаграммы состояния стали 40С2;
- 2) построение термокинетической диаграммы распада аустенита для стали 40С2.

Экспериментальная часть

Исследования проводили на заготовках проката диаметром 18 мм производства ПАО «Северсталь-Метиз». Исследуемые заготовки соответствуют требованиям ТУ 1150-168-01124323-2003. Химический состав заготовок приведен в табл. 1.

Таблица 1

Химический состав стали 40С2

Table 1

Chemical composition of steel 40С2

Содержание элементов, масс. %								
C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu	Al
0,40–0,41	1,57–1,60	0,66–0,70	0,008–0,012	0,004–0,008	0,08–0,09	0,06–0,08	0,12–0,16	0,005–0,009

Построение политермического разреза равновесной диаграммы состояния стали 40С2

Политермический разрез равновесной диаграммы состояния для химического состава, соответствующего стали 40С2, был построен с помощью программы Thermo-Calc, диаграмма представлена на рис. 1.

Как видно из представленной диаграммы, сталь, содержащая около 0,4% С, при охлаждении из аустенитной области претерпевает сначала ферритное, а затем перлитное превращение. При этом начало ферритного превращения происходит при температуре около 820°С (температура A_3). Следовательно, при нагреве под закалку температура должна быть как минимум 840°С. В противном случае в структуре стали будут присутствовать включения феррита, что негативно отразится на твердости и упругих свойствах стали.

Дилатометрические исследования и построение термокинетической диаграммы распада аустенита стали 40С2

Дилатометрические исследования образцов заключались в нагреве до 1020°С со скоростью 50 °С/с и охлаждении со скоростями 1, 10, 20, 50, 100 °С/с в вакууме 10^{-6} Торр.

В качестве дилатометра использовался модуль Pocket Jaw испытательного комплекса Gleeble 3800. Данная установка позволяет проводить исследования при высоких температурах (вплоть до температур плавления), различных степенях деформации и скоростях охлаждения. При этом все параметры, включая температуры, скорости нагрева и охлаждения, время выдержки, степени и скорости деформации, могут меняться в очень широких пределах и точно контролируются. В нашем случае измерения деформации осуществлялись специальными дилатометрическими датчиками в поперечном сечении образца. Для точности измерений термopара была приварена к образцу в месте крепления датчика деформаций. Запись дилатометрической кривой осуществлялась в автоматическом режиме.

В результате проведенных испытаний были построены дилатограммы и определены температуры фазовых превращений.

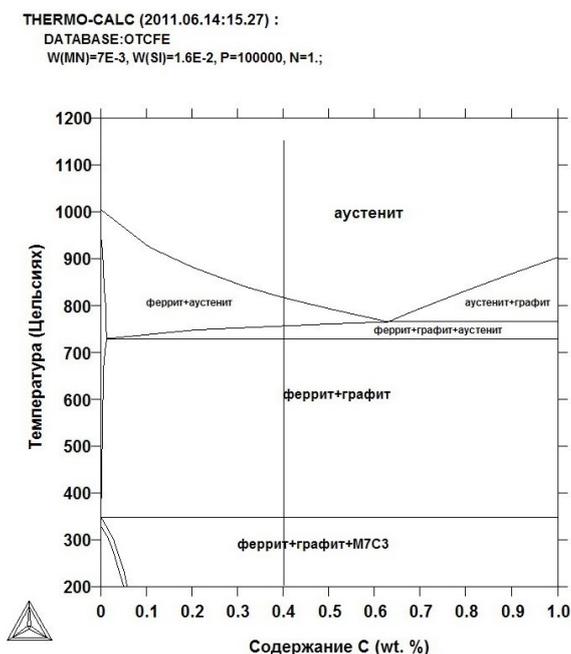


Рис. 1. Политермический разрез равновесной диаграммы состояния для стали 40C2 (графит – цементит, M7C3 – карбиды Cr_7C_3)

Fig. 1. Polythermal section of the equilibrium state diagram for 40C2 steel (graphite – cementite, M7C3 – carbides Cr_7C_3)

После проведения дилатометрических исследований была изучена микроструктура и измерена твердость образцов.

Изготовление шлифов производилось на оборудовании фирмы АТМ, Германия. Резка осуществлялась на установке прецизионной резки BRILLANT 220 с использованием тонких абразивных кругов. Горячая запрессовка в фенольную смолу – с помощью OPAL 460. Шлифовка и полировка – на установке SAPHIR 560 с использованием шлифовальных бумаг и полировальных алмазных суспензий.

Изготовленные микрошлифы протравливались в 5%-ном растворе азотной кислоты.

Металлографический анализ микроструктуры образцов производился на световом оптическом микроскопе плоского поля Leica DMI 5000, оснащенном системой анализа изображений Thixomet, в диапазоне увеличений 50–1000 крат.

Измерение твердости образцов проводилось на универсальном твердомере ZwickRoell ZHU 250 методом Роквелла по ГОСТ 9013-59 и методом Виккерса по ГОСТ 2999-75 при нагрузке 10 кгс.

Микроструктура образцов, охлажденных с различными скоростями, приведена на рис. 2.

Видно, что при скоростях охлаждения 1 и 10 °C/c в структуре образцов наблюдаются перлитная и ферритная составляющие. При скоростях 20 и 50 °C/c перлит полностью исчезает, но наряду с мартенситной фазой присутствует феррит. Полностью мартенситной структура становится лишь при скорости охлаждения 100 °C/c.

Твердость образцов меняется в полном соответствии со структурными изменениями. Наименьшее значение твердости HV_{10}/HRC 250/22 соответствует скорости охлаждения 1 °C/c, а наибольшее (HV_{10}/HRC 590/55) – скорости охлаждения 100 °C/c.

Анализ полученных экспериментальных данных позволил построить термокинетическую диаграмму распада аустенита стали 40C2 (рис. 3).

а) Охлаждение со скоростью 1 °С/с



×500



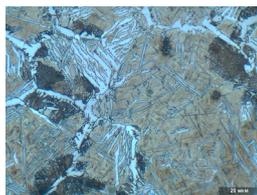
×1000

Структура: феррит видманшtedтовый и аллотриаморфный (30%), пластинчатый перлит (70%).
Твердость HV₁₀/HRC 250/22.

б) Охлаждение со скоростью 10 °С/с



×500



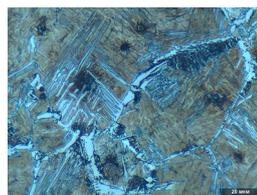
×1000

Структура: феррит видманшtedтовый и аллотриаморфный по границам зерен, игольчатый феррит (10%), перлит (5%), мартенситная составляющая (85%). Твердость HV₁₀/HRC 360/37.

в) Охлаждение со скоростью 20 °С/с



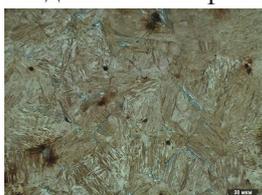
×500



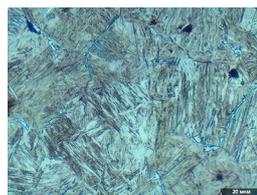
×1000

Структура: феррит видманшtedтовый и аллотриаморфный, игольчатый феррит (7%), перлит (3%), мартенситная составляющая (80%). Твердость HV₁₀/HRC 460/46.

г) Охлаждение со скоростью 50 °С/с



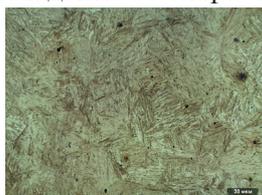
×500



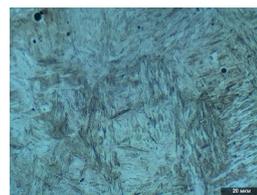
×1000

Структура: аллотриаморфный феррит по границам зерен (2%), мартенситная составляющая (98%). Твердость HV₁₀/HRC 580/54.

д) Охлаждение со скоростью 100 °С/с



×500



×1000

Структура: мартенситная составляющая (100%). Твердость HV₁₀/HRC 590/55.

Рис. 2. Микроструктура образцов стали 40C2 после различных скоростей охлаждения

Fig. 2. Microstructure of 40C2 steel samples after various cooling rates

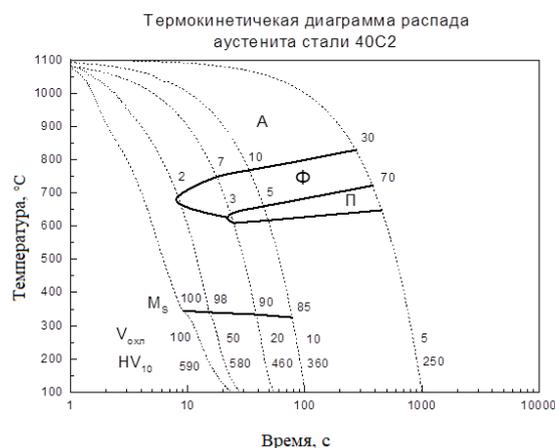


Рис. 3. Термокинетическая диаграмма распада аустенита стали 40С2

Fig. 3. Thermokinetic diagram of 40C2 steel

На диаграмме нанесены температуры фазовых превращений, количество структурных составляющих, скорости охлаждения и значения твердости HV_{10} .

Полученные результаты полностью отражают кинетику фазовых превращений стали марки 40С2 выбранного диапазона химического состава и позволяют прогнозировать свойства материала в зависимости от условий его охлаждения.

Заклучение

Таким образом, в результате проведенных исследований установлены температуры фазовых превращений стали марки 40С2 в выбранном диапазоне химического состава, реализуемых как в равновесном, так и в метастабильном состоянии.

Полученные результаты дали возможность выявить режим закалки для стали марки 40С2, позволяющий получение мартенситной структуры.

Температура нагрева под закалку должна превышать 840°C , а скорость охлаждения должна быть более $50^{\circ}\text{C}/\text{с}$.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] Liu J., Jiang B., Zhang C., Li G., Dai Y., Chen L. Evolution during hot rolling and control by thermo-mechanical control process of surface decarburization on 38Si7 spring steel // Journal of Materials Engineering and Performance. 2022. Vol. 31. P. 8677–8686. DOI: 10.1007/s11665-022-06956-5
- [2] Hutchinson B., Hagström J., Karlsson O., Lindell D., Tornberg M., Lindberg F., Thuvander M. Microstructures and hardness of as-quenched martensites (0.1–0.5%С) // Acta Materialia. 2011. Vol. 59, No. 14. P. 5845–5858. DOI: 10.1016/j.actamat.2011.05.061
- [3] Ostash O.P., Chepil' R.V., Markashova L.I., Hrybovs'ka V.I., Kulyk V.V., Berdnikova O.M. Influence of the modes of heat treatment on the durability of springs made of 65g steel // Materials Science. 2018. Vol. 53, No. 5. P. 684–690. DOI: 10.1007/s11003-018-0124-0
- [4] Reguly A., Strohaecker T.R., Krauss G., Matlock D.K. Quench embrittlement of hardened 5160 steel as a function of austenitizing temperature // Metallurgical and Materials Transactions A. 2004. Vol. 35. P. 153–162. DOI: 10.1007/s11661-004-0118-4
- [5] Wang P., Lu J., Zhao C., Yao L., Ming X. Analysis on the effects of material parameters on the fatigue performance of novel anticorrugation elastic rail clips // Shock and Vibration. 2020. DOI: 10.1155/2020/5416267

- [6] Wang Y., Sun J., Jiang T., Sun Y., Guo S., Liu Y. A low-alloy high-carbon martensite steel with 2.6 GPa tensile strength and good ductility // *Acta Materialia*. 2018. Vol. 158. P. 247–256. DOI: 10.1016/j.actamat.2018.07.060
- [7] Huang H., Liu J., Wang B. Continuous cooling kinetics modeling for a medium–high carbon spring steel // *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2019. Vol. 28. P. 3129–3135. DOI: 10.1007/s11665-019-04051-w
- [8] Мезин И.Ю., Гун Г.С., Чукин В.В., Крамзина Л.В. Совершенствование процессов формирования качества прутковой заготовки из стали 40С2 для производства пружинных изделий // *Качество в обработке материалов*. 2015. Т. 3, № 1. С. 35–44.
- [9] Рахштадт А.Г. Пружинные стали и сплавы. Москва: Металлургия. 1982. 400 с.
- [10] Кривошапов В.В., Вершигора С.М., Мезин И.Ю., Чукин В.В. Разработка и совершенствование технологии производства пружинных клемм // *Производство проката*. 2000. № 7. С. 21–24.
- [11] Htun M.S., Lwin K.T., Kyaw S.T. Effect of heat treatment on microstructures and mechanical properties of spring steel // *Journal of Metals, Materials and Minerals*. 2008. Vol. 18, No. 2. P. 191–197.
- [12] Сазонов Ю.Б., Комиссаров А.А., Смирнова Ю.В., Ожерелков Д.Ю., Шашина И.И. Применение термомеханической обработки с выдержкой в интервале субкритических температур для рессорно-пружинных сталей // *Современные проблемы науки и образования*. 2012. № 6. DOI: 10.17513/spno.2012.6
- [13] Тюленев Д.Г., Шолом В.Ю., Абрамов А.Н., Пузырьков Д.Ф. Влияние охлаждающих свойств закалочных жидкостей и режимов термообработки на твердость стали 40С2 // *Транспортное машиностроение*. 2024. Том 25, № 1. С. 4–12. DOI: 10.30987/2782-5957-2024-1-4-12
- [14] Попова Л.Е., Попов А.А. Диаграммы превращения аустенита в сталях и бета-раствора в сплавах титана. Справочник термиста. М.: Металлургия, 1991. 503 с.
- [15] Delbert G., Constant A. Courbes de transformation des aciers de fabrication française. Saint-Germain en Laye: Institut de Recherches de la Siderurgie (IRSID), 1956. 140 p.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ЗОТОВ Олег Геннадьевич — доцент, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, канд. техн. наук.
E-mail: zog-58@mail.ru

ГОЛУБКОВ Никита Александрович — ведущий инженер, Санкт-Петербургский политехнический университет, без степени.
E-mail: golubkov-na@yandex.ru
ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-6785-1444>

БЛИНОВ Святослав Алексеевич — инженер, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, без степени.
E-mail: blinov_sa@spbstu.ru
ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-2017-8249>

ЛЕВИТСКИЙ Алексей Максимович — инженер, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, без степени.
E-mail: levitskij_am@spbstu.ru
ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-7900-4007>

REFERENCES

- [1] **J. Liu, B. Jiang, C. Zhang, G. Li, Y. Dai, L. Chen**, Evolution during hot rolling and control by thermo-mechanical control process of surface decarburization on 38Si7 spring steel, *Journal of Materials Engineering and Performance*, 31 (2022) 8677–8686. DOI: 10.1007/s11665-022-06956-5
- [2] **B. Hutchinson, J. Hagström, O. Karlsson, D. Lindell, M. Tornberg, F. Lindberg, M. Thuvander**, Microstructures and hardness of as-quenched martensites (0.1–0.5% C), *Acta Materialia*, 59(14) (2011) 5845–5858. DOI: 10.1016/j.actamat.2011.05.061
- [3] **O.P. Ostash, R.V. Chepil', L.I. Markashova, V.I. Hrybovs'ka, V.V. Kulyk, O.M. Berdnikova**, Influence of the modes of heat treatment on the durability of springs made of 65g steel, *Materials Science*, 53(5) (2018) 684–690. DOI: 10.1007/s11003-018-0124-0
- [4] **A. Reguly, T.R. Strohaecker, G. Krauss, D.K. Matlock**, Quench embrittlement of hardened 5160 steel as a function of austenitizing temperature, *Metallurgical and Materials Transactions A*, 35 (2004) 153–162. DOI: 10.1007/s11661-004-0118-4
- [5] **P. Wang, J. Lu, C. Zhao, L. Yao, X. Ming**, Analysis on the effects of material parameters on the fatigue performance of novel anticorrugation elastic rail clips, *Shock and Vibration*, (2020). DOI: 10.1155/2020/5416267
- [6] **Y. Wang, J. Sun, T. Jiang, Y. Sun, S. Guo, Y. Liu**, A low-alloy high-carbon martensite steel with 2.6 GPa tensile strength and good ductility, *Acta Materialia*, 158 (2018) 247–256. DOI: 10.1016/j.actamat.2018.07.060
- [7] **H. Huang, J. Liu, B. Wang**, Continuous cooling kinetics modeling for a medium–high carbon spring steel, *Journal of Materials Engineering and Performance*, 28 (2019) 3129–3135. DOI: 10.1007/s11665-019-04051-w
- [8] **I.Yu. Mezin, G.S. Gun, V.V. Chukin, L.V. Kramzina**, Improving the quality of forming processes bar stock steel production for 40s2 spring products, *Kachestvo v obrabotke materialov [Quality in materials processing]*, 1(3) (2015) 35–44.
- [9] **A.G. Rakhshadt**, *Pruzhinnye stali i splavy [Spring steels and alloys]*. Moscow: Metallurgiya. 1982. 400 p.
- [10] **V.V. Krivoshechupov, S.M. Vershigora, I.Yu. Mezin, V.V. Chukin**, *Razrabotka i sovershenstvovanie tekhnologii proizvodstva pruzhinnykh klemm [Development and improvement of production technology of spring clips] // Proizvodstvo prokata*, 7 (2000) 21–24.
- [11] **M.S. Htun, K.T. Lwin, S.T. Kyaw**, Effect of heat treatment on microstructures and mechanical properties of spring steel, *Journal of Metals, Materials and Minerals*. 2008. Vol. 18, No. 2. P. 191–197.
- [12] **U.B. Sazonov, A.A. Komissarov, J.V. Smirnova, D.Y. Ozherelkov, I.I. Shashina**, Technological advances in thermomechanical processing of spring steels with treatment in the subcritical temperature range, *Modern Problems of Science and Education*, 6 (2012). DOI: 10.17513/spno.2012.6
- [13] **D. Tyulenev, V. Sholom, A. Abramov, D. Puzyrkov**, The influence of cooling properties of quenching liquids and heat treatment modes on 40C2 steel hardness, *Transport Engineering*, 1(25) (2024) 4–12. DOI: 10.30987/2782-5957-2024-1-4-12
- [14] **L.E. Popova, A.A. Popov**, *Diagrammy prevrashcheniia austenita v staliakh i beta-rastvora v splavakh titana. Spravochnik termista [Transformation diagrams of austenite in steels and beta solution in titanium alloys. Handbook of thermist]*. Moscow: Metallurgiya, 1991. 503 p.
- [15] **G. Delbert, A. Constant**, *Courbes de transformation des aciers de fabrication francaise*. Saint-Germain en Laye: Institut de Recherches de la Siderurgie (IRSID), 1956. 140 p.

INFORMATION ABOUT AUTHORS

Oleg G. ZOTOV – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University*.
E-mail: zog-58@mail.ru

Nikita A. GOLUBKOV – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*

E-mail: golubkov-na@yandex.ru

ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-6785-1444>

Sviatoslav A. BLINOV – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*

E-mail: blinov_sa@spbstu.ru

ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-2017-8249>

Alexey M. LEVITSKY – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*

E-mail: levitskij_am@spbstu.ru

ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-7900-4007>

Поступила: 20.12.2024; Одобрена: 15.01.2025; Принята: 17.01.2025.

Submitted: 20.12.2024; Approved: 15.01.2025; Accepted: 17.01.2025.