ЧЕБЫШЕВСКИЙ СБОРНИК

Том 22. Выпуск 5.

УДК 620.193:620.194.22

DOI 10.22405/2226-8383-2021-22-5-374-383

**Моделирование процесса коррозионного растрескивания
подземных трубопроводов**

С. Н. Кутепов, А. Н. Сергеев, А. Е. Гвоздев, А. Н. Чуканов, В. А. Терёшин, О. В. Кузовлева,
Е. В. Цой, Е. С. Крупицын

Кутепов Сергей Николаевич — кандидат педагогических наук, доцент, Тульский государственный педагогический университет им. Л. Н. Толстого (г. Тула).

e-mail: kutevov.sergei@mail.ru

Сергеев Александр Николаевич — доктор педагогических наук, профессор, Тульский государственный педагогический университет им. Л. Н. Толстого (г. Тула).

e-mail: ansergueev@mail.ru

Гвоздев Александр Евгеньевич — доктор технических наук, профессор, Тульский государственный педагогический университет им. Л. Н. Толстого (г. Тула).

e-mail: gwozdew.alexandr2013@yandex.ru

Чуканов Александр Николаевич — доктор технических наук, доцент, Тульский государственный педагогический университет им. Л. Н. Толстого (г. Тула).

e-mail: alexchukanov@yandex.ru

Терёшин Валерий Алексеевич — кандидат физико-математических наук, доцент, Тульский государственный педагогический университет им. Л. Н. Толстого (г. Тула).

email: technology@tspu.tula.ru

Кузовлева Ольга Владимировна — кандидат технических наук, доцент, Российский государственный университет правосудия (г. Москва).

e-mail: kusovleva@yandex.ru

Цой Евгений Владимирович — аспирант, Тульский государственный педагогический университет им. Л. Н. Толстого (г. Тула).

e-mail: tsoyev@tsput.ru

Крупицын Евгений Станиславович — кандидат физико-математических наук, Московский педагогический государственный университет (г. Москва).

e-mail: krupitsin@gmail.com

Аннотация

В статье представлены результаты разработки методики прогнозирования процесса коррозионного растрескивания подземных трубопроводов с использованием программного продукта COMSOL Multiphysics 5.6: Corrosion Module. С использованием разработанной методики установлено, что при малых значениях продольной деформации (1,75 и 2,75 мм) наблюдается равномерное распределение напряжений, коррозионного потенциала, плотности анодного и катодного тока по всей длине трещины. При возрастании степени деформации порядка 3,75 и 4 мм, распределение напряжений, коррозионного потенциала, плотности анодного и катодного тока носит более неравномерный характер: в вершине коррозионной трещины достигаются максимальные значения указанных величин, а по ее краям характерно их более равномерное распределение. Показано, что воздействие на коррозионную трещину локальной упругой деформации, не способствует усилению механико-электрохимического взаимодействия, способствующего повышению коррозионной активности.

Ключевые слова: коррозионное растрескивание, прогнозирование, продольная деформация, коррозионная трещина.

Библиография: 10 названий.

Для цитирования:

С. Н. Кутепов, А. Н. Сергеев, А. Е. Гвоздев, А. Н. Чуканов, В. А. Терёшин, О. В. Кузовлева, Е. В. Цой, Е. С. Крупицын Моделирование процесса коррозионного растрескивания подземных трубопроводов // Чебышевский сборник, 2021, т. 22, вып. 5, с. 374–383.

CHEBYSHEVSKII SBORNIK

Vol. 22. No. 5.

UDC 620.193:620.194.22

DOI 10.22405/2226-8383-2021-22-5-374-383

Modeling of the process of corrosion cracking of underground pipelines

S. N. Kutepov, A. N. Sergeev, A. E. Gvozdev, A. N. Chukanov, V. A. Tereshin, O. V. Kuzovleva, E. V. Tsoi, E. S. Krupitsyn

Kutepov Sergey Nikolaevich — candidate of pedagogical sciences, associate professor, Tula State Lev Tolsoy Pedagogical University (Tula).

e-mail: kutepov.sergei@mail.ru

Sergeev Alexander Nikolaevich — doctor of pedagogical sciences, professor, Tula State Lev Tolsoy Pedagogical University (Tula).

e-mail: ansergueev@mail.ru

Gvozdev Alexander Evgenievich — doctor of technical sciences, professor, Tula State Lev Tolsoy Pedagogical University (Tula).

e-mail: gwozdew.alexandr2013@yandex.ru

Chukanov Alexander Nikolaevich — doctor of technical sciences, associate professor, Tula State Lev Tolsoy Pedagogical University (Tula).

e-mail: alexchukanov@yandex.ru

Tereshin Valery Alekseevich — candidate of physical and mathematical sciences, associate professor, Tula State Lev Tolstoy Pedagogical University (Tula).

e-mail: technology@tspu.tula.ru

Kuzovleva Olga Vladimirovna — candidate of technical sciences, associate professor, Russian State University of Justice (Moscow).

e-mail: kusovleva@yandex.ru

Tsoi Evgeny Vladimirovich — postgraduate student, Tula State Lev Tolsoy Pedagogical University (Tula).

e-mail: tsoyev@tspu.ru

Krupitsyn Evgeny Stanislavovich — candidate of physical and mathematical sciences, Moscow Pedagogical State University (Moscow).

e-mail: krupitsin@gmail.com

Abstract

The article presents the results of the development of a methodology for predicting the process of corrosion cracking of underground pipelines using the COMSOL Multiphysics 5.6: Corrosion Module software product. Using the developed technique, it was found that at small

values of longitudinal deformation (1.75 and 2.75 mm), a uniform distribution of stresses, corrosion potential, density of anode and cathode current is observed along the entire length of the crack. With an increase in the degree of deformation of the order of 3.75 and 4 mm, the distribution of stresses, corrosion potential, density of the anode and cathode current is more uneven: the maximum values of these values are reached at the top of the corrosion crack, and their more uniform distribution is characteristic along its edges. It is shown that the effect of local elastic deformation on the corrosion crack does not contribute to the strengthening of the mechanical-electrochemical interaction, which contributes to an increase in corrosion activity.

Keywords: corrosion cracking, forecasting, longitudinal deformation, corrosion crack.

Bibliography: 10 titles.

For citation:

S. N. Kutepov, A. N. Sergeev, A. E. Gvozdev, A. N. Chukanov, Tereshin V. A., O. V. Kuzovleva, E. V. Tsoi, E. S. Krupitsyn, 2021, "Modeling of the process of corrosion cracking of underground pipelines", *Chebyshevskii sbornik*, vol. 22, no. 5, pp. 374–383.

1. Введение

В настоящее время одной из актуальных задач в сфере обеспечения безопасной эксплуатации зданий, сооружений и инженерных коммуникаций является прогнозирование их долговечности [1]. Однако, данная задача является достаточно трудоемкой по времени выполнения, поскольку зачастую требует от инженера-проектировщика применения специальных подходов, которые основаны на построении комплексных математических моделей поведения разрушения строительных конструкций, учитывающих целую совокупность действующих на конструкцию факторов (тепловые и ветровые нагрузки, вес людей и технологического оборудования, влияние внешней среды и др.).

В этой связи были разработаны специальные программные комплексы (так называемые CAE-системы (ComputerAidedEngineering)) позволяющие в сжатые сроки проводить оценку долговечности различных конструкций. В основе работы этих программных комплексов лежит метод конечных элементов. CAE-системы инженерного анализа (ABAQUS, ANSYS, COMSOL, NASTRAN, и др.) позволяют не только выполнить качественное моделирование систем различной физической природы, но и исследовать отклик этих систем на внешние воздействия в виде распределения напряжений, температур, скоростей, электромагнитных полей и т.д. [1]. Использование CAE-систем помогает проектным организациям в значительной мере сократить время на проектирование, снизить стоимость продукции и повысить ее качество.

Одним из широко распространенных программных комплексов для инженерного анализа является COMSOL Multiphysics. Его многоцелевая направленность позволяет решать различные мультифизические задачи, например, такие как прочность при тепловом нагружении, влияние магнитных полей на прочность конструкции, тепломассоперенос в электромагнитном поле, изучение кинетики электрохимических и химических реакций и др.

Цель настоящей работы — моделирование процесса коррозионного растрескивания подземного трубопровода с использованием программного продукта COMSOL Multiphysics 5.6.

2. Материалы и методы исследования

Модель, представленная в данной работе (рис. 1), используется для изучения поведения коррозионного растрескивания под напряжением подземных газопроводов, подверженных продольной деформации, вызванной движением грунта. Предполагается, что две электрохимические реакции, а именно окисление стали для анодной реакции и выделение водорода для катодной реакции, соответственно, происходят в среде, pH которой близка к нейтральной. В

качестве объекта исследования был выбран участок подземного трубопровода длиной 1,5 м и толщиной стенки 20 мм. Трубопровод изготовлен из высокопрочной легированной стали типа X100. В центре исследуемого участка трубопровода имеется коррозионная трещина эллиптической формы длиной 150 мм и глубиной 10 мм. Окружающая трубопровод почва играет роль почвенного электролита типа NS4. Электропроводность почвенного электролита составляет 0,096 См/м.

Моделирование проводилось с использованием программного продукта COMSOL Multiphysics 5.6: CorrosionModule, включающего в себя два расчетных интерфейса – SolidMechanics (механика твердого тела) и Secondary Current Distribution (вторичное распределение тока). Тип исследования — стационарное. Моделируемые параметры включают распределение напряжений, коррозионный потенциал, а также плотности анодного и катодного тока в зависимости от размера коррозионной трещины и продольной деформации растяжения, вызванной движением почвы.

Рис. 1: Геометрическая 2D-модель трубопровода с коррозионным дефектом (эллиптическая трещина), окруженная почвенным доменом типа NS4

Моделирование упругопластических напряжений в стали X100 проводилось с использованием модели пластичности при малых деформациях и критерия течения фон Мизеса [3]. Для моделирования использовали интерфейс SolidMechanics и определяемую пользователем модель изотропного упрочнения. Функция упрочнения σ_{yhard} определяли как [4]:

$$\sigma_{yhard} = \sigma_{\text{exp}}(\varepsilon_{eff}) - \sigma_{ys} = \sigma_{\text{exp}} \left(\varepsilon_p + \frac{\sigma_e}{E} \right) - \sigma_{ys}, \quad (1)$$

где σ_{exp} — экспериментальная функция напряжения, полученная из измеренной инженерной кривой напряжения-деформации стали X100;

ε_{eff} — общая эффективная деформация;

σ_{ys} — предел текучести стали X100 равный 803×10^6 Па;

ε_p — пластическая деформация; σ_e — напряжения фон Мизеса;

E — модуль упругости Юнга, равный 207×10^9 Па;

$\frac{\sigma_e}{E}$ — упругая деформация.

В процессе коррозионного растрескивания протекают две электрохимические реакции (причем предполагается, что электрохимически активной является только поверхность коррозионной трещины):

1. анодная — растворение железа ($Fe \rightarrow Fe^{2+} + 2e$);
2. катодная — выделение водорода ($2H_2O + 2e \rightarrow H_2 + 2OH^-$).

Для моделирования реакции растворения железа использовали анодное выражение Тафеля следующего вида:

$$i_a = i_{0,a} 10^{\frac{\eta_0}{A_0}}, \quad (2)$$

где $i_{0,a}$ — плотность тока обмена ($2,353 \cdot 10^{-3} \text{ А/м}^2$), A_a — наклон кривой Тафеля (0,118 В), а перенапряжение η_a для анодной реакции рассчитывается по формуле

$$\eta_a = \phi_S - \phi_l - E_{cq,a} \quad (3)$$

а равновесный потенциал анодной реакции $E_{cq,a}$ рассчитывается по формуле

$$E_{cq,a} = E_{cq0,a} - \frac{\Delta P_m V_m}{zF} - \frac{TR}{zF} \ln \left(\frac{\nu \alpha}{N_0} \varepsilon_p + 1 \right), \quad (4)$$

где $E_{cq0,a}$ — стандартный равновесный потенциал анодной реакции (−0,859 В),

ΔP_m — избыточное давление до упругой деформации ($2,687 \cdot 10^8 \text{ Па}$),

V_m — молярный объем стали ($7,13 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{моль}$),

z — число заряда для стали (2),

F — постоянная Фарадея,

T — абсолютная температура (298,15 К),

R — постоянная идеального газа,

ν — коэффициент, зависящий от ориентации (0,45),

α — коэффициент ($1,67 \cdot 10^{15} \text{ м}^{-2}$),

N_0 — начальная плотность дислокаций ($1 \cdot 10^{12} \text{ м}^{-2}$).

Катодное выражение Тафеля использовали для моделирования реакции растворения железа, оно устанавливает локальную катодную плотность тока

$$i_c = i_{0,c} 10^{\frac{\eta_c}{A_c}}, \quad (5)$$

где $i_{0,c}$ — плотность тока обмена, A_c — наклон Тафеля (−0,207 В), а перенапряжение η_c (единица СИ: В) для катодной реакции рассчитывается по формуле

$$\eta_c = \phi_S - \phi_l - E_{cq0,c}, \quad (6)$$

где $E_{cq0,c}$ — стандартный равновесный потенциал катодной реакции (−0,644 В).

Плотность тока обмена для катодной реакции определяли по формуле

$$i_{o,c} = i_{o,c,ref} 10^{\frac{\sigma_e V_m}{6(-A_c)}}, \quad (7)$$

где $i_{o,c,ref}$ — эталонная плотность тока обмена для катодной реакции в отсутствие внешнего напряжения/деформации ($1,457 \cdot 10^{-2} \text{ А/м}^2$).

Моделирование проводили в несколько этапов: на первом этапе были выбраны типы физических решателей (механика твердого тела и вторичное распределение тока) и тип расчета (стационарный). На втором этапе было выполнено построение геометрической модели подземного трубопровода с эллиптической трещиной (см. рис. 1), заданы модель изотропного

упрочнения, параметры процесса электрохимической коррозии, механические свойства материала трубопровода, величина продольной деформации трубопровода и др. На третьем этапе выполнено построение сетки конечных элементов и осуществлен расчет распределения напряжений по фон Мизесу, а также распределения коррозионного потенциала, плотности анодного и катодного токов по длине коррозионной трещины в зависимости от степени продольной деформации.

3. Результаты и их обсуждение

На рисунке 2 показано распределение потенциала электролита (В) по области грунта и распределение напряжений фон Мизеса (МПа) по области трубы для заданной величины продольной деформации (4 мм) в направлении оси x . Установлено, что вблизи коррозионной трещины локальные напряжения и коррозионный потенциал значительно выше, чем на других участках трубопровода.

Рис. 2: Распределение потенциала электролита в области грунта и распределение напряжения по Мизесу в области трубопровода для заданной степени деформации(4 мм)

На рисунке 3 показано распределение напряжений фон Мизеса по длине коррозионной трещины при заданной степени деформации(1,375, 2,75, 3,75, и 4 мм).Из анализа графических зависимостей видно, что напряжение фон Мизеса возрастает с увеличением степени деформации и оказывается максимальным (856 МПа) в вершине трещины. При увеличении степени деформации до 3,75и 4 мм локальное напряжение, особенно в вершине трещины, превышает предел текучести высокопрочной легированной стали (806 МПа) типа X100 на величину порядка 40–50 МПа. Это приводит к возникновению очага пластической деформации в ее вершине, в то время как величина деформации по краям трещины не превышает величину предела упругости. При меньшей степени продольной деформации (1,375 и 2,75 мм) упругие деформации равномерно распределены по всей длине трещины.

На рисунке 4 показано распределение коррозионного потенциала по длине коррозионной трещины при заданной степени деформации (1,375, 2,75, 3,75и 4 мм). При малых пластических деформациях (1,375 и 2,75 мм) изменение коррозионного потенциала равномерно по всей длине трещины. Однако при более высокой степени деформирования (3,75 и 4 мм) изменение коррозионного потенциала неравномерно, причем в вершине трещины коррозионный потенциал более отрицательный, чем по ее краям.

Рис. 3: Распределение напряжений по фон Мизесу по длине коррозионной трещины для заданных степеней деформации (1,375, 2,75, 3,75 и 4 мм)

На рисунках 5 и 5 показано распределение плотности анодного и катодного тока по длине трещины при заданной степени деформации (1,375, 2,75, 3,75 и 4 мм). При малых пластических деформациях (1,375 и 2,75 мм) изменение плотности анодного тока оказывается равномерным по длине трещины, что аналогично поведению коррозионного потенциала. Однако при увеличении степени деформации до 3,75 и 4 мм изменение плотности анодного тока более неравномерно, особенно в вершине трещины. Так при увеличении степени деформации (рис. 5) плотность анодного тока значительно увеличивается в вершине коррозионной трещины, в то время как она незначительно уменьшается по ее краям. Увеличение плотности анодного тока при увеличении степени деформации возможно объяснить возникновением очагов локальной пластической деформации, наблюдаемой в вершине коррозионной трещины (см. рис. 3).

Рис. 4: Распределение коррозионного потенциала по длине коррозионной трещины для заданных степеней деформации (1,375, 2,75, 3,75 и 4 мм)

Из анализа рисунка 6 видно, что плотность катодного тока возрастает с увеличением сте-

Рис. 5: Распределение плотности анодного тока по длине коррозионной трещины для заданных степеней деформации (1,375, 2,75, 3,75и 4 мм)

Рис. 6: Распределение плотности катодного тока по длине коррозионной трещины для заданных степеней деформации (1,375, 2,75, 3,75и 4 мм)

пени деформации и оказывается наиболее отрицательной в вершине коррозионной трещины. Также обнаружено, что неравномерность плотности катодного тока увеличивается с увеличением степени деформации. Таким образом, установлено, что распределение плотности катодного тока является наиболее неравномерным при величине деформации равной 4 мм.

4. Выводы

1. Установлено, что при малых значениях продольной деформации (1,75 и 2,75 мм) наблюдается равномерное распределение напряжений, коррозионного потенциала, плотности анодного и катодного тока по всей длине трещины. При возрастании степени деформации

порядка 3,75 и 4 мм, распределение напряжений, коррозионного потенциала, плотности анодного и катодного тока носит более неравномерный характер: в вершине коррозионной трещины достигаются максимальные значения указанных величин, а по ее краям характерно их более равномерное распределение.

2. Показано, что воздействие на коррозионную трещину локальной упругой деформации, не способствует усилению механико-электрохимического взаимодействия, способствующего повышению коррозионной активности.
3. Выявлено, что увеличение степени продольной деформации, способствует возникновению локальных очагов пластической деформации и как следствие возрастанию локальной коррозионной активности.

Полученные результаты могут быть использованы при создании ресурсосберегающих процессов обработки материалов [5]–[7].

СПИСОК ЦИТИРОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Жидков А. В. Применение системы ANSYS к решению задач геометрического и конечно-элементного моделирования. Учебно-методический материал по программе повышения квалификации «Информационные системы в математике и механике». Нижний Новгород, 2006, 115 с.
2. COMSOL Multiphysics: Corrosion Module. User's Guide. 2019. 428 p.
3. Xu L. Y., Cheng Y. F. Development of a finite element model for simulation and prediction of mechanoelectrochemical effect of pipeline corrosion // Corrosion Science. 2013. Vol. 73. P. 150-160.
4. COMSOL Multiphysics: Structural mechanics module. User's Guide. 2019. 1406 p.
5. М. Х. Шоршоров, А. Е. Гвоздев, А. Н. Сергеев, С. Н. Кутепов, О. В. Кузовлева, Е. М. Селедкин, Д. С. Клементьев, А. А. Калинин. Моделирование процессов ресурсосберегающей обработки слитковых, порошковых, наноструктурных и композиционных материалов: монография / изд. 2-е, испр. и доп. — Москва; Вологда: Инфра-Инженерия, 2021. 360 с. ISBN 978-5-9729-0596-6.
6. N. N. Sergeev, S. N. Kutepov, A. N. Sergeev, A. G. Kolmakov, V. V. Izvol'skii, A. E. Gvozdev. Long-Term Strength of 22Kh2G2AYu Reinforcing-Bar Steel during Corrosion Cracking Tests in a Boiling Nitrate Solution // Russian Metallurgy (Metally). 2020. № 4. P.434-440.
7. N. N. Sergeev, A. N. Sergeev, S. N. Kutepov, A. E. Gvozdev, A. G. Kolmakov, D. S. Klementev. Influence of Heat Treatment on Residual Stress Formation in the Wear-Resistant Steel 60–Steel 15–Steel 60 Bimetal Material // Inorganic Materials: Applied Research. 2021. Vol. 12. № 1. P. 5-9.
8. А. Н. Сергеев, С. Н. Кутепов, О. В. Кузовлева, А. Е. Гвоздев, Д. С. Клементьев. Математическое планирование и моделирование процессов поведения металлических систем в экстремальных условиях и состояниях // Алгебра, теория чисел и дискретная геометрия: современные проблемы, приложения и проблемы истории: Материалы XVIII Международной конференции, посвящённой со дня рождения профессоров Б.М. Бредихина, В.И. Нечаева и С.Б. Стечкина. Тула: ТГПУ им. Л.Н. Толстого, 2020. С. 385-388.

9. А. Е. Гвоздев. Экстремальные эффекты прочности и пластичности в металлических высоколегированных слитковых и порошковых системах: монография. 2-е изд., исправ. и доп. Тула: Издательство ТулГУ, 2019. 477 с.
10. М. Х. Шоршоров, А. Е. Гвоздев, В. И. Золотухин, А. Н. Сергеев, А. А. Калинин, А. Д. Бреки, Н. Н. Сергеев, О. В. Кузовлева, Н. Е. Стариков, Д. В. Малий. Разработка прогрессивных технологий получения и обработки металлов, сплавов, порошковых и композиционных наноматериалов // Монография. Тула: Издательство ТулГУ, 2016. 235 с.

REFERENCES

1. A. V. Zhidkov, 2006, "Application of the ANSYS system to solving problems of geometric and finite element modeling. Educational-methodical material for the advanced training program "Information systems in mathematics and mechanics." Nizhny Novgorod, 115 p.
2. COMSOL Multiphysics: Corrosion Module. User's Guide. 2019. 428 p.
3. L. Y. Xu, Y. F. Cheng, 2013, "Development of a finite element model for simulation and prediction of mechano-electrochemical effect of pipeline corrosion", Corrosion Science, vol. 73. pp. 150-160.
4. COMSOL Multiphysics: Structural mechanics module. User's Guide. 2019. 1406 p.
5. М. Х. Шоршоров, А. Е. Гвоздев, А. Н. Сергеев, С. Н. Кутепов, О. В. Кузовлева, Е. М. Сеledкин, Д. С. Кlement'ev, А. А. Калинин, 2021, "Modeling the processes of resource-saving processing of ingot, powder, nanostructured and composite materials: monograph / ed. 2nd, rev. and add. — Moscow; Vologda: Infra-Engineering, 360 p. ISBN 978-5-9729-0596-6.
6. N. N. Sergeev, S. N. Kutepov, A. N. Sergeev, A. G. Kolmakov, V. V. Izvol'skii, A. E. Gvozdev, 2020, "Long-Term Strength of 22Kh2G2AYu Reinforcing-Bar Steel during Corrosion Cracking Tests in a Boiling Nitrate Solution", Russian Metallurgy (Metally), no. 4, p. 434-440.
7. N. N. Sergeev, A. N. Sergeev, S. N. Kutepov, A. E. Gvozdev, A. G. Kolmakov, D. S. Klementev, 2021, "Influence of Heat Treatment on Residual Stress Formation in the Wear-Resistant Steel 60 – Steel 15 – Steel 60 Bimetal Material", Inorganic Materials: Applied Research, vol. 12, no. 1, pp. 5-9.
8. A. N. Sergeev, S. N. Kutepov, O. V. Kuzovleva, A. E. Gvozdev, D. S. Klementyev, 2020, "Mathematical planning and modeling of the processes of behavior of metallic systems in extreme conditions and states", Algebra, number theory and discrete geometry: modern problems, applications and problems of history: Proceedings of the XVIII International conference dedicated to the birth of professors B. M. Bredikhin, V. I. Nechaev and S. B. Stechkin. Tula: TSPU im. L.N. Tolstoy, pp. 385-388.
9. А. Е. Гвоздев, 2019, "Extreme effects of strength and plasticity in high-alloy metal ingot and powder systems". Monograph. 2nd ed., Revised. and add. Tula: Publishing house of TulSU, 477 p.
10. М. Х. Шоршоров, А. Е. Гвоздев, В. И. Золотухин, А. Н. Сергеев, А. А. Калинин, А. Д. Бреки, Н. Н. Сергеев, О. В. Кузовлева, Н. Е. Стариков, Д. В. Малий, 2016, "Development of advanced technologies for the production and processing of metals, alloys, powder and composite nanomaterials", Monograph. Tula: Publishing house of TulSU, 235 p.

Получено 3.09.2021 г.

Принято в печать 21.12.2021 г.