



В Е С Т Н И К

ГОМЕЛЬСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНИЧЕСКОГО
УНИВЕРСИТЕТА ИМЕНИ П. О. СУХОГО

НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ
ИЗДАЕТСЯ С МАРТА 2000 г.

1(96)' 2024

Главный редактор

А. В. ПУТЯТО,
д-р техн. наук, профессор,
ректор учреждения
образования «Гомельский
государственный
технический университет
имени П. О. Сухого»
(Гомель, Беларусь)

Заместитель
главного редактора

А. А. БОЙКО,
д-р техн. наук, профессор
(Гомель, Беларусь)

Ответственный
секретарь

А. С. РЯБЦЕВА

Адрес редакции:

Пр. Октября, 48,
246746, г. Гомель,
Республика Беларусь
Тел./факс +375 232 214 373
E-mail: nich@gstu.by

Редакционная коллегия

Аль-Ареки Ниязи А. С., д-р, профессор (Таиз, Йемен),
О. Д. Асенчик, канд. физ.-мат. наук, доцент (Гомель, Бела-
русь), **М. Н. Верещагин,** д-р техн. наук, профессор (Гомель,
Беларусь), **В. А. Голуб,** д-р экон. наук, профессор (Гомель,
Беларусь), **Н. В. Грунтович,** д-р техн. наук, профессор
(Гомель, Беларусь), **А. Г. Гурко,** д-р техн. наук, профессор
(Харьков, Украина), **Н. П. Драгун,** канд. экон. наук, доцент
(Минск, Беларусь), **В. В. Кириенко,** д-р социол. наук, про-
фессор (Гомель, Беларусь), **В. А. Ковтун,** д-р техн. наук,
профессор (Гомель, Беларусь), **В. П. Кудин,** д-р техн. наук,
профессор (Гомель, Беларусь), **М. И. Михайлов,** д-р техн.
наук, профессор (Гомель, Беларусь), **В. В. Муляк,** д-р техн.
наук (Москва, Россия), **Н. К. Мышкин,** академик НАН Бела-
руси, д-р техн. наук, профессор (Гомель, Беларусь),
А. Б. Невзорова, д-р техн. наук, профессор (Гомель, Бела-
русь), **А. В. Овсянник,** д-р техн. наук, профессор (Гомель,
Беларусь), **Е. Н. Подденежный,** д-р хим. наук, доцент
(Гомель, Беларусь), **В. Д. Порошин,** д-р геол.-минерал. наук,
профессор (Гомель, Беларусь), **А. С. Семенов,** д-р физ.-мат.
наук, доцент (Мирный, Россия), **Ш. А. Султанова,** д-р техн.
наук, профессор (Ташкент, Узбекистан), **А. В. Сычѐв,** канд.
техн. наук, доцент (Гомель, Беларусь), **Н. В. Сычѐва,** канд.
экон. наук, доцент (Гомель, Беларусь), **С. И. Тимошин,** д-р
физ.-мат. наук, профессор (Гомель, Беларусь), **А. С. Титлов,**
д-р техн. наук, профессор (Одесса, Украина), **П. А. Хило,** д-р
физ.-мат. наук, профессор (Гомель, Беларусь), **Н. Н. Химич,**
д-р техн. наук, профессор (Санкт-Петербург, Россия),
О. Н. Шабловский, д-р физ.-мат. наук, профессор (Гомель,
Беларусь), **В. М. Шаповалов,** д-р техн. наук, профессор
(Гомель, Беларусь), **А. П. Шевлюков,** д-р экон. наук, профес-
сор (Гомель, Беларусь)

СО Д Е Р Ж А Н И Е

Машиностроение и машиноведение

Шабловский О. Н., Концевой И. А. Кинетические свойства вершины дендрита
в переохлажденном расплаве чистого металла 5

Бекиров Э. Л., Джемилев Э. Ш., Селяметов Р. Ю. Оценка влияния способа
подачи смазочно-охлаждающих жидкостей на контактные процессы
при сверлении нержавеющей стали 12X18H10T 15

Сейдалиев Р. С., Курманов Р. Д., Фукала А. А., Джемилев Э. Ш. <i>Экспериментальные исследования влияния смазочно-охлаждающих технологических средств на контактные процессы при торцевом фрезеровании</i>	23
Чернин Р. И., Пулято А. В., Коцур И. Л. <i>Совершенствование технологий ремонта и изготовления соединений с натягом элементов колесных пар железнодорожного подвижного состава</i>	29
Попов В. Б. <i>Особенности аналитического описания механизма агрегатирования косилки самоходной КС-200</i>	41
Материаловедение	
Попкова Ю. И., Григорьев А. Я. <i>Влияние состава стали на коррозионную стойкость насосно-компрессорных труб в условиях углекислотной коррозии</i>	48
Никитюк Ю. В., Баевич Г. А., Максименко А. В., Аушев И. Ю. <i>Оптимизация параметров импульсной лазерной наплавки стали 30XГСН2А с использованием генетического алгоритма</i>	63
Невзорова А. Б., Романенко В. В. <i>Имитационное моделирование несущей способности составной деревянной шпалы с учетом поездной нагрузки</i>	72
Энергетика	
Капанский А. А. <i>Ключевые направления и мировые практики повышения эффективности и надежности водоснабжения</i>	82
Геология и разработка нефтяных и газовых месторождений	
Порошина А. А. <i>Вторичные изменения карбонатных пород Непско-Ботубинской антеклизы юга Сибирской платформы и их влияние на коллекторские свойства продуктивных горизонтов</i>	99

- Журнал входит в Перечень научных изданий Республики Беларусь для опубликования результатов диссертационных исследований: по техническим наукам – машиностроение и машиноведение, материаловедение, энергетика (приказ ВАК РБ № 101 от 04.06.2005 г.); по экономическим наукам – экономика и управление народным хозяйством (приказ ВАК РБ № 26 от 02.02.2011 г.) и включен в базу данных Российского индекса научного цитирования (РИНЦ)
- Публикуемые материалы рецензируются
- Подписные индексы: для индивидуальных подписчиков – 00063
для предприятий и организаций – 000632

Ответственный за выпуск **Н. Г. Мансурова**

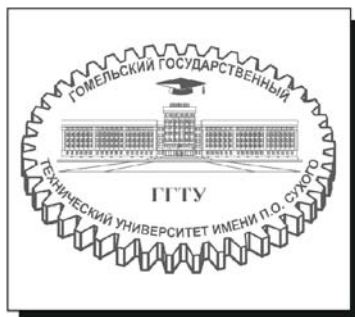
Редакторы: **Т. Н. Мисюрова, О. С. Ковалёва**
Компьютерная верстка **Н. Б. Козловская**

Подписано в печать 26.03.2024 г.

Формат 60x84/8. Бумага офсетная. Гарнитура «Таймс».
Ризография. Усл. печ. л. 13,48. Уч.-изд. л. 10,52.
Тираж 100 экз. Заказ № 194/5.

Издатель и полиграфическое исполнение
Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого.
ЛП № 02330/480 от 20.12.2016 г.
Пр. Октября, 48, 246746, г. Гомель

© Учреждение образования
«Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», 2024



BULLETIN

SUKHOI STATE TECHNICAL UNIVERSITY OF GOMEL

SCIENTIFIC-PRACTICAL JOURNAL
HAS BEEN PUBLISHED SINCE MARCH 2000

1 (96)' 2024

Editor-in-Chief

A. V. PUTSIATA,
Doctor of Engineering,
Professor,
Rector of Educational
Institution "Sukhoi
State Technical
University of Gomel"

Deputy editor-in-chief

A. A. BOIKA,
Doctor of Engineering,
Professor
(Gomel, Belarus)

Responsible Secretary

A. S. RYABTSEVA

Editorial Address:

Pr. Octiabria, 48,
246746, Gomel,
Republic of Belarus
Tel./Fax +375 232 214 373
E-mail: nich@gstu.by

Editorial Board

Al-Areki Niyazi A. S., Doctor, Professor (Taiz, Yemen),
O. D. Asenchik, Ph.D. in Physics and Mathematics, Associate Professor (Gomel, Belarus), **M. N. Vereshchagin**, Doctor of Engineering, Professor (Gomel, Belarus), **V. A. Golub**, Doctor of Economics, Professor (Gomel, Belarus), **N. V. Gruntovich**, Doctor of Engineering, Professor (Gomel, Belarus), **A. G. Gurko**, Doctor of Engineering, Professor (Kharkov, Ukraine), **N. P. Dragun**, Ph.D. in Economics, Associate Professor (Minsk, Belarus), **V. V. Kirienko**, Doctor of Social Science, Professor (Gomel, Belarus), **V. A. Kovtun**, Doctor of Engineering, Professor (Gomel, Belarus), **V. P. Kudin**, Doctor of Engineering, Professor (Gomel, Belarus), **M. I. Mikhailov**, Doctor of Engineering, Professor (Gomel, Belarus), **V. V. Mulyak**, Doctor of Engineering (Moscow, Russia), **N. K. Myshkin**, Academician of the National Academy of Sciences of Belarus, Doctor of Engineering, Professor (Gomel, Belarus), **A. B. Nevzorova**, Doctor of Engineering, Professor (Gomel, Belarus), **A. V. Ovsyannik**, Doctor of Engineering, Professor (Gomel, Belarus), **E. N. Poddenezhny**, Doctor of Chemistry, Associate Professor (Gomel, Belarus), **V. D. Poroshin**, Doctor of Geology and Mineralogy, Professor (Gomel, Belarus), **A. S. Semenov**, Doctor of Physics and Mathematics, Associate Professor (Mirny, Russia), **S. A. Sultanova**, Doctor of Engineering, Professor (Tashkent, Uzbekistan), **A. V. Sychou**, Ph.D. in Engineering, Associate Professor (Gomel, Belarus), **N. V. Sycheva**, Ph.D. in Economics, Associate Professor (Gomel, Belarus), **S. I. Timoshin**, Doctor of Physics and Mathematics, Professor (Gomel, Belarus), **A. S. Titlov**, Doctor of Engineering, Professor (Odessa, Ukraine), **P. A. Hilo**, Doctor of Physics and Mathematics, Professor (Gomel, Belarus), **N. N. Khimich**, Doctor of Engineering, Professor (St. Petersburg, Russia), **O. N. Shablovsky**, Doctor of Physics and Mathematics, Professor (Gomel, Belarus), **V. M. Shapovalov**, Doctor of Engineering, Professor (Gomel, Belarus), **A. P. Shevlyukov**, Doctor of Economics, Professor (Gomel, Belarus)

CONTENT

Mechanical Engineering and Machine Science

Shablovsky O. N., Kontsevoy I. A. Kinetic properties of a dendrite tip in a supercooled melt of pure metal

<i>Bekirov E. L., Dzhemilov E. Sh., Selyametov R. U. Assessment of cutting fluids supplying method influence on contact processes when drilling stainless steel 12X18H10T</i>	15
<i>Seidaliev R. S., Kurmanov R. D., Fukala A. A., Dzhemilov E. Sh. Experimental research on cutting fluids and technological means influence on contact processes during face milling</i>	23
<i>Chernin R. I., Putsiata A. V., Kotsur I. L. Improvement of technologies for repair work and production of tension joints for wheel pair elements of railway rolling stock</i>	29
<i>Popov V. B. Features of analytical description of self-propelled mower KC-200 aggregation mechanism</i>	41
Materials Science	
<i>Popkova Yu. I., Grigoriev A. Ya. Influence of steel characteristics on the corrosion resistance of tubing under carbon dioxide corrosion conditions</i>	48
<i>Nikityuk Yu. V., Bayevich G. A., Maximenko A. V., Aushev I. Yu. Optimization of parameters for pulsed laser cladding of 30XГCH2A steel via genetic algorithm</i>	63
<i>Nezvorova A. B., Romanenko V. V. Simulation modelling of the load-bearing capacity of composite wooden sleepers taking into account train load</i>	72
Energy industry	
<i>Kapansky A. A. Key directions and global practices of efficiency and reliability improvement of water supply</i>	82
Geology and oil and gas fields development	
<i>Poroshina A. D. Secondary changes in carbonate rocks of Nepa-Botuoba antecline in the south of the Siberian platform and their impact on the reservoir properties of productive horizons</i>	99

- The journal is included in the Register of scientific journals of the Republic of Belarus for publishing the dissertations results on technical sciences – Mechanical Engineering, Material Sciences, Power Engineering (HAC RB order № 101 of 04.06.2005); on economics sciences – Economics and National Economy Management (HAC RB order № 26 of 02.02.2011) and in the Russian Scientific Citation Index (RSCI) database
- Published materials are reviewed
- Indexes for subscribing: for individuals – 00063
for legal parties – 000632

УДК 548.232.4

<https://doi.org/10.62595/1819-5245-2024-1-5-14>

КИНЕТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ВЕРШИНЫ ДЕНДРИТА В ПЕРЕОХЛАЖДЕННОМ РАСПЛАВЕ ЧИСТОГО МЕТАЛЛА

О. Н. ШАБЛОВСКИЙ, И. А. КОНЦЕВОЙ

*Учреждение образования «Гомельский государственный
технический университет имени П. О. Сухого»,
Республика Беларусь*

Рассмотрен высокоскоростной дендритный рост кристалла из глубоко переохлажденного расплава чистого металла. Основой исследования служит уравнение роста вершины дендрита с учетом локально-неравновесных свойств теплопереноса. Получены закономерности влияния переохлаждения расплава на поведение кривизны вершины и теплоотвод от твердой фазы. Вычислены границы интервала аперидической устойчивости фазовой границы кристаллизации. Изучена стоячая волна возмущения вершины дендрита: определены периоды колебаний по координате и времени, а также указаны закономерности их поведения при изменении параметра затухания волны. Представлены результаты сравнительного анализа кинетических свойств вершины дендрита для никеля и меди.

Ключевые слова: высокоскоростная кристаллизация, неустойчивость линии роста, кривизна фазовой границы, дендритный рост.

Для цитирования. Шабловский, О. Н. Кинетические свойства вершины дендрита в переохлажденном расплаве чистого металла / О. Н. Шабловский, И. А. Концевой // Вестн. Гомел. гос. техн. ун-та им. П. О. Сухого. – 2024. – № 1 (96). – С. 5–14. <https://doi.org/10.62595/1819-5245-2024-1-5-14>

KINETIC PROPERTIES OF A DENDRITE TIP IN A SUPERCOOLED MELT OF PURE METAL

O. N. SHABLOVSKY, I. A. KONTSEVOY

*Sukhoi State Technical University of Gomel,
the Republic of Belarus*

High-speed dendritic growth of a crystal from a deeply supercooled pure metal melt is considered. The dendrite tip growth equation serves as the basis of the study, while local nonequilibrium heat transfer properties have also been taken into account. The regularities of melt supercooling influence on the curvature of the apex behaviour and heat removal from the solid phase have been obtained. The interval limits of crystallization phase boundary aperiodic stability are calculated. A standing wave of perturbation of the dendrite tip has been studied: the periods of oscillations in coordinate and time have been determined, as well as the patterns of their behavior when the wave attenuation parameter changes have been indicated. The results of a comparative analysis of the dendrite tip kinetic properties for nickel and copper are presented.

Keywords: High-speed crystallization, growth line instability, curvature of the phase boundary, dendritic growth.

For citation. Shablovsky O. N., Kontsevoy I. A. Kinetic properties of a dendrite tip in a supercooled melt of pure metal. *Vestnik Gomel'skogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta imeni P. O. Sukhogo*, 2024, no. 1 (96), pp. 5–14 (in Russian). <https://doi.org/10.62595/1819-5245-2024-1-5-14>

Введение

В настоящее время экспериментально достигнуты скорости роста кристалла 20–70 м/с в расплавах, переохлажденных до 300 К [1]. В таких условиях система «расплав – кристалл» находится в локально-неравновесном состоянии, и для ее изучения необходимо применять неклассические модели термодинамики [2]. Дендрит-

ный рост кристалла из переохлажденного расплава чистого вещества наблюдается при достаточно больших переохлаждениях ΔT : например, для никеля при $\Delta T > 57$ К. Современное состояние исследований этой фундаментальной задачи представлено в статьях [3–8]. В прикладном отношении проблема высокоскоростного затвердевания расплава актуальна в связи с разработкой технологий получения материалов, обладающих высокими эксплуатационными свойствами [9].

Цель данной работы – изучить некоторые кинетические свойства вершины дендрита и выполнить сравнительный анализ процессов роста в чистых расплавах никеля (переохлаждение $\Delta T \geq 166$ К) и меди ($\Delta T \geq 180$ К).

Уравнение роста

Уравнение роста дендрита при глубоких переохлаждениях расплава чистого вещества получено в [10, 11] с учетом локально-неравновесных свойств теплопереноса. Запишем это уравнение в следующем виде:

$$\begin{aligned} (L + L_*U_2 + K)\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{N}{\gamma}(L_* + U_2K) - \frac{cN^2}{\gamma\mu} - \frac{3c}{\mu}N\frac{\partial N}{\partial t} + \\ + L\gamma\frac{\partial^2 N}{\partial t^2} + 2U_2N\frac{\partial K}{\partial t} + N(q_v + q_{nj}K) = 0, \end{aligned} \quad (1)$$

$$\frac{\partial K}{\partial t} = \frac{\partial^2 N}{\partial y^2}. \quad (2)$$

Здесь $x = F(y, t)$ – двумерная плоская линия роста кристалла; x, y – прямоугольные декартовы координаты; ось x направлена вдоль оси симметрии дендрита в сторону твердой фазы; y – поперечная координата; t – время; считаем, что фазовая граница движется справа налево, в сторону отрицательных значений x ; $N = \partial F / \partial t$; $K = \partial^2 F / \partial y^2$; $U_2 = cT_c U_1$; $U_1 = U/L$; $L_* = L - c_*\Delta T$; $q_{nj} = N[(cN/\mu) - U_2K - L_*] - L\gamma(\partial N/\partial t)$; c – объемная теплоемкость кристалла; c_* – объемная теплоемкость расплава; μ – кинетический коэффициент; γ – время релаксации теплового потока; $q_v < 0$ – объемный сток энергии, который моделирует отвод тепла от твердой фазы; L – теплота фазового перехода единицы объема вещества; U – поверхностная энергия границы раздела фаз; T_c – равновесная температура кристаллизации; $N < 0$ – скорость перемещения линии роста; $K > 0$ – кривизна фазовой границы. Уравнения (1), (2) справедливы в малой окрестности вершины дендрита – вблизи $y = 0$.

Уравнение (1) имеет точное решение:

$$F_0(y, t) = N_0 t + (K_0 y^2 / 2), \quad (3)$$

$$N_0 < 0, \quad K_0 > 0; \quad N_0, \quad K_0 - \text{const},$$

которое определяет стационарный параболический профиль, перемещающийся с постоянной скоростью (подробности изложены в [10]). Объемный сток энергии, соответствующий зависимости (3), выглядит так:

$$|q_v| = \frac{L_1}{\gamma} + N_m \left(K_0 L_1 + \frac{c}{\gamma\mu} \right) + K_0 N_m^2 \frac{c}{\mu}, \quad (4)$$

$$L_1 = L_* + K_0 U_2, \quad N_m = -N_0.$$

Линеаризация уравнения (1) на точном решении (3) выполняется в следующей форме:

$$F(y, t) = F_0(y, t) + f(y, t), \quad t \geq 0$$

и имеет своим результатом уравнение, определяющее малое возмущение $f(y, t)$ [11]:

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial^2 f}{\partial t^2} - \alpha_0 \frac{\partial^2 f}{\partial y^2} \right) + \alpha_1 \frac{\partial f}{\partial t} + \alpha_2 \frac{\partial^2 f}{\partial t^2} - \alpha_3 \frac{\partial^2 f}{\partial y^2} = 0, \quad (5)$$

$$\alpha_i = s_i / (L\gamma), \quad i = 0, 1, 2, 3;$$

$$s_0 = -2N_0U_2, \quad s_1 = (2K_0N_0^2c/\mu) - (cN_0/\gamma\mu) - K_0N_0L_* - K_0^2N_0U_2,$$

$$s_2 = L + L_* + K_0U_2 - (3cN_0/\mu) - K_0N_0L\gamma,$$

$$s_3 = 2K_0N_0^2U_2 + N_0^2L_* - (N_0U_2/\gamma) - (cN_0^3/\mu).$$

Коэффициенты $\alpha_i = \alpha_i(\Delta T)$ зависят от переохлаждения расплава посредством функций $N_0 = N_0(\Delta T)$, $\mu = \mu(\Delta T)$. В работе [7] получены полуэмпирические зависимости $N_0(\Delta T)$, $\mu(\Delta T)$ для чистых расплавов никеля и меди. Кривизна K_0 входит в (5) как свободный параметр: его числовое значение мы задаем, применяя известные в литературе [5, 6] результаты экспериментальных измерений. Уравнение (5) формально содержит две «скорости звука» $w_1^2 = \alpha_0$, $w_2^2 = \alpha_3/\alpha_2$, $0 < w_1^2 < w_2^2$, существенно зависящие от ΔT . В статье [12] рассмотрены дозвуковые, звуковые и сверхзвуковые режимы распространения бегущих волн возмущения и указаны качественные закономерности поведения линии роста в этих интервалах скоростей.

В настоящей статье представлены результаты расчетов в размерных и безразмерных величинах. При обезразмеривании применяем следующие масштабы времени и длины: $t_b = 10^{-7}$ с, $y_b = 10^{-6}$ м. Размерным коэффициентам α_i соответствуют безразмерные β_i :

$$\beta_0 = \alpha_0 \frac{t_b^2}{y_b^2}, \quad \beta_1 = \alpha_1 t_b^2, \quad \beta_2 = \alpha_2 t_b, \quad \beta_3 = \alpha_3 \frac{t_b^3}{y_b^2}.$$

Переохлаждение расплава ΔT всюду указано в градусах Кельвина. Числовые значения теплофизических параметров соответствуют известным в литературе справочным данным: никель, Ni: $T_c = 1728$ К, $L = 2,14 \cdot 10^9$ Дж/м³, $U = 0,38$ Дж/м², $\gamma = 1,3804 \cdot 10^{-7}$ с, $c = 5,62 \cdot 10^6$ Дж/(м³ · К), $\lambda = 69$ Вт/(м · К), $\mu = 9,53$ м/(К · с), $T_* = 1562$ К, $N_b = 5,3$ м/с; медь, Cu: $T_c = 1357$ К, $L = 1,77 \cdot 10^9$ Дж/м³, $U = 0,26$ Дж/м², $\gamma = 4,755 \cdot 10^{-8}$ с, $c = 4,17 \cdot 10^6$ Дж/(м³ · К), $\lambda = 317$ Вт/(м · К), $\mu = 10,06$ м/(К · с), $T_* = 1177$ К, $N_b = 11$ м/с. Для всех рассматриваемых здесь вариантов принимаем $K_0 = 10^7$ м⁻¹.

Апериодическая устойчивость возмущения

Апериодическое по времени возмущение фазовой границы имеет вид:

$$f(y, t)/H = \exp(-rt) \cos ky, \quad t \geq 0, \quad y \in [0, y_1), \quad (6)$$

$$k^2 = r(r^2 - \alpha_2 r + \alpha_1)/(\alpha_3 - \alpha_0 r), \quad r^{(1)} < r < r^{(2)}, \quad (7)$$

$$r^{(1)} = \alpha_2, \quad r^{(2)} = (\alpha_3/\alpha_0),$$

где H – константа первого порядка малости. Координата y_1 располагается в малой окрестности вершины дендрита, т. е. там, где справедливо основное решение (3). Согласно (6), возмущение кривизны $f_{yy} \sim k^2$ весьма чувствительно к изменению параметра k . Вместе с тем из (7) ясно, что если параметр затухания r находится в малой левой окрестности порогового значения $r = r^{(2)}$, т. е. если $r = (\alpha_3/\alpha_0) - 0$, то $k^2 \rightarrow \infty$, и предвестник складки располагается вблизи вершины $y = 0$. Следовательно, формула $\alpha_3 = \alpha_0 \alpha_2$ определяет верхнюю границу K_f устойчивых значений кривизны $K_0 < K_f$, обеспечивающих отсутствие складки в окрестности вершины:

$$K_f = \frac{L\gamma}{2U_2^2} \left(N_m L_* + \frac{cN_m^2}{\mu} \right) - \frac{1}{U_2} \left(\frac{3cN_m}{\mu} + \frac{L}{2} + L_* \right).$$

На рис. 1 даны зависимости $|q_v|$ и K_f от переохлаждения ΔT . Качественные свойства теплоотода $q_v(\Delta T)$ для никеля и меди существенно различаются: для никеля эта зависимость имеет хорошо выраженную немонотонность.

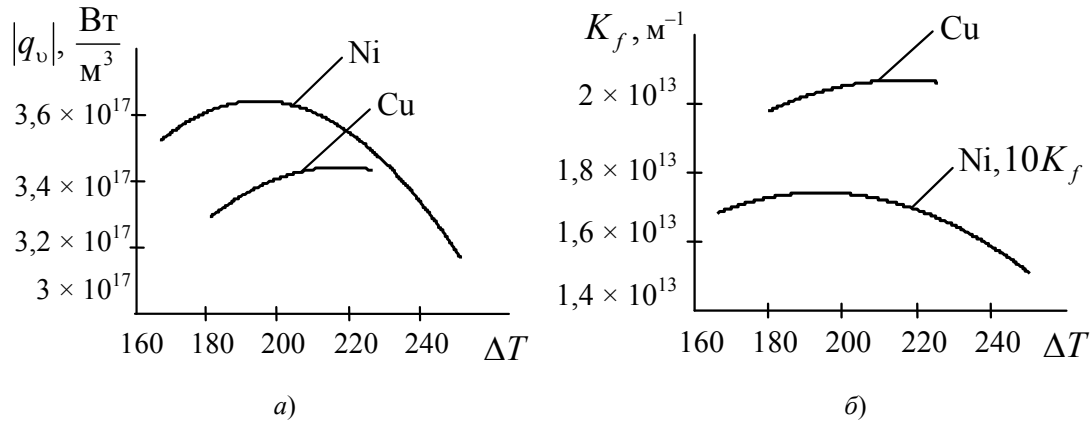


Рис. 1. Свойства теплоотода $|q_v|$ (а) и верхней границы K_f (б) значений кривизны вершины дендрита

Полученные в результате расчетов числовые значения $K_f(\Delta T)$ говорят о том, что апериодический режим (6) устойчив: верхняя граница K_f в данных условиях не достигается. В безразмерном виде на рис. 2 показаны границы $r^{(1)}$, $r^{(2)}$ интервала устойчивости (7); на рис. 3 – полупериод колебаний по координате y . Для обоих металлов:

$$\frac{\partial r^{(1)}}{\partial(\Delta T)} > 0, \quad \frac{\partial(\pi/k)}{\partial r} < 0, \quad \frac{\partial(\pi/k)}{\partial(\Delta T)} > 0.$$

Для $r^{(2)} = r^{(2)}(\Delta T)$ качественные и количественные различия между никелем и медью представлены на рис. 2.

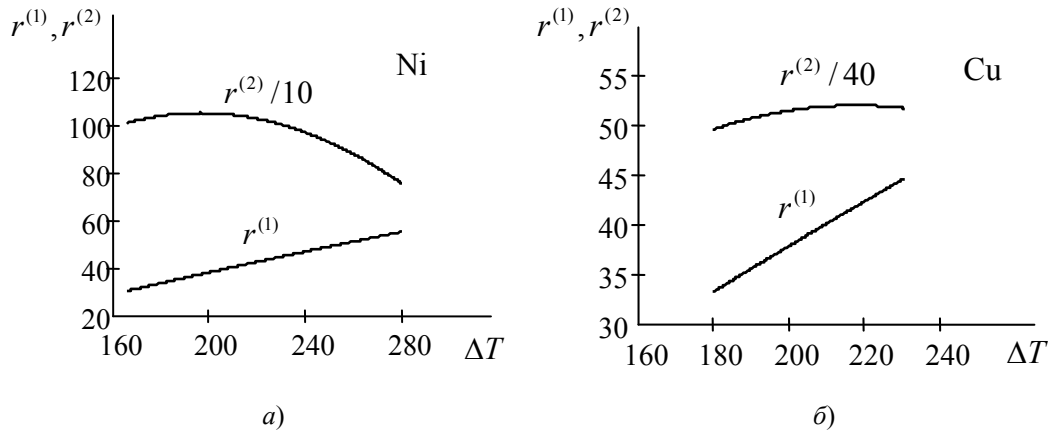


Рис. 2. Влияние переохлаждения расплава на границы интервала аperiodической устойчивости фазовой границы кристаллизации для никеля (а) и меди (б)

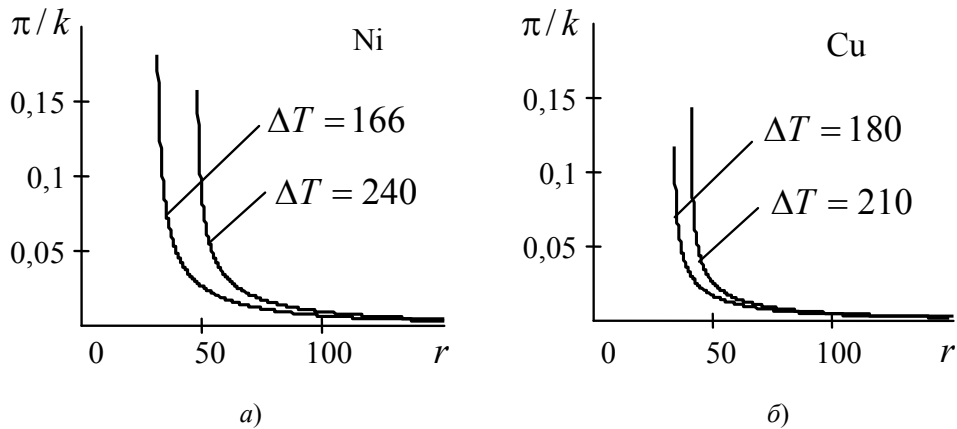


Рис. 3. Корреляция «параметр затухания по времени – параметр пространственной неоднородности возмущения» для никеля (а) и меди (б)

Стоячая волна возмущения

Незатухающая стоячая волна возмущения имеет вид:

$$f(y,t)/H = \cos ky \sin mt, \quad t \geq 0, \quad y \in [0, y_1], \quad (8)$$

$$k^2 = \frac{\beta_1 \beta_2}{\beta_3 - \beta_0 \beta_2}, \quad m^2 = \frac{\beta_1 \beta_3}{\beta_3 - \beta_0 \beta_2},$$

$$w_2 = m/k = (\beta_3 / \beta_2)^{1/2}, \quad (9)$$

где m/k – скорость стоячей волны, перемещающейся со скоростью звука w_2 . Результаты расчета (рис. 4) этого режима возмущения демонстрируют отчетливые различия между никелем и медью. Для меди имеем:

$$\frac{\partial(2\pi/m)}{\partial(\Delta T)} < 0, \quad \frac{\partial(m/k)}{\partial(\Delta T)} > 0.$$

Для никеля хорошо видна немонотонная, имеющая максимум зависимость скорости волны (9) от ΔT (рис. 4, б).

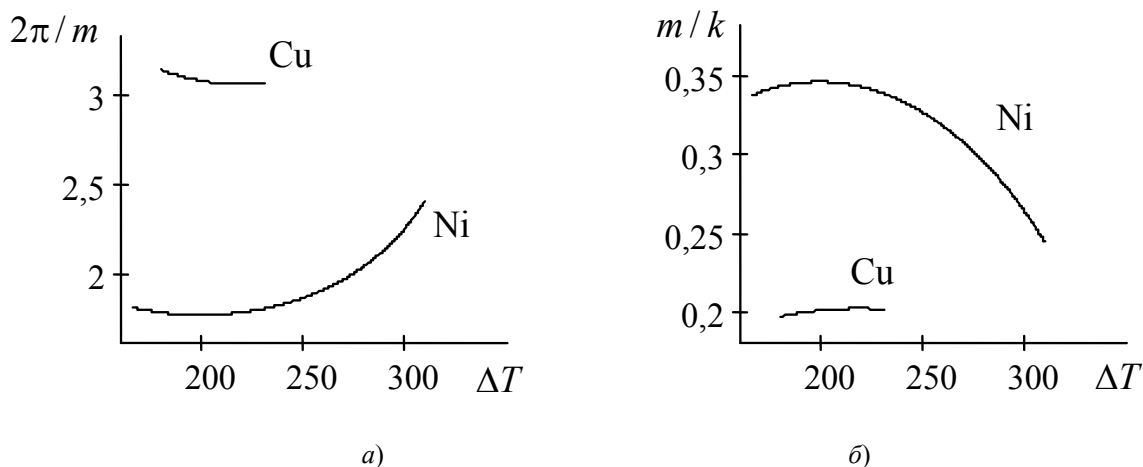


Рис. 4. Незатухающая стоячая волна возмущения:
а – период колебаний во времени; б – скорость волны

Стоячая волна, затухающая с течением времени, определяется решением уравнения (5):

$$f(y, t)/H = \exp(-rt) \cos ky \sin mt, \quad (10)$$

$$k^2 = H_1/H_0, \quad m^2 = H_2/H_0, \quad H_0 = \beta_3 - \beta_0\beta_2 + 2\beta_0r,$$

$$H_1 = 9\beta_2r^2 + \beta_1\beta_2 - r(3\beta_1 + 9r^2 + 2\beta_2^2),$$

$$H_2 = \beta_1\beta_3 + r[r(\beta_0\beta_2 + 3\beta_3) - 2\beta_0r^2 - 2\beta_2\beta_3].$$

При $r = 0$ данное решение принимает вид (8). Эти выражения имеют физический смысл ($k^2 > 0$, $m^2 > 0$), соответствующий периодическому решению, в малой правой конечной окрестности $r = 0$. Для представленной здесь серии расчетов в безразмерных величинах $0 \leq r \leq 0,44$ (рис. 5–7). Для никеля и меди периоды колебаний возмущения по координате y и по времени t ведут себя одинаково в качественном отношении:

$$\frac{\partial(2\pi/k)}{\partial(\Delta T)} > 0, \quad \frac{\partial(2\pi/m)}{\partial(\Delta T)} > 0.$$

Кроме того, по мере увеличения параметра затухания r оба эти периода колебаний монотонно растут (см. рис. 5; рис. 6, а, б; рис. 7, а, б). Так же, как в случае незатухающей волны (8), различия между никелем и медью наблюдаются в поведении скорости волны m/k при изменении ΔT (см. рис. 6, в; рис. 7, в). А именно: для никеля имеем $\partial(m/k)/\partial(\Delta T) < 0$, а для меди наоборот $\partial(m/k)/\partial(\Delta T) > 0$.

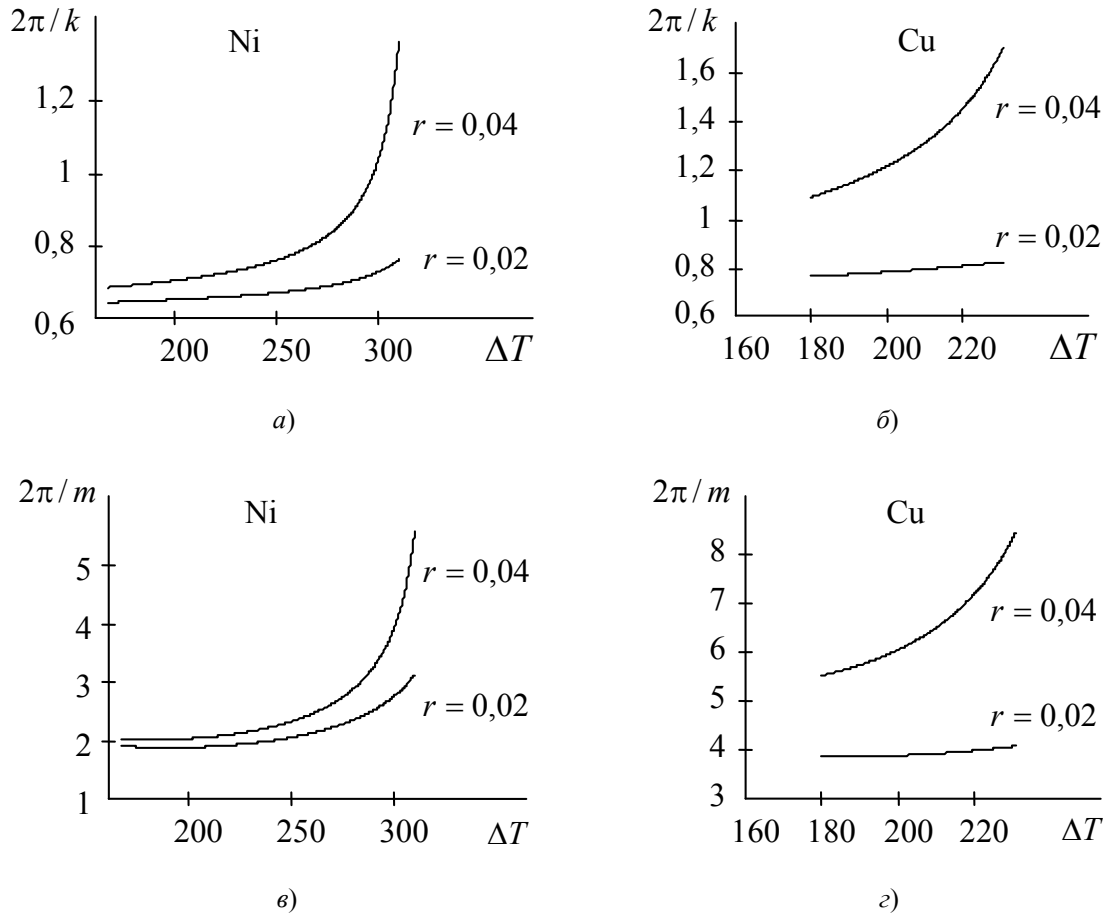


Рис. 5. Затухающая стоячая волна возмущения:
 а, б – период колебаний по координате у;
 в, г – период колебаний по времени

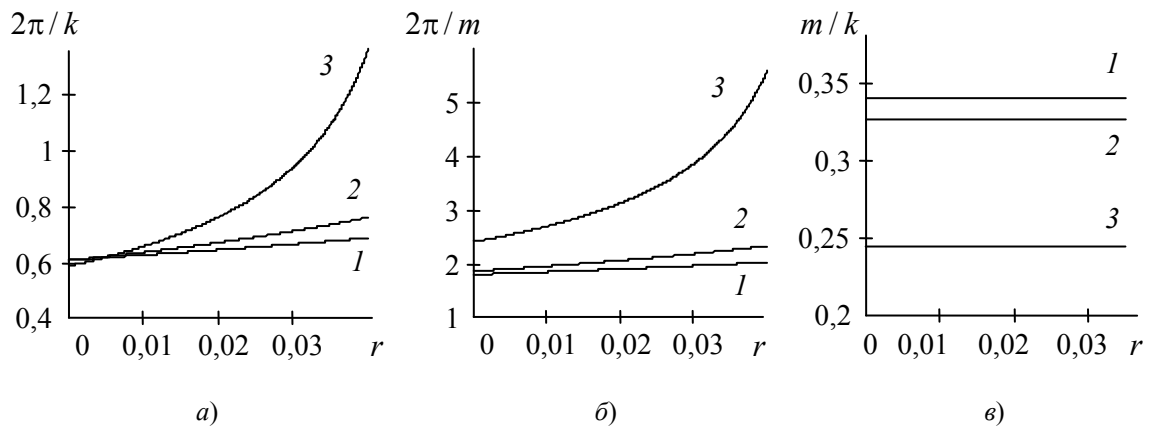


Рис. 6. Никель. Влияние параметра затухания на свойства стоячей волны возмущения. Номера линий соответствуют величинам ΔT : 1 – 170 К; 2 – 250 К; 3 – 310 К:
 а – период колебаний по координате; б – период колебаний по времени; в – скорость стоячей волны

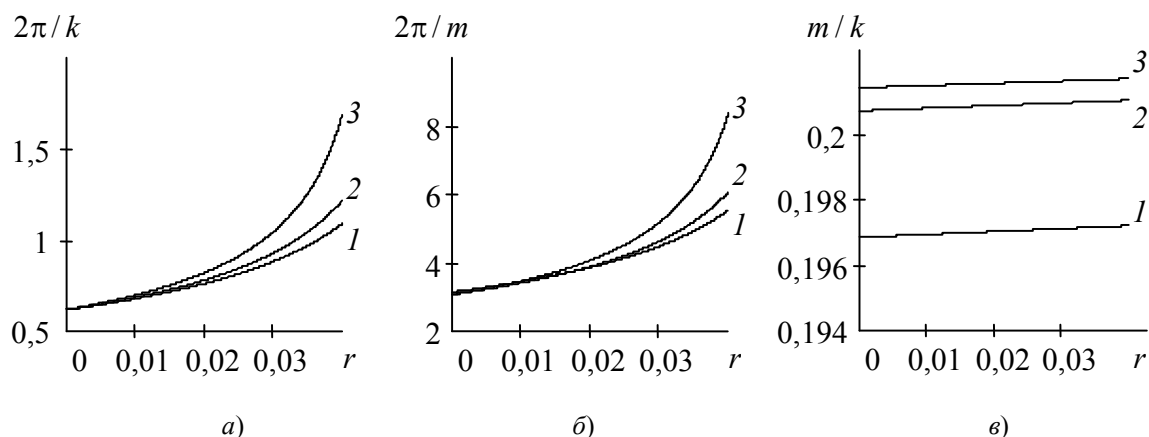


Рис. 7. Медь. Влияние параметра затухания на свойства стоячей волны возмущения. Номера линий соответствуют величинам ΔT : 1 – 180 К; 2 – 200 К; 3 – 230 К:
 а – период колебаний по координате; б – период колебаний по времени; в – скорость стоячей волны

Заключение

Выполнен сопоставительный анализ свойств возмущенной фазовой границы кристаллизации никеля и меди при глубоких переохлаждениях расплава. Для никеля $\Delta T, K \in [166, 312]$, для меди $\Delta T, K \in [180, 230]$. Получены свойства теплоотвода $q_v(\Delta T)$ от твердой фазы (4) и значения верхней границы кривизны K_f , обеспечивающей устойчивость апериодического возмущения (6). Стоячая волна возмущения рассмотрена в незатухающем (8) и затухающем (10) режимах. Изучено влияние изменения переохлаждения расплава на пространственно-временные свойства волны. Обнаружены важные в физическом отношении различия в поведении скорости стоячей волны для никеля и меди.

Литература

1. Herlach, D. M. Metastable Solids from Undercooled Melts / D. M. Herlach, P. Galenko, D. Holland-Moritz. – Oxford : Pergamon, 2007. – 448 p. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.539-543.1977>
2. Жоу, Д. Расширенная необратимая термодинамика / Д. Жоу, Х. Касас–Баскес, Дж. Лебон. – Москва ; Ижевск : Регуляр. и хаот. динамика, 2006. – 528 с.
3. Mullis, A. M. Deterministic side-branching during thermal dendritic growth / A. M. Mullis // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. – 2015. – Vol. 84. – P. 1–9. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/84/1/012071>
4. Glicksman, M. E. Capillary-mediated interface perturbations: Deterministic pattern formation / M. E. Glicksman // Journal of Crystal Growth. – 2016. – Vol. 450. – P. 119–139. – <https://doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2016.03.031>
5. Strickland, J. On Directional Dendritic Growth and Primary Spacing – A Review / J. Strickland, B. Nenchev // Crystals. – 2020. – N 10 (7). – P. 627–656. <https://doi.org/10.3390/cryst10070627>
6. Kurz, W. Progress in modeling solidification microstructures in metals and alloys. Part II: dendrites from 2001 to 2018 / W. Kurz, M. Rappaz, R. Trivedi // Int. Mater. Rev., 2020. – P. 1–47. <https://doi.org/10.1080/09506608.2020.1757894>

7. Шабловский, О. Н. Динамика неустойчивости волновых возмущений и боковое ветвление дендрита в переохлажденном расплаве / О. Н. Шабловский, Д. Г. Кроль // Успехи приклад. физики. – 2022. – Т. 10, № 2. – С. 189–202.
8. Research on Mesoscale Nucleation and Growth Processes in Solution Crystallization: A Review / X. Wang [et al.] // Crystals. – 2022. – Vol. 12. – P. 1234–1255. <https://doi.org/10.3390/cryst12091234>
9. Высокоскоростное затвердевание расплава: Теория, технология и материалы / В. А. Васильев [и др.] ; под науч. ред. Б. С. Митина. – М. : Интермет инжиниринг, 1998. – 394 с.
10. Шабловский, О. Н. Кинетика роста вершины дендрита в глубоко переохлажденном расплаве. Ч. 1. Уравнение фазовой границы кристаллизации / О. Н. Шабловский // Успехи приклад. физики. – 2013. – Т. 1, № 6. – С. 680–685.
11. Шабловский, О. Н. Кинетика роста вершины дендрита в глубоко переохлажденном расплаве. Ч. II. Аналитическая структура возмущений линии роста / О. Н. Шабловский // Успехи приклад. физики. – 2014. – Т. 2, № 1. – С. 12–17.
12. Шабловский, О. Н. Область устойчивости возмущенного состояния линии роста дендрита в глубоко переохлажденном расплаве / О. Н. Шабловский // Вестн. Гомел. гос. техн. ун-та им. П. О. Сухого. – 2023. – № 1. – С. 5–12.

References

1. Herlach D. M., Galenko P., Holland-Moritz D. *Metastable Solids from Undercooled Melts*. Oxford, Pergamon Publ., 2007. 448 p.
2. Zhou D., Kasas-Baskes H., Lebon Dzh. *Extended irreversible thermodynamics*. Moscow; Izhevsk, *Regulyarnaya i haoticheskaya dinamika* Publ., 2006. 528 p. (in Russian).
3. Mullis A. M. Deterministic side-branching during thermal dendritic growth. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 2015, vol. 84, pp. 1–9. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/84/1/012071>
4. Glicksman M. E. Capillary-mediated interface perturbations: Deterministic pattern formation. *Journal of Crystal Growth*, 2016, vol. 450, pp. 119–139. <https://doi.org/10.1016/j.jcrysgr.2016.03.031>
5. Strickland J., Nenchev B. On Directional Dendritic Growth and Primary Spacing – A Review. *Crystals*, 2020, no. 10 (7), pp. 627–656. <https://doi.org/10.3390/cryst10070627>
6. Kurz W., Rappaz M., Trivedi R. Progress in modeling solidification microstructures in metals and alloys. Part II: dendrites from 2001 to 2018. *Int. Mater. Rev.*, 2020, pp. 1–47. <https://doi.org/10.1080/09506608.2020.1757894>
7. Shablovskij O. N., Krol' D. G. Dynamics of instability of wave disturbances and lateral dendrite branching in a supercooled melt. *Uspekhi prikladnoi fiziki*, 2022, no. 2, pp. 189–202 (in Russian).
8. Wang X., Li K., Qin X., Li M., Liu Y., An Y., Gong J. Research on Mesoscale Nucleation and Growth Processes in Solution Crystallization: A Review. *Crystals*, 2022, vol. 12, pp. 1234–1255. <https://doi.org/10.3390/cryst12091234>
9. Vasil'ev V. A., Mitin B. S., Pashkov I. N., Serov M. M., Skuridin A. A., Lukin A. A., Yakovlev V. B. *High-speed melt solidification: Theory, technology and materials*. Moscow: Internet inzhiniring, 1998. 394 p. (in Russian).

10. Shablovskij O. N. Kinetics of dendrite tip growth in a deeply supercooled melt. Part I. Equation of the crystallization phase boundary. *Uspekhi prikladnoj fiziki*, 2013, vol. 1, no. 6, pp. 680–685 (in Russian).
11. Shablovskij O. N. Kinetics of dendrite tip growth in a deeply supercooled melt. Part II. Analytical structure of growth line disturbances. *Uspekhi prikladnoj fiziki*, 2014, vol. 2, no. 1, pp. 12–17 (in Russian).
12. Shablovskij O. N. Stability region of the perturbed state of the dendrite growth line in a deeply supercooled melt. *Vestnik Gomel'skogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta imeni P. O. Sukhogo*, 2023, no. 1, pp. 5–12 (in Russian).

Поступила 18.12.2023 г.

УДК 621.91.01

<https://doi.org/10.62595/1819-5245-2024-1-15-22>

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ СПОСОБА ПОДАЧИ СМАЗОЧНО-ОХЛАЖДАЮЩИХ ЖИДКОСТЕЙ НА КОНТАКТНЫЕ ПРОЦЕССЫ ПРИ СВЕРЛЕНИИ НЕРЖАВЕЮЩЕЙ СТАЛИ 12X18H10T

Э. Л. БЕКИРОВ, Э. Ш. ДЖЕМИЛОВ, Р. Ю. СЕЛЯМЕТОВ

Крымский инженерно-педагогический университет

имени Февзи Якубова, г. Симферополь, Российская Федерация

Рассмотрен процесс обработки глухих отверстий на операциях сверления при обработке нержавеющей стали 12X18H10T. В качестве режущего инструмента использовались спиральные сверла из быстрорежущей стали. Типичными проблемами этого процесса являются затрудненное удаление стружки и подача смазочно-охлаждающих жидкостей (СОЖ) в зону обработки. Также при удалении стружки по спиральным канавкам она трётся о поверхность отверстия, деформируется и, как следствие, качество поверхности ухудшается. Поэтому была проведена сравнительная оценка влияния различных СОЖ в зависимости от способа их подачи в условиях закрытого резания.

Ключевые слова: сверление, смазочно-охлаждающая жидкость, контактные давления, температура резания, шероховатость поверхности.

Для цитирования. Бекиров, Э. Л. Оценка влияния способа подачи смазочно-охлаждающих жидкостей на контактные процессы при сверлении нержавеющей стали 12X18H10T / Э. Л. Бекиров, Э. Ш. Джемилев, Р. Ю. Селяметов // Вестн. Гомел. гос. техн. ун-та им. П. О. Сухого. – 2024. – № 1 (96). – С. 15–22. <https://doi.org/10.62595/1819-5245-2024-1-15-22>

ASSESSMENT OF CUTTING FLUIDS SUPPLYING METHOD INFLUENCE ON CONTACT PROCESSES WHEN DRILLING STAINLESS STEEL 12X18H10T

E. L. BEKIROV, E. Sh. DZHEMILOV, R. U. SELYAMETOV

Crimean State Engineering Pedagogical University

named after Fevzi Yuakubov, Simferopol,

the Russian Federation

The authors have considered the process of blind holes processing during drilling operations when processing stainless steel 12X18H10T. Spiral drills made of high-speed steel were used as cutting tools. There are some typical problems in this process such as difficulty of removing chips and cutting fluids supply to the machining zone. One more problem is that while removing chips along spiral grooves, they rub against the surface of the hole and thus become deformed, which results in the deterioration of surface quality. Therefore, a comparative assessment of various coolants influence was carried out depending on the method of their supply under closed cutting conditions.

Keywords: drilling, cutting fluids, contact pressures, cutting temperatures, surface roughness.

For citation. Bekirov E. L., Dzhemilov E. Sh., Selyametov R. U. Assessment of cutting fluids supplying method influence on contact processes when drilling stainless steel 12X18H10T. *Vestnik Gomel'skogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta imeni P. O. Sukhogo*, 2024, no. 1 (96), pp. 15–22 (in Russian). <https://doi.org/10.62595/1819-5245-2024-1-15-22>

Введение

Большинство деталей машин, подвергающихся механической обработке, имеют отверстия. Наиболее распространенным методом получения отверстий в сплошном материале является сверление. Этот процесс широко изучен и не представляет

особых трудностей. Точность обработанных отверстий после сверления обычно находится в пределах 13–11 квалитетов, однако технологически можно повысить точность до 9-го квалитета. При обработке корпусных деталей сверление производится на завершающих этапах технологического процесса, поэтому соблюдение требований к качеству получаемых отверстий в детали имеет большое значение.

Сверление глухих отверстий в металлических сплавах часто проводят с подачей смазочно-охлаждающих жидкостей (СОЖ) в зону обработки. Постоянное удаление стружки и высокие удельные давления в зоне обработки не гарантируют попадания смазочных материалов на границу раздела инструмент–заготовка. Поэтому требуется подбор смазочных материалов с учетом условий протекания процесса резания, современных требований к экологизации производства и способов ее подачи непосредственно в зону стружкообразования.

На данном этапе развития производства наблюдается тенденция к снижению негативных факторов при изготовлении деталей машин, связанных с применением СОЖ на основе нефтепродуктов. Одним из направлений является полный отказ от применения технологических сред и переход к сухому резанию [1–3]. Однако этот метод не пригоден для ряда операций механической обработки и зачастую требует либо применения специального инструмента, либо перехода на высокоскоростную обработку [4–6].

Второй способ снижения негативного воздействия – использование технологии минимального количества смазки [7].

Несмотря на все преимущества MQL, эта технология плохо подходит для процессов, протекающих в условиях закрытого резания, например, сверления глухих отверстий. Постоянное удаление стружки затрудняет попадание небольших доз смазочных материалов в зону обработки.

Третий способ – переход на экологические составы смазок на основе непищевых масел растительного происхождения [8, 9]. Отмечена эффективность биоразлагаемых масел в процессах металлообработки по сравнению с минеральными маслами.

Для качественной оценки процесса сверления необходимо учитывать не только выходные параметры, такие как шероховатость поверхности и стойкость инструмента, но и динамически изменяющиеся показатели контактных давлений и температур.

Цель работы – изучение влияния способов подачи СОЖ на операциях сверления нержавеющей стали марки 12X18H10T на процессы, протекающие в зоне контакта инструмент–деталь.

Методика проведения экспериментальных исследований

Экспериментальные исследования проводились на радиально-сверлильном станке модели 2K522. В качестве инструмента использовались спиральные сверла с каналами для внутренней подачи СОЖ из быстрорежущей стали марки P6M5K5 и аналогичные по параметрам цельные сверла. Сверление проводилось в заготовках из нержавеющей стали марки 12X18H10T. Диаметр сверления составлял 12 мм. Для охлаждения зоны резания были выбраны минеральная водорастворимая СОЖ – Аквафриз-6, масляная СОЖ – MOBILMET 423 и подсолнечное масло. Подача жидкостей в зону резания по внутренним каналам инструмента осуществлялась с рабочим давлением 5 атмосфер. Подача СОЖ методом полива осуществлялась с расходом 12 л/мин.

Специально разработанная экспериментальная установка позволяла одновременно регистрировать показания контактных давлений и температуры вдоль обрабатываемой заготовки за один проход инструмента (рис. 1).

Температура резания измерялась при помощи искусственной термопары, спаи которой располагались напротив тензорезисторов латерально образующей цилиндрической заготовки. Спаи термопары были собраны в одну цепь и помещались в предвари-

тельно просверленные отверстия диаметром 0,5 мм на внешней стороне цилиндра с шагом 10 мм от торца заготовки. Технологические отверстия были подготовлены таким образом, что при обработке основного отверстия расстояние от стенки получаемой образующей до спаев термопары составляло 0,25 мм. Для оценки температурных параметров по всей длине образующей цилиндра при сверлении показания, регистрируемые на разных спаях термопары, переключались по мере углубления сверла. Скорость записи данных составляла 50 значений в секунду. Показания температуры выбирались по максимальным значениям, т. е. в момент упругопластической деформации срезаемого слоя припуска. Данный метод не позволяет дать качественную оценку температуры в зоне резания, однако дает возможность представить количественную оценку влияния различных технологических сред.

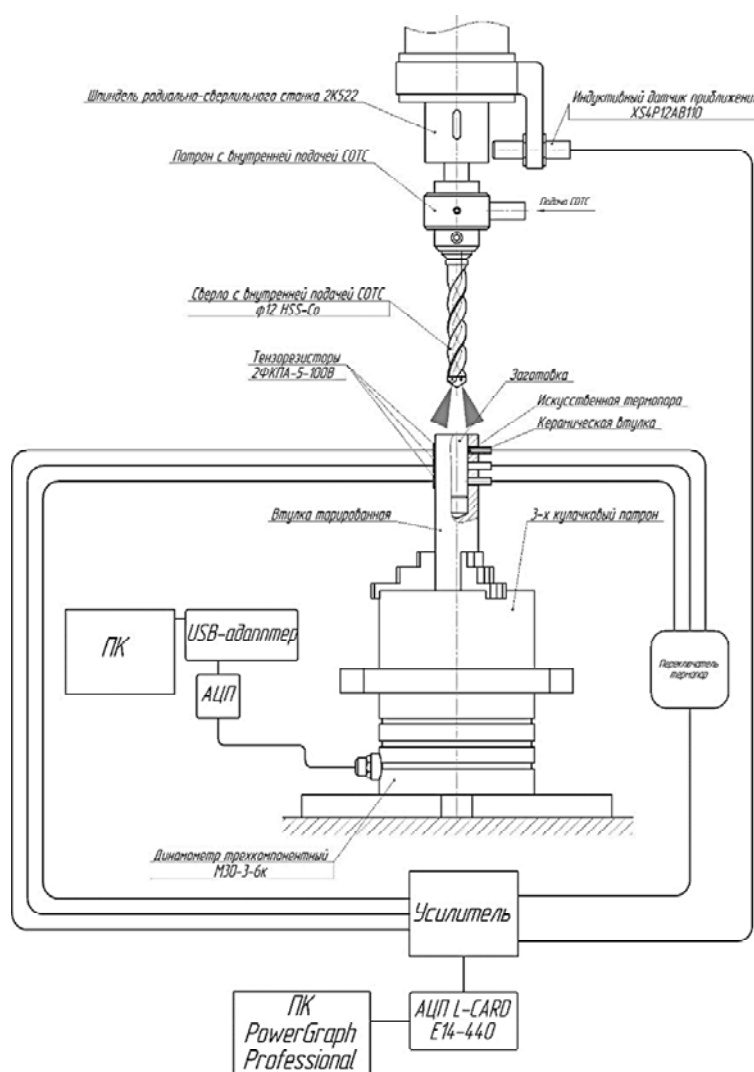


Рис. 1. Схема экспериментальной установки для регистрации контактных нагрузок и температуры резания

Режимы резания были выбраны по усредненным производственным значениям для обработки двух типов материалов на операциях сверления и составляли: скорость резания – 9,42 м/мин (315 об/мин), подача – 0,056 мм/об.

Значения получаемой шероховатости после сверления измерялись на профилометре модели TR-200.

Результаты экспериментальных исследований

Силовые характеристики процесса резания во многом определяют характер стружкообразования. Эффект влияния СОЖ, используемых в процессе механической обработки, можно оценить именно по силовым показателям процесса резания. Применение метода оценки силовых характеристик с помощью тензорезисторов позволяет оценивать динамически изменяющиеся показатели на деталях любой конфигурации. На рис. 2 приведены усредненные данные после шести измерений на трех тензорезисторах, расположенных по образующей детали.

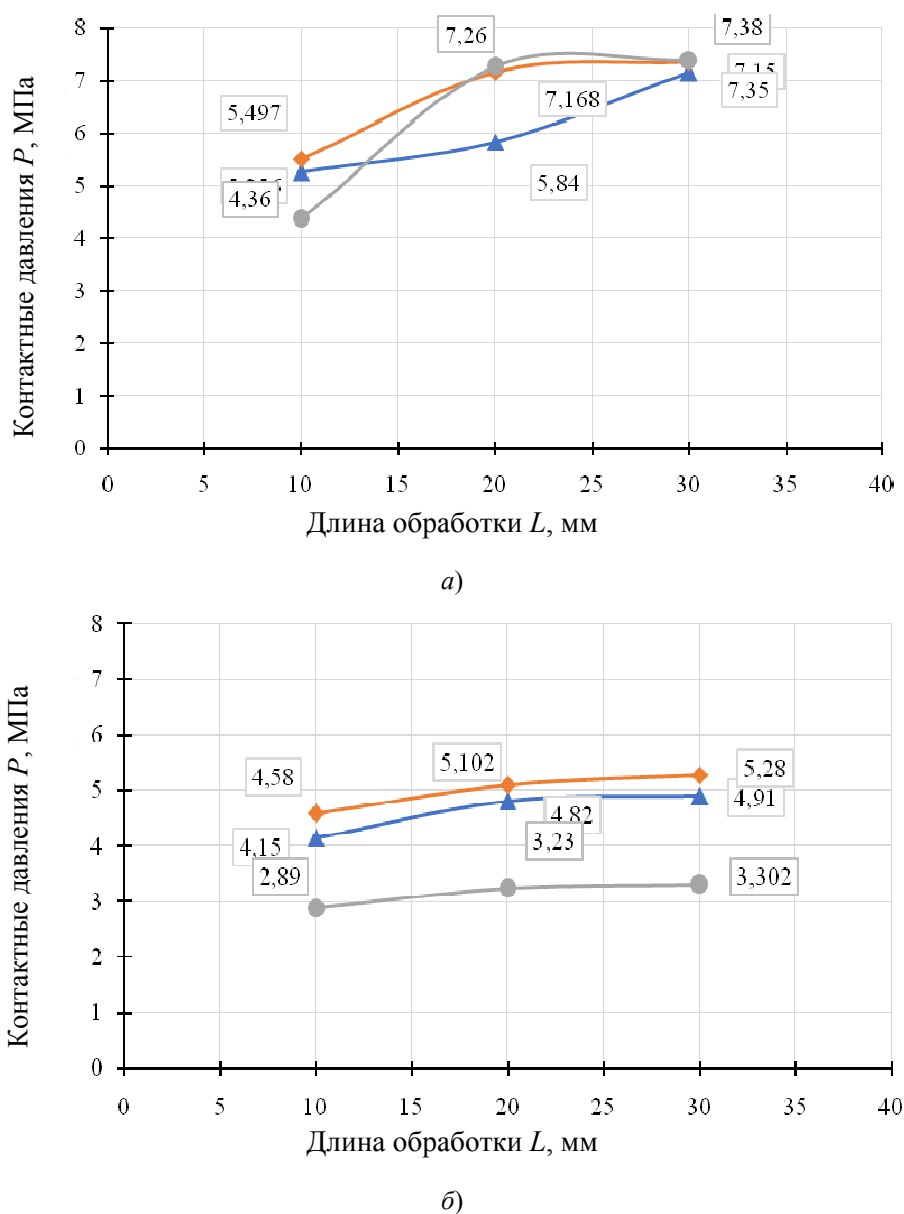


Рис. 2. Изменение контактных давлений по длине образующей заготовки при сверлении стали 12Х18Н10Т с подачей СОЖ:

a – методом полива; b – по внутренним каналам инструмента:

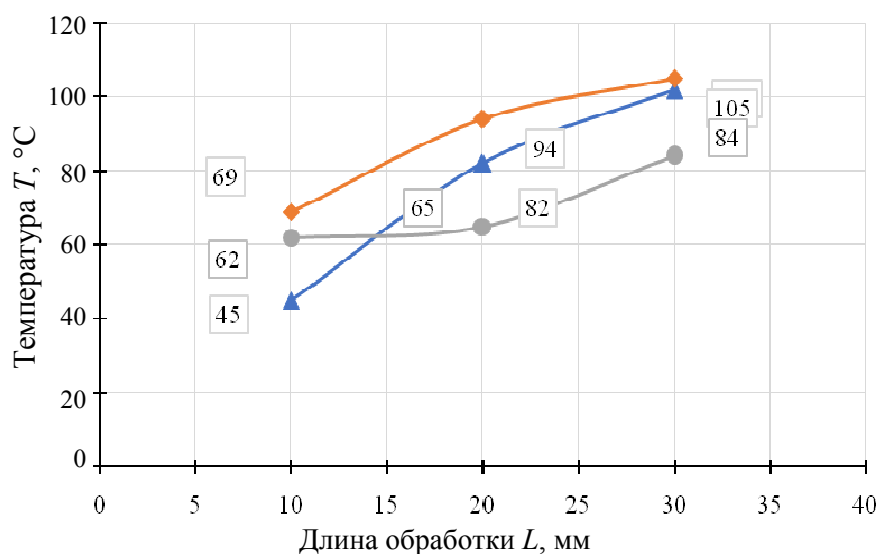
▲ – Аквафриз-6; ● – MOBILNET 423; ◆ – подсолнечное масло

Как видно из графиков, использование подсолнечного масла в качестве технологической среды, подаваемой по внутренним каналам инструмента, приводит к снижению значений контактного давления более чем на 60 % по сравнению с минеральной СОЖ и эмульсией.

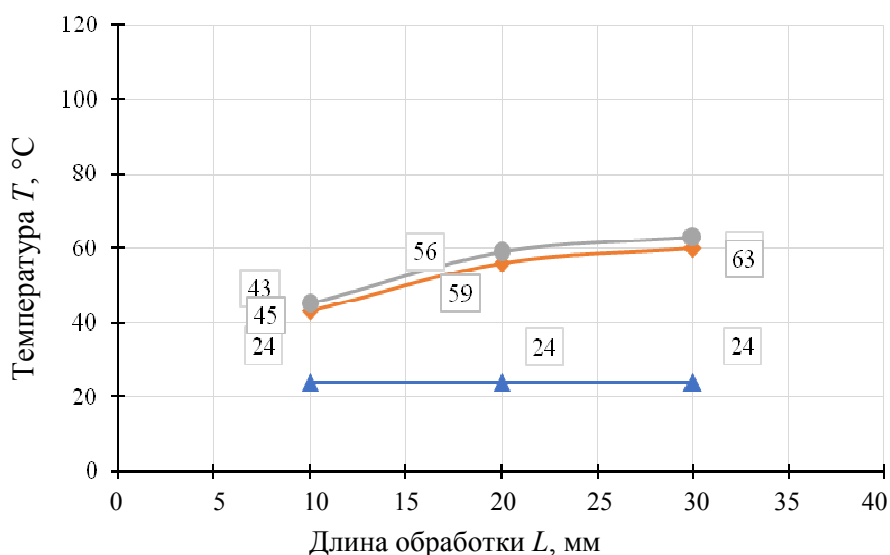
Уменьшение значений контактного давления свидетельствует об уменьшении результирующей силы резания вследствие изменения угла плоскости фактического сдвига стружки.

При использовании метода полива СОЖ из-за деструктуризации жирных кислот под воздействием высоких температур подсолнечное масло теряет смазывающее действие.

Еще одной характеристикой процесса резания, влияющей на срок службы инструмента, является температура в зоне контакта. По предложенному методу проведены измерения и построены графики, показывающие качественные характеристики применяемых смазочно-охлаждающих технологических сред при изменении температуры в зоне контакта. Представленные значения отражают усредненные значения данных после шести измерений (рис. 3).



а)



б)

Рис. 3. Изменение температуры резания по длине образующей заготовки при сверлении стали 12Х18Н10Т с подачей СОЖ:
 а – методом полива; б – по внутренним каналам инструмента:
 ▲ – Аквафриз-6; ● – MOBILNET 423; ◆ – подсолнечное масло

Как видно из графиков, наиболее выраженный эффект охлаждения рабочей зоны обусловлен использованием водосмешивающейся эмульсии. За счет высокого давления происходит активный отвод тепла из зоны резания. Применение масляных смазочно-охлаждающих технологических сред приводит к почти двукратному повышению температуры по сравнению с эмульсией.

Характер графиков указывает на то, что фактическая температура в зоне резания больше 250°C , что превышает температуру дымления масел. При такой температуре и высоких удельных давлениях происходит разрушение углеродных цепей.

Основной характеристикой процесса сверления является качество получаемого отверстия. Для оценки качества осуществлялся контроль шероховатости получаемой поверхности. Измерение профиля производили на трех участках с базовой длиной измерения 4 мм, после чего на гистограммах (рис. 4) были построены усредненные значения среднеарифметического отклонения профиля от средней линии R_a .

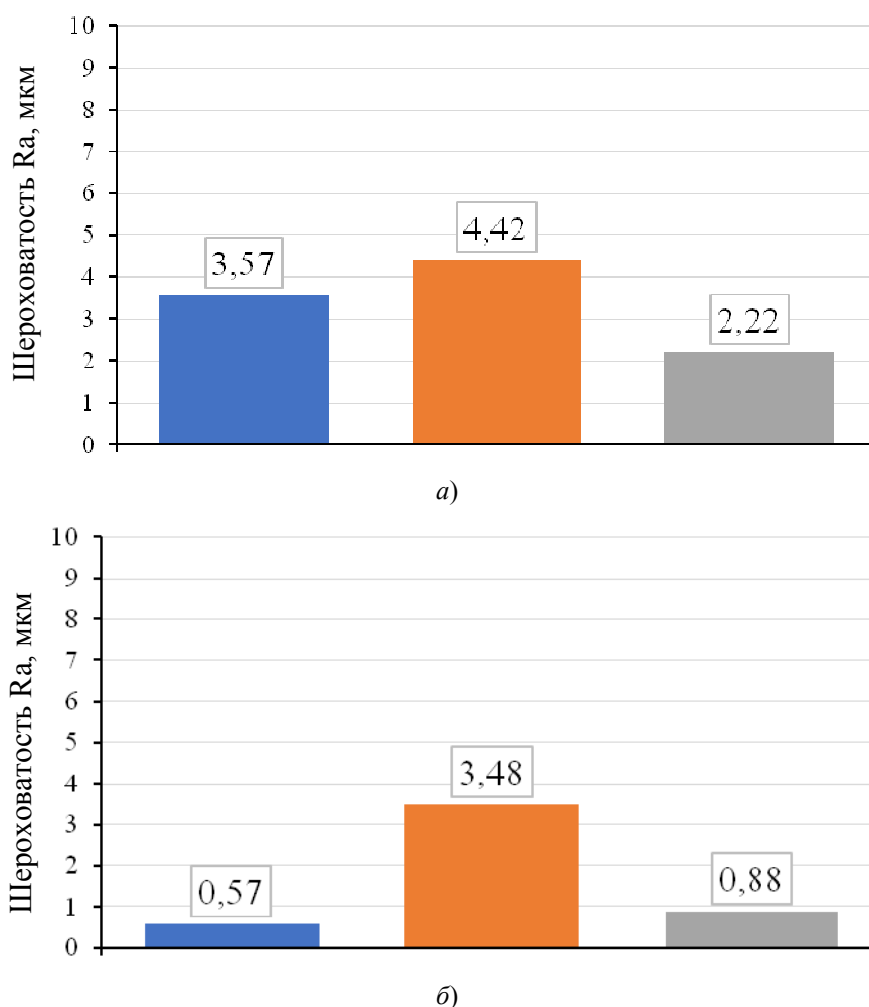


Рис. 4. Влияние СОЖ на шероховатость резания при сверлении нержавеющей стали:

a – методом полива; *b* – по внутренним каналам инструмента:
 ■ – Аквафриз-6; ■ – MOBILNET 423; ■ – подсолнечное масло

Из гистограмм видно, что наибольшие значения шероховатости поверхности зафиксированы после применения MOBILMET 423 на основе минерального масла независимо от метода подачи СОЖ. Использование водосмешиваемой эмульсии Аквафриз-6 за счет активного теплоотвода позволяет сохранить действие входящих

в состав поверхностно-активных веществ, снижающих коэффициент трения удаляемой стружки, и, как следствие, обеспечивает значительное снижение высоты микронеровностей профиля.

Значительное снижение показателя шероховатости при использовании подсолнечного масла можно объяснить наличием в составе масла полярных молекул жирных кислот (олеиновой, линоленовой и др.). Полярные молекулы благодаря своему упорядоченному расположению создают на поверхности инструмента и заготовки пленку, способствующую уменьшению трения.

Подсолнечное масло также содержит около 38 % мононенасыщенных жирных кислот олеиновой кислоты, которая является поверхностно-активным веществом. Из-за высоких значений хемосорбции полярных молекул зона упругопластического контакта смещается в сторону режущей кромки за счет эффекта Ребиндера. В результате происходит уменьшение зоны пластического контакта и изменение характера образования наростов. Это приводит к изменению геометрии переднего угла инструмента. Увеличение значения переднего угла изменяет положение фактической плоскости среза стружки. Все эти факторы способствуют облегчению процесса стружкообразования и, как следствие, снижению значения шероховатости.

Заключение

Процесс сверления глухих отверстий в нержавеющей сталях имеет ряд особенностей, обуславливающих необходимость правильного выбора применяемой смазочно-охлаждающей технологической среды для получения необходимого качества поверхности и увеличения стойкости инструмента. На основании полученных данных можно сделать вывод, что для снижения температуры в зоне резания более рационально использовать водорастворимые эмульсии. Однако высокие значения контактных давлений будут приводить к интенсивному износу инструмента и последующему ухудшению качества поверхности.

Подбор СОЖ должен осуществляться на основе всех параметров процесса обработки. В зависимости от назначаемого вида СОЖ необходимо вносить корректировки в технологический процесс таким образом, чтобы применяемые режимы обработки не способствовали потере ряда свойств технологических жидкостей.

Литература

1. Москвичев, А. А. Тенденции экологически безвредного «сухого резания» металлов / А. А. Москвичев, А. Р. Кварталов // Тр. НГТУ им. Р. Е. Алексеева. – 2015. – № 3 (110). – С. 110–116.
2. Кириллов, А. К. Применение системы экологически безопасного сухого резания при обработке конструкционных материалов / А. К. Кириллов // Справочник. Инженер. журн. – 2013. – № 1. – С. 15–20.
3. Прогрессивные технологии машиностроительных производств / С. Н. Григорьев [и др.] // Отд. ст. Гор. информац.-аналит. бюл. (науч.-техн. журн.). – 2011. – № 12. – С. 3–6.
4. Производительная обработка нержавеющей и жаропрочных сплавов / Н. И. Резников [и др.]. – М. : Машгиз, 1960. – 199 с.
5. Бобров, В. Ф. Особенности образования суставчатой и элементной стружек при высокой скорости резания / В. Ф. Бобров, А. И. Сидельников // Вестн. машиностроения. – 1976. – № 7. – С. 61–66.

6. Шелег, В. К. Технологическое обеспечение параметров точности и качества сложнопрофильных деталей при высокоскоростной многокоординатной обработке / В. К. Шелег, А. Ф. Присевок, П. Н. Клавсутъ / Наука и техника. – 2009. – № 5. – С. 22–31.
7. Митрофанов, А. П. Исследование технологии микродозированной подачи смазочных композиций с наночастицами при шлифовании жаропрочного никелевого сплава с дополнительным воздушным охлаждением / А. П. Митрофанов, В. А. Носенко // Обработка металлов: технология, оборудование, инструменты. – 2019. – № 4 (21). – С. 6–18.
8. Аметов, И. Э. Эволюция применения растительных масел в качестве смазочно-охлаждающих технологических средств при обработке металлов резанием / И. Э. Аметов, А. И. Алиев, Р. М. Джемалядинов // Ученые зап. крым. инженер.-пед. ун-та им. Ф. Якубова. – 2022. – № 4 (78). – С. 219–219.
9. Матвиевский, Р. М. Повышение экологической чистоты смазочных масел / Р. М. Матвиевский // Трение и износ. – 1994. – Т 15, № 5. – С. 843–848.

References

1. Moskvichev A. A. Trends in environmentally friendly “dry cutting” of metals. *Trudy NGTU im. R.E. Alekseeva*, 2015, no. 3 (110), pp. 110–116 (in Russian).
2. Kirillov A. K. Application of an environmentally friendly dry cutting system in the processing of structural materials. *Directory. Engineering magazine*, 2013, no. 1, pp. 15–20 (in Russian).
3. Grigoriev S. N. Progressive technologies of mechanical engineering production. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten' (nauchno-tekhnicheskii zhurnal)*, 2011, no. 12, 106 p. (in Russian).
4. Reznikov N. I., Reznikov I. G., Zharkov V. M. *Productive processing of stainless and heat-resistant alloys*. Moscow, Mashgiz Publ., 1960. 199 p. (in Russian).
5. Bobrov V. F., Sidelnikov A. I. Features of the formation of jointed and elemental chips at high cutting speeds. *Vestnik mashinostroeniya*, 1976, no. 7, pp. 61–66 (in Russian).
6. Sheleg V. K. Prisevok A. F., Klavsut P. N. Technological support for accuracy and quality parameters of complex-profile parts during high-speed multi-axis machining. *Nauka i tekhnika = Nauka i tehnika*, 2009, no. 5, pp. 22–31 (in Russian).
7. Mitrofanov A. P., Nosenko V. A. Study of the technology of micro-dosed supply of lubricating compositions with nanoparticles when grinding a heat-resistant nickel alloy with additional air cooling. *Obrabotka metallov: tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty*, 2019, no. 4 (21), pp. 6–18 (in Russian).
8. Ametov I. E., Aliev A. I., Dzhemalyadinov R. M. The evolution of the use of vegetable oils as lubricating and cooling technological agents in metal cutting. *Uchenye zapiski Krymskogo inzhenerno-pedagogicheskogo universiteta im. F. Yakubova*, 2022, no. 4 (78), pp. 219–219 (in Russian).
9. Matvievsky R. M. Increasing the environmental purity of lubricating oils. *Trenie i iznos = Friction and wear*, 1994, vol. 15, no. 5, pp. 843–848 (in Russian).

Поступила 12.12.2023 г.

УДК 621.923

<https://doi.org/10.62595/1819-5245-2024-1-23-28>

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ СМАЗОЧНО-ОХЛАЖДАЮЩИХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СРЕДСТВ НА КОНТАКТНЫЕ ПРОЦЕССЫ ПРИ ТОРЦЕВОМ ФРЕЗЕРОВАНИИ

**Р. С. СЕЙДАЛИЕВ, Р. Д. КУРМАНОВ, А. А. ФУКАЛА,
Э. Ш. ДЖЕМИЛОВ**

*Крымский инженерно-педагогический университет
имени Февзи Якубова, г. Симферополь,
Российская Федерация*

Представлена методика для комплексного исследования операции сверления с использованием датчиков высокой точности и быстродействия для получения информации, адекватной протекающему процессу, которая позволяет за один проход инструмента снимать показания нескольких параметров с использованием различных смазочно-охлаждающих технологических средств.

Ключевые слова: торцевое фрезерование, смазывающе-охлаждающие технологические средства, контактные нагрузки, техника минимальной смазки.

Для цитирования. Экспериментальные исследования влияния смазочно-охлаждающих технологических средств на контактные процессы при торцевом фрезеровании / Р. С. Сейдалиев [и др.] // Вестн. Гомел. гос. техн. ун-та им. П. О. Сухого. – 2024. – № 1 (96). – С. 23–28. <https://doi.org/10.62595/1819-5245-2024-1-23-28>

EXPERIMENTAL RESEARCH ON CUTTING FLUIDS AND TECHNOLOGICAL MEANS INFLUENCE ON CONTACT PROCESSES DURING FACE MILLING

**R. S. SEIDALIEV, R. D. KURMANOV, A. A. FUKALA,
E. Sh. DZHEMILOV**

*Crimean State Engineering Pedagogical University
named after Fevzi Yuakubov, Simferopol,
the Russian Federation*

Authors present a methodology for a comprehensive study of the drilling operation using high-precision and high-speed sensors to obtain information adequate to the ongoing process. This information allows to take readings of several parameters using cutting fluids and technological means during one pass of the tool.

Keywords: face milling, cutting fluids and technological means, contact load, minimal lubrication technique.

For citation. Seidaliev R. S., Kurmanov R. D., Fukala A. A., Dzhemilov E. Sh. Experimental research on cutting fluids and technological means influence on contact processes during face milling. *Vestnik Gorn'kogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta imeni P. O. Sukhogo*, 2024, no. 1 (96), pp. 23–28 (in Russian). <https://doi.org/10.62595/1819-5245-2024-1-23-28>

Введение

Параметры качества, формируемые при механической обработке деталей, обеспечивают эксплуатационные требования, предъявляемые к изделиям, выпускаемым машиностроительными предприятиями. Разработка эффективных способов механи-

ческой обработки с требуемым качеством невозможна без научного подхода и проведения экспериментальных исследований.

Процесс торцевого фрезерования является одним из самых распространенных видов механической обработки, который сопровождается большим съемом припуска поверхности материала при сложном комплексе контактного взаимодействия инструмента с обрабатываемой деталью.

При изучении имеющихся математических моделей было определено, что они не учитывают влияния на процесс образования поверхностей большинства технологических факторов.

При обработке резанием актуальным направлением является разработка способов, адекватно отражающих процесс контактного взаимодействия инструмента с обрабатываемой поверхностью детали.

Правильный выбор оборудования, инструмента, а также режимов резания и условий обработки является основополагающим в области металлообработки деталей.

Имеется ряд опубликованных работ, посвященных исследованию процесса фрезерования поверхностей [1–3].

Е. Г. Бердичевский в своих трудах представил результаты исследования влияния смазочно-охлаждающих технологических средств (СОТС) на процесс контактного взаимодействия инструмента с обрабатываемой деталью [4].

Проведенный анализ определил цель исследований, направленных на стабилизацию контактных нагрузок при торцевом фрезеровании за счет применения различных СОТС.

Определение контактных нагрузок

С учетом анализа существующих измерительных установок и методики исследования механики взаимодействия инструмента с деталью [5], для процесса торцевого фрезерования поверхностей была предложена схема измерения контактных нагрузок с использованием тензорезисторов (рис. 1).

Для получения объективных данных и снижения погрешностей измерения разработанная схема максимально приближена к процессу резания.

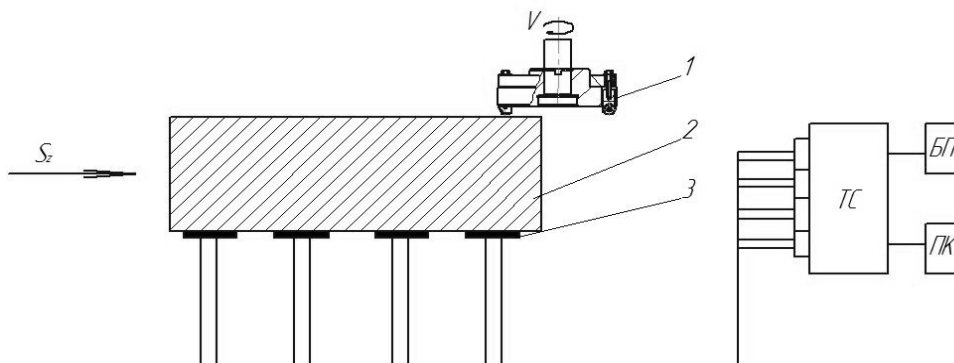


Рис. 1. Схема измерения контактных нагрузок:
1 – фреза торцевая; 2 – деталь; 3 – тензорезисторы

По предлагаемой схеме измерения была изготовлена экспериментальная установка, позволяющая определять контактные нагрузки на поверхности режущего инструмента при ее взаимодействии с деталью (рис. 2).

Эксперименты выполнялись на вертикально-фрезерном станке мод. 6P11 с использованием фрезы торцевой насадной $\varnothing 100$ мм, оснащенной твердосплавными пластинами T15K5.



Рис. 2. Экспериментальная установка для определения контактных нагрузок

В качестве обрабатываемого материала была использована сталь 45 (НВ229) по ГОСТ 1050–88 (табл. 1).

Таблица 1

Химический состав стали 45, %

C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	Cu	As	Fe
0,42–0,5	0,17–0,37	0,5–0,8	До 0,25	До 0,04	До 0,035	До 0,25	До 0,25	До 0,08	≈ 97

Режимы резания соответствовали производственным: частота вращения шпинделя – 400 об/мин, подача шпинделя – 0,35 мм/об.

Обработка проводилась без СОТС, с маслом Shell, которое используется на предприятиях и в среде рапсового масла.

Рапсовое масло обладает повышенной смазочной способностью и имеет в своем составе поверхностно-активные вещества (до 70–80%), которые определяют глубину их проникновения в контактный зазор и зоны предразрушения на атомарно-дислокационном уровне [6, 7].

Определение контактных нагрузок при взаимодействии режущей пластины с обрабатываемой поверхностью проводилось следующим образом: сигнал, выдаваемый каждым из четырех тензорезисторов, в зависимости от приложенной нагрузки, поступал на тензостанцию ТС-8 и одновременно записывался.

По полученным значениям (табл. 2) построены эпюры распределения контактных нагрузок на поверхности режущей пластины торцевой фрезы (рис. 3).

Таблица 2

Значения контактных нагрузок

Обрабатываемый материал	Припуск t , мм	Длина образующей L , мм	Распределенная нагрузка p , Н		
			Без СОТС	В среде масла Shell	В среде рапсового масла
Сталь 45	1	15	0	92,9297652	328,000463
		25	681,7423659	524,760153	388,137973
		35	237,5670133	267,213098	275,771559
		45	378,4259467	392,866757	348,551770

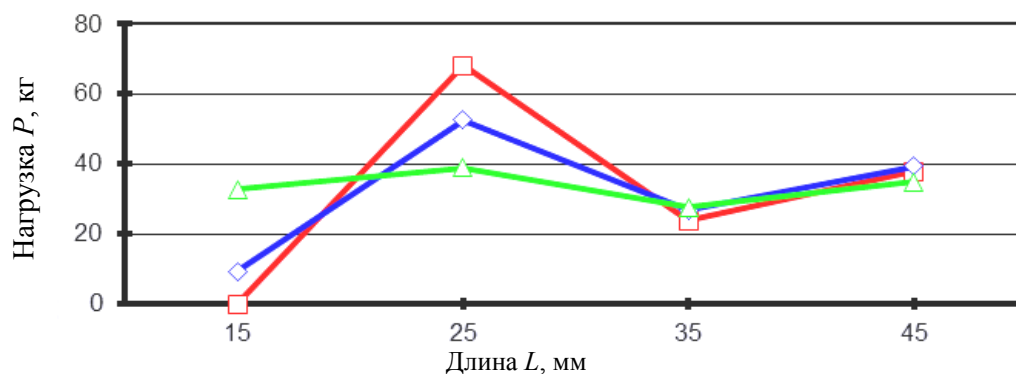


Рис. 3. Эпюры распределения контактных нагрузок при торцевом фрезеровании:
 — без СОТС; — в масле Shell; — в масле рапсового

Подача СОТС в зону резания осуществлялась с помощью устройства техники минимальной смазки (ТМС) Nogaminicool (рис. 4).

Конструкция ТМС Nogaminicool представляет собой распылитель с возможностью дозировать расход СОТС и количество воздуха, растворенного в СОТС [8, 9].

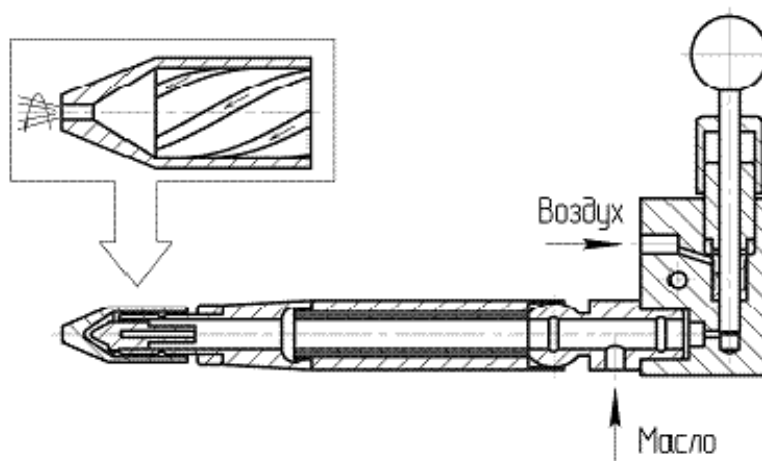


Рис. 4. Устройство минимизированной подачи СОТС Nogaminicool

Специальным приспособлением является устройство подачи СОТС минимизированным методом (распылением). Сущность способа обработки резанием с использованием минимально возможного и достаточного для достижения эффекта количества СОТС состоит в том, что в зону резания подается его столько, что оно полностью, без остатка, расходуется [8]. Этот принцип и заложен в основу конструирования новых систем для осуществления подачи СОТС в зону обработки ТМС.

Методика минимизации характеризуется рядом функциональных особенностей. Так, по типу механизма подготовки воздушно-масляной смеси существующие установки по ТМС подразделяются на системы высокого и низкого давления, в свою очередь, отличающиеся непрерывной и порционной (пульсирующей) подачами СОТС в зону обработки. В рамках данной работы применялась система с непрерывной подачей СОТС (рис. 5).

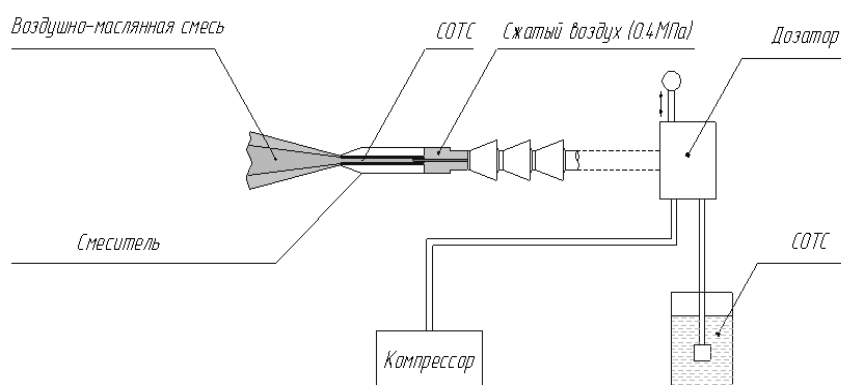


Рис. 5. Принцип работы устройства ТМС

Смешивание смазывающей среды со сжатым воздухом может осуществляться как в специальном резервуаре предварительно, так и непосредственно в распылительных дюзах, роль которых в развитии ТМС также существенна и важна.

В данном устройстве ТМС смешивание смазывающей среды со сжатым воздухом происходит непосредственно в распылительном дюзе.

Сжатый воздух в систему ТМС подавался под давлением 0,4 МПа, что соответствует стандартному давлению на предприятиях.

Регулировка напора и расхода воздушно-масляной смеси осуществлялась с помощью ручки дозатора. Угол распыления, а также дополнительный расход регулируются с помощью дозатора, расположенного непосредственно на распылительном дюзе. Для удобства закрепления устройства ТМС предусмотрен постоянный магнит, расположенный у основания [9].

Эпюры показывают, что использование масла Shell в сравнении с резанием без СОТС позволило стабилизировать контактные нагрузки на длине обработки в 1,47 раза, а рапсовое масло – в 6,24 раза.

Заключение

Эффективность применения рапсового масла в качестве СОТС, действие которого стабилизирует контактные нагрузки на длине обработки при торцевом фрезеровании, безусловно связано с изменениями процесса упругопластических деформаций, протекающих в зоне резания, из-за снижения коэффициента трения. Использование техники минимальной смазки в качестве приспособления для подачи СОТС, способствует повышению их смазывающих свойств за счет глубокого проникновения в зону резания.

Литература

1. Крагельский, И. В. Основы расчетов на трение и износ / И. В. Крагельский, М. Н. Добычин, В. С. Комбалов. – М. : Машиностроение, 1977. – 526 с.
2. Латышев, В. Н. Повышение эффективности СОЖ / В. Н. Латышев. – М. : Машиностроение, 1975. – 88 с.
3. Маталин, А. А. Качество поверхности и эксплуатационные свойства деталей машин / А. А. Маталин. – М. : Машгиз, 1956. – 225 с.
4. Бердичевский, Е. Г. Смазочно-охлаждающие средства для обработки материалов : справочник / Е. Г. Бердичевский. – М. : Машиностроение, 1984. – 224 с.

5. Джемилев, Э. Ш. Повышение качества обработки конических отверстий алмазным хонингованием на основе исследования контактно-го взаимодействия инструмента с деталью : дис. ... канд. техн. наук : 05.03.01 / Э. Ш. Джемилев. – Симферополь, 2010. – 162 с.
6. Алиев, А. И. Повышение работоспособности сложнопрофильного режущего инструмента за счет применения технологических сред растительного происхождения : дис. ... канд. техн. наук : 05.03.01 / А. И. Алиев. – Симферополь, 2011. – 139 с.
7. Якубов, Ч. Ф. Упрочняющее действие СОТС при обработке металлов резанием / Ч. Ф. Якубов. – Симферополь : Симфероп. гор. тип., 2008. – 156 с.
8. Якубов, Ф. Я. Экспериментальная оценка эффективности смазывающих технологических сред в периоде приработки металлорежущего инструмента / Ф. Я. Якубов, Ч. Ф. Якубов, В. В. Скакун // Изв. Тул. гос. ун-та. Техн. науки. – 2016. – № 8 (1). – С. 246–253.
9. Скакун, В. В. Экспериментальная оценка влияния экологически чистых СОТС на тепловые процессы при обработке отверстий осевым лезвийным инструментом / В. В. Скакун, Р. М. Джемалидинов // Ученые зап. Крым. инженер.-пед. ун-та. – 2019. – № 4 (66). – С. 333–337.

References

1. Kragel'skii I. V., Dobychin M. N., Kombalov V. S. *Fundamentals of calculations for friction and wear*. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1977. 526 p. (in Russian).
2. Latyshev V. N. *Increasing the efficiency of cutting fluid*. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1975. 88 p. (in Russian).
3. Matalin A. A. *Surface quality and operational properties of machine parts*. Moscow, Mashgiz Publ., 1956. 225 p. (in Russian).
4. Berdichevskii E. G. *Cooling lubricants for materials processing: reference book*. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1984. 224 p. (in Russian).
5. Dzhemilov E. Sh. *Improving the quality of machining tapered holes by diamond honing based on the study of the contact interaction of the tool with the part*. Ph. D. thesis. Simferopol', 2010. 162 p. (in Russian).
6. Aliev A. I. *Increasing the performance of complex-profile cutting tools through the use of technological media of plant origin*. Ph. D. thesis. Simferopol', 2011. 139 p. (in Russian).
7. Yakubov Ch. F. *The hardening effect of cutting fluids when processing metals by cutting*. Simferopol', Simferopol City Printing House, 2008. 156 p. (in Russian).
8. Yakubov F. Ya., Yakubov Ch. F., Skakun V. V. Experimental assessment of the effectiveness of lubricating technological media during the period of running-in of metal-cutting tools. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki*, 2016, no. 8 (1), pp. 246–253 (in Russian).
9. Skakun V. V., Dzhemalyadinov R. M. Experimental assessment of the influence of environmentally friendly LCPM on thermal processes when processing holes with an axial blade tool. *Uchenye zapiski Krymskogo inzhenerno-pedagogicheskogo universiteta*, 2019, no. 4 (66), pp. 333–337 (in Russian).

Поступила 12.12.2023 г.

УДК 629.44:629.488.027.5

<https://doi.org/10.62595/1819-5245-2024-1-29-40>

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ РЕМОНТА И ИЗГОТОВЛЕНИЯ СОЕДИНЕНИЙ С НАТЯГОМ ЭЛЕМЕНТОВ КОЛЕСНЫХ ПАР ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ПОДВИЖНОГО СОСТАВА

Р. И. ЧЕРНИН

Учреждение образования «Белорусский государственный университет транспорта», г. Гомель

А. В. ПУТЯТО, И. Л. КОЦУР

Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», Республика Беларусь

Приведены основные направления повышения эксплуатационной надежности соединений с натягом элементов колесных пар железнодорожного подвижного состава, в частности соединений «ось – ступица колеса», «ось – внутренние кольца буксовых подшипников», «колесный центр – бандаж». Предложен ряд технических и технологических решений, направленных на совершенствование технологии ремонта и контроля соединений с натягом, обеспечивающих, наряду со снижением себестоимости ремонтных работ, повышение безопасности движения поездов.

Ключевые слова: колесная пара, соединение с натягом, сборка, разборка, прочность, контроль, ремонт.

Для цитирования. Чернин, Р. И. Совершенствование технологий ремонта и изготовления соединений с натягом элементов колесных пар железнодорожного подвижного состава / Р. И. Чернин, А. В. Путято, И. Л. Коцур // Вестн. Гомел. гос. техн. ун-та им. П. О. Сухого. – 2024. – № 1 (96). – С. 29–40. <https://doi.org/10.62595/1819-5245-2024-1-29-40>

IMPROVEMENT OF TECHNOLOGIES FOR REPAIR WORK AND PRODUCTION OF TENSION JOINTS FOR WHEEL PAIR ELEMENTS OF RAILWAY ROLLING STOCK

R. I. CHERNIN

Belarusian state university of transport, Gomel

A. V. PUTSIATA, I. L. KOTSUR

*Sukhoi State Technical University of Gomel,
the Republic of Belarus*

In this article the main directions for increasing the operational reliability of tension joints for wheel pair elements of railway rolling stock have been given. Particular attention has been paid to such joints as “axis – wheel hub”, “axis – inner rings of axis bearings”, “wheel center – tire”. A number of technical and technological solutions have been proposed aimed at improving the technology for repair work and control of tension joints. These solutions ensure the cost reduction of repair work, as well as the increase in the safety of train traffic.

Keywords: wheel pair, tension joints, assembly, disassembly, strength (durability), control, repair work.

For citation. Chernin R. I., Putsiata A. V., Kotsur I. L. Improvement of technologies for repair work and production of tension joints for wheel pair elements of railway rolling stock. *Vestnik Gomel'skogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta imeni P. O. Sukhogo*, 2024, no. 1 (96), pp. 29–40 (in Russian). <https://doi.org/10.62595/1819-5245-2024-1-29-40>

Введение

Значение железнодорожного транспорта, связывающего в единое целое области и районы страны, обеспечивающего потребности населения в перевозках, обороте продуктов промышленности и сельского хозяйства, а также обороне государства, было и остается первостепенным. Его целью, как сферы материального производства, является бесперебойное обеспечение перемещения грузов и пассажиров, которое в свою очередь зависит от многих аспектов. Одним из них является поддержание подвижного состава в исправном техническом состоянии, что во многом определяется качеством исходной конструкции, а также выполнением его ремонта (текущего и планового). Как показывает практика эксплуатации железнодорожного подвижного состава, к наиболее ответственным узлам, требующим повышения эксплуатационной надежности, относятся колесные пары, на долю которых выпадает до 40 % всех отцепок в текущий ремонт [1].

Повышение эксплуатационной надежности рассматриваемого узла возможно по следующим направлениям: совершенствование технологий ремонта ходовых частей, совершенствование методов и средств контроля, разработка и внедрение новых технических и технологических решений.

Рассматриваемому вопросу посвящено большое количество научных работ и инженерных разработок, в особенности в последние годы. На сегодняшний день достаточно высокая доля парка вагонов стран с шириной колеи 1520 мм (в особенности Российской Федерации и Республики Беларусь) оборудована подшипниками кассетного типа, что является одним из вариантов решения вопроса повышения надежности и снижения экономических затрат (надежность буксового узла повышается в 5–6 раз, что позволяет получить безотказную работу в течение 8 лет эксплуатации, или 800 тыс. км пробега). Однако, как было отмечено железнодорожными операторами и производителями роликовых подшипников, это вызывает большую зависимость от импорта [2], и, как показало время, эти опасения обоснованы [3]. Для демонтажа внутренних колец и лабиринтных уплотнений в условиях вагонных депо применяется установка УДВКП-1, которая обеспечивает механическую распрессовку соединений с гарантированным натягом. Для контроля величины натяга в сопряжении известны приборы ПС-219.1 и УДС1-СИН. Вопросы совершенствования акустических методов контроля прессовых соединений колец подшипников с шейками осей колесных пар отражены в работе [4].

Следует отметить, что использование натяга в колесных парах подвижного состава характерно не только для узлов «ось – колесо» и «ось – внутренние кольца подшипников». Такое соединение применяется в составных колесах тягового подвижного состава при формировании соединения «колесный центр – бандаж» [5]. Совершенствование конструкций колес составного типа в настоящее время направлено на увеличение прочности соединения с натягом и упрощение сборки-разборки соединения [6–8], но предполагает наличие дополнительных крепежных элементов при соединении бандажа и колесного центра, что существенно увеличивает время и затраты в рамках соответствующего технологического процесса.

В современных экономических условиях, наряду с обеспечением эксплуатационной готовности подвижного состава, следует всемерно добиваться оптимизации затрат, снижения расходов на их техническую эксплуатацию и ремонт. Экономический эффект от ресурсосбережения при использовании современных технических разработок может быть весьма ощутим и далеко не исчерпан. Необходимо на стадии изготовления и сборки ответственных узлов подвижного состава исключить ряд факторов, обуславливающих снижение их технического ресурса и выход из строя.

Прошедшие качественный ремонт и механосборочные операции ответственные узлы подвижного состава являются выгодной альтернативой приобретению новых, при этом гарантируется оптимальное соотношение «стоимость – жизненный цикл

вагона». Значительный экономический эффект от повышения надежности сборочных единиц вагонов подтверждается на примере роликовых буксовых узлов колесных пар при их качественной сборке и нормальных условиях эксплуатации. Вместе с тем недостатки применяемых в производстве технологии формирования-расформирования и технической диагностики соединений с гарантированным натягом колец подшипников на шейках осей колесных пар во многих случаях обуславливают преждевременный (до установленной наработки по пробегу) выход из строя буксовых узлов вагонов. Затраты на обеспечение их функционирования и осуществление установленных нормативной документацией ремонтов зависят от качества получаемых при сборке тепловых поперечно-прессовых соединений колец подшипников.

Таким образом, целью настоящей работы является разработка технических и технологических решений для повышения эксплуатационной надежности соединений с натягом колесных пар железнодорожного подвижного состава, позволяющих снизить расходы на их эксплуатацию.

Совершенствование технологии ремонта

По первому направлению разработано и запатентовано устройство для распрессовки оси колесной пары вагона [9] (рис. 1) к существующим прессам, которая позволит снизить потребное усилие запрессовки, а также защитит поверхность подступичной части оси от задиров и исключит возможность изгиба оси от внецентренного приложения силы и тем самым сберечь оси для дальнейшего использования (гарантийный срок эксплуатации вагонной оси составляет 8,5 лет [10]).

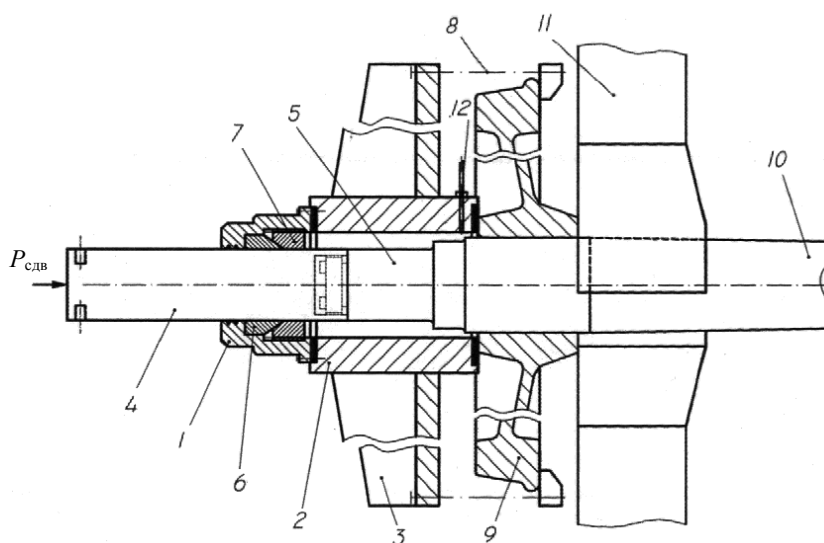


Рис. 1. Принципиальная схема устройства для распрессовки оси колесной пары вагона:

- 1 – распрессовочная головка; 2 – гильза высокого давления; 3 – прижимная траверса; 4 – цилиндрический шток; 5 – шейка оси колесной пары;
- 6 – уплотнительная втулка; 7 – нажимная гайка уплотнения; 8 – прижимные болты; 9 – ступица колеса; 10 – ось колесной пары; 11 – стойка пресса; 12 – штуцер

Устройство работает следующим образом: демонтируемая колесная пара устанавливается при помощи электротельфера на стойку 11 по геометрической продольной оси применяемого пресса (например, П 6738). Распрессовочная головка 1 в подвешенном состоянии на электротельфере размещается соосно, и ее шток 4 в крайнем его положении на выходе из гильзы высокого давления 2, снабженной прижимной траверсой 3, скрепляется соосно на резьбе с шейкой 5 оси колесной пары 10. Распрессовочную головку 1 перемещают по своему цилиндрическому штоку 4 до упора через

изолирующую прокладку в ступицу колеса 9. Прижимают на изолирующей прокладке к ступице колеса 9 при помощи прижимных болтов 8 с захватами за обод колеса гильзу высокого давления 2 для герметизации внутренней ее полости, а затем нагнетают в эту полость рабочую жидкость через штуцер 12 для создания расклинивающей масляной прослойки в зоне сопряжения ступицы колеса 9 и подступичной части оси колесной пары 10. После образования масляной прослойки по всей длине сопряжения прикладывают аксиальную сдвигающую силу $P_{сдв}$ от гидроцилиндра пресса при его воздействии на свободный торец штока 4 при упоре внутреннего торца ступицы колеса 9 в стойку 11. Осуществляется гидрораспрессовка оси с торцевой подачей масла в зону контакта сопряженных с гарантированным натягом деталей 9, 10. После прекращения подачи масла в гильзу 2 и гидроцилиндр пресса устройство для распрессовки вместе со снятым с оси 10 колесом удаляют с пресса при помощи электротельфера. Отворачивают прижимные болты 8, освобождают распрессованное колесо.

Значительный объем работ и время связаны с тепловой посадкой внутренних колец буксовых подшипников на шейки осей колесных пар вагонов, но применение гидропрессовой технологии позволит снизить временные затраты, а также себестоимость их выполнения. Так, на основе разработанной конструкции [11] спроектирован, рассчитан и изготовлен действующий образец устройства для демонтажа внутренних колец буксовых подшипников с шеек осей колесных пар (рис. 2). Демонтаж выполняется при подаче рабочей жидкости через канал при помощи ручного гидравлического насоса высокого давления НРГ-7010 во внутреннюю изолированную полость. После создания расклинивающей масляной прослойки в зоне контакта колец с шейкой оси вращением силового винта осуществляют аксиальное перемещение демонтируемых двух колец подшипников с шейки оси на поршень-шток.

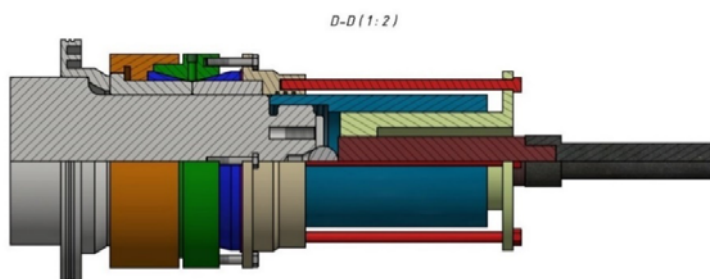


Рис. 2. 3D-модель устройства

Экспериментальное использование образца (рис. 3) позволило выявить ряд задач для дальнейшего совершенствования конструкции устройства, и на этой основе разработана и запатентована конструкция [12] (рис. 4).



Рис. 3. Общий вид устройства для распрессовки внутренних колец буксовых подшипников

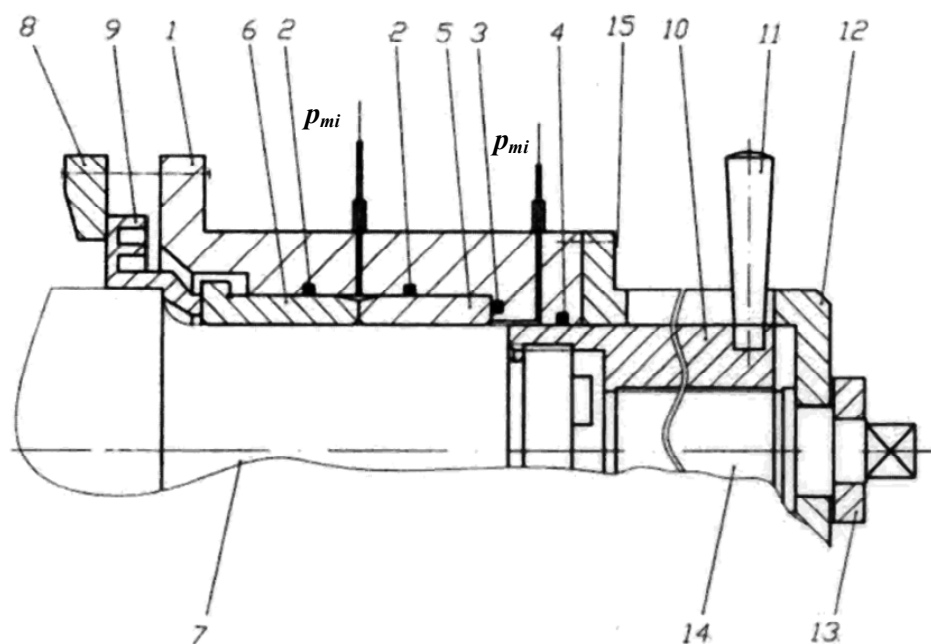


Рис. 4. Принципиальная схема устройства для распрессовки колец буксовых подшипников и кольца лабиринтного уплотнения буксы колесной пары:
 1 – основной корпус; 2–4 – кольцевые уплотнения; 5, 6 – передний и задний подшипники; 7 – шейка оси колесной пары; 8 – резьбовые элементы (захваты);
 9 – лабиринтные уплотнения корпуса буксы; 10 – шток; 11 – рукоятки;
 12 – вспомогательный корпус рабочего гидроцилиндра; 13 – гайка;
 14 – силовой винт; 15 – винты

Устройство работает следующим образом: перед разборкой соединений наворачивают на шейку оси 7 шток 10 при помощи рукояток 11. Надвигают основной корпус 1 на напрессованные кольца 5 и 6 переднего и заднего подшипников. Скрепляют соосно основной корпус гидроцилиндра 1 при помощи захватов 8 с кольцом лабиринтного уплотнения корпуса буксы 9. Нагнетают рабочую жидкость под высоким давлением во внутренние полости основного корпуса 1, изолированные от внешней среды кольцевыми уплотнениями 2–4, и вращением силового винта 14 механической части устройства осуществляют аксиальное перемещение с шейки оси 7 на наружную поверхность (меньшего диаметра) штока 10 напрессованных деталей 5, 6, 9 буксового узла. Отключают подачу масла под давлением, отворачивают при помощи рукояток 11 шток 10, снимают устройство и вынимают распрессованные кольца лабиринтного уплотнения 9, заднего 6 и переднего 5 подшипников буксы роликовой колесной пары.

Использование данного устройства позволяет осуществлять одновременную механическую распрессовку кольца лабиринтного уплотнения корпуса буксы, гидравлическую распрессовку кольца заднего буксового подшипника с односторонней торцевой подачей масла в зону сопряжения, гидропрессовую распрессовку кольца переднего буксового подшипника с односторонней или с двухсторонней (по необходимости) подачей масла в зону сопряжения с одной установки на шейку оси роликовой колесной пары.

Экономический эффект в данном случае достигается в результате:

- снижения расхода электроэнергии, так как нет необходимости использования индукционных нагревателей большой мощности;
- экономии за счет снижения времени необходимого на ремонт колесной пары, так как отпадает необходимость остывания внутренних колец буксовых подшипни-

ков до температуры производственного помещения при неудачной попытке демон- тажа перед его повторением;

– защиты шеек осей колесных пар вагонов от повреждений при распрессовке, что исключает необходимость дополнительной механической обработки при ремон- те и изъятия осей колесных пар из эксплуатации из-за полученных повреждений (ресурсосбережение).

Контроль прочности посадок с гарантированным натягом элементов колесных пар вагонов

Контроль прочности посадки с гарантированным натягом является очень важ- ным и непростым вопросом при ремонте. Так, если при механической запрессовке цельнокатанных колес на подступичные части вагонных осей, помимо косвенного метода контроля (определение величины натяга по замерам диаметров сопрягаемых поверхностей), дополнительно используется диаграмма «давление – путь», которая хранится после запрессовки в течении всего срока службы колесной пары, но не бо- лее 21 года, то при теплой посадке внутренних колец подшипников на шейки осей в соответствии с руководящим документом [12] используются только замеры сопря- гаемых поверхностей до сборки (также для величины натяга существует прибор ПС-219, однако в требованиях действующих инструкций он не упоминается).

Для контроля прочности разработан метод [13] и проведена его эксперименталь- ная апробация в условиях вагонного депо [14]. В результате проведенного контроля напрессовок получен массив данных, позволяющий установить зависимость для опре- деления натяга при новом формировании, заключающийся в дополнительном измере- нии наружного диаметра внутреннего кольца перед напрессовкой его на шейку оси. Разработанная конечно-элементная модель позволила верифицировать результаты.

Дальнейшая работа в этом направлении позволила разработать метод контроля с применением гидропрессовой технологи для контроля ранее сформированного соединения, в котором не выявлено браковочных признаков (рис. 5) [15].

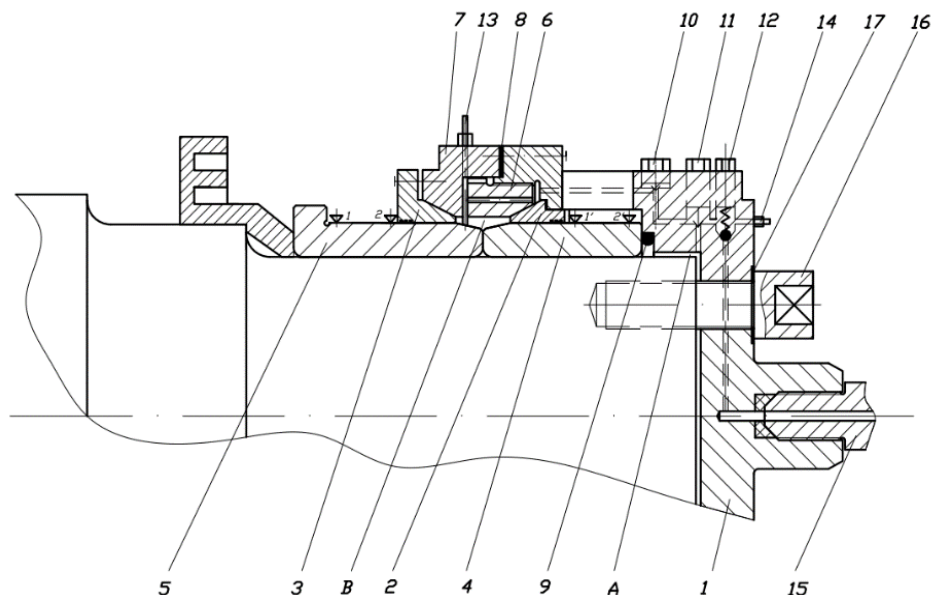


Рис. 5. Принципиальная схема устройства для контроля напрессовки колец буксовых подшипников:

- 1 – корпус; 2, 3 – кольцевые уплотнения; 4, 5 – передний и задний подшипники;
6 – нажимная гайка; 7 – крышка; 8 – уплотнительная прокладка; 9 – кольцевое уплотнение; 10, 11 – клапаны; 12 – обратный клапан; 13, 14 – штуцеры;
15 – ручной насос высокого давления; 16 – болты; 17 – уплотнительные прокладки

Методика оценки прочности сопряжения кольца подшипника с шейкой оси при использовании гидрораспора в зоне сопряжения предусматривает:

– определение относительных координат сечения $\varepsilon_0 = l_z / l_0$ жидкой смазки (относительное проникновение рабочей жидкости вглубь сопряжения) в контролируемом соединении с полной длиной сопряжения l_0 деталей с натягом на удалении l_z от места ввода (с торца сопряжения) гидросреды и величины давления p_{mi} нагнетания рабочей жидкости (по манометру);

– расчет гидродинамического давления p_{mz} в зазоре в масляном расклинивающем слое на упомянутом удалении l_z с использованием данных проводимых замеров деформаций на поверхности напрессованной детали при воздействии на ее внутреннюю поверхность давления проникающей вглубь сопряжения рабочей жидкости.

Расчетная формула получена согласно решению Ляме–Гадолина из зависимости для определения перемещений на поверхности цилиндрической охватывающей детали соединения под воздействием внутреннего давления в толстостенном цилиндре при отношении $m_k = d_2 / d_1$ (путем замеров устанавливают среднюю величину Δd_2 увеличения наружного диаметра d_2 охватывающей детали при гидрораспоре в сопряжении диаметром d при помощи средств измерения, применяемых в депо и на заводах при изготовлении и ремонте колесных пар):

$$p_{mz} = \frac{\Delta d_2 (m_k^2 - 1) E}{2 d_2};$$

– определение создаваемого контактного давления p_k в контролируемом соединении при установленных величинах давления в масляном слое p_{mz} на удалении l_z от входа в сопряжение и давления p_{mi} нагнетания рабочей жидкости с торца напрессовки. Численные результаты находятся по установленной автором аналитической зависимости

$$p_k = \frac{1}{1 - \sqrt[4]{1 - \varepsilon_0}} \left[p_{mz} - p_{mi} \sqrt[4]{1 - \varepsilon_0} \right].$$

При гидрораспоре необходимо обеспечить на элементарной длине посадки dl в любом поперечном сечении сопряжения на расстоянии l_z от входного торца условие $p_z > q_k$, где $q_k = p_k + p_u$. Дополнительное давление гидросреды p_u , затрачиваемое на изменение радиуса R_2 внутренней поверхности охватывающей детали на величину u_2 , одновременно вызывает некоторое уменьшение радиуса p_u поверхности контакта охватываемой детали на величину u_1 . В зоне контакта образуется масляная прослойка толщиной $u_2 + u_1$. По мере удаления от входа масла в зону контакта сопряженных с натягом деталей их относительные деформации в соединении непрерывно уменьшаются. Для внутреннего кольца подшипника радиальное перемещение на поверхности радиусом $r = d/2$, где d – диаметр сопряжения, определяются по зависимости Ляме–Гадолина для толстостенных цилиндров. Соответственно, при известном изменении радиуса u наружной поверхности кольца подшипника величина контактного давления в сопряжении: $p_k = uE((d_2/d_1)^2 - 1)/d_2$, а в толстостенном

составном цилиндре на его наружной поверхности возникают под воздействием внутреннего давления растягивающие нормальные напряжения (замеряемые на поверхности тензометрической втулки усредненные напряжения $\sigma_{\text{пл}}$ от посадки), которые используются для оценки контактного давления в соединении.

В использовании для замеров упругих радиальных деформаций напрессованных на шейку колец подшипников при их напряженно-деформированном состоянии от воздействия давления подводимой в зону сопряжения гидросреды индикаторов часового типа (или других измерительных приборов) следует учитывать изменения этих деформаций в плоскостях различных поперечных сечений вдоль длины посадки кольца подшипника при раздельном контроле каждого из колец. Результаты проводимых при испытаниях замеров деформаций удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными [16] при торцовом нагнетании жидкой смазки в сопряжение.

На данном этапе происходит оптимизация конструкции устройства для получения наиболее рациональной компоновки для использования в условиях вагоноремонтных предприятий.

Применение метода [13] возможно и для дополнительного контроля напрессовки цельнокатаных колес на оси колесных пар [17] (рис. 6).

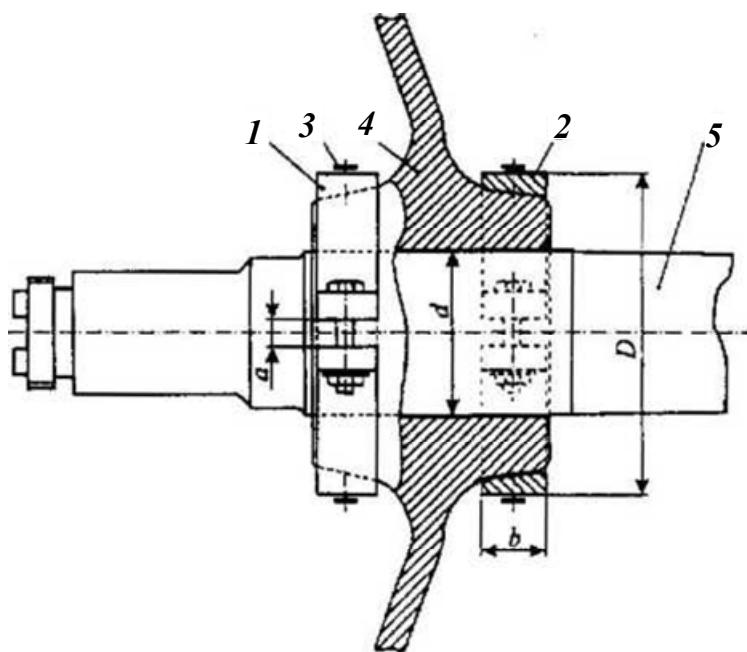


Рис. 6. Принципиальная схема устройства для контроля колеса на ось колесной пары:

1 – наружное клеммовое соединение с одноболтовой схемой затяжки; 2 – внутреннее клеммовое соединение с двухболтовой затяжкой; 3 – тензорезисторы, соединенные в мостовую схему; 4 – ступица колеса; 5 – ось колесной пары

Совершенствование конструкции колес железнодорожного подвижного состава

При разработке новой конструкции колеса составного типа решалась задача исключения возможности смещения бандажа относительно колесного центра в поперечном направлении (вдоль оси колесной пары), а также стопорного кольца как дополнительного конструктивного элемента, предусмотренного в конструкции [5]. Технический результат достигается за счет того, что предусматривается конструк-

тивное изменение узла сопряжения с гарантированным натягом колесного центра и бандажа при выполнении клиновидной формы поверхностей сопряжения. Дополнительных конструктивных элементов в узле не предусматривается. Указанная клиновидная форма сопряжения колесного центра и бандажа имеет размер a , который представляет собой высоту клина. Для возможности осуществления тепловой напрессовки размер a должен быть равным величине температурной деформации в радиальном направлении при нагреве бандажа колеса до температуры $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ с учетом требуемой величины натяга равной $1,10\text{--}1,45\text{ мм}$. На рис. 7 показан поперечный разрез предлагаемой конструкции колеса составного типа рельсового транспорта.

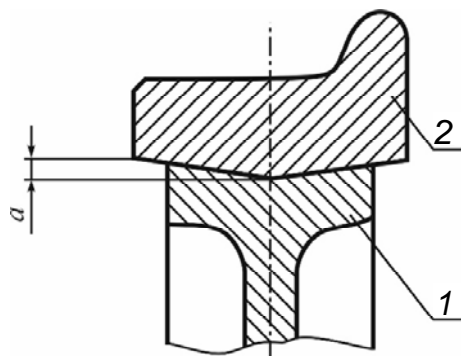


Рис. 7. Предлагаемая конструкция колеса:
1 – колесный центр; 2 – бандаж

Прочность узла сопряжения колеса составного типа достигается:

- в осевом направлении (вдоль оси колесной пары) за счет выполнения клиновидной формы сопрягаемых поверхностей, а также наличия натяга в соединении в результате реализации соединения тепловым методом;

- в окружном направлении за счет наличия натяга в соединении в результате реализации соединения тепловым методом. Дополнительных крепежных элементов для узла сопряжения колесного центра с бандажом не требуется. Предлагаемая конструкция колеса составного типа защищена патентом [18].

Для оценки прочности соединения с натягом новой конструкции составного колеса выполнено компьютерное моделирование методом конечных элементов в программном комплексе ANSYS. Комплекс проведенных численных расчетов при варьировании значениями коэффициента трения и натяга в соединении показал, что повышение прочности соединения с натягом бандажа и колесного центра при реализации предлагаемого технического решения может достигать 18% .

Заключение

Таким образом, предложены устройства, позволяющие улучшить существующую технологию ремонта колесных пар железнодорожного подвижного состава, а также снизить расходы при ее реализации.

Разработаны методы и устройства неразрушающего контроля тепловой посадки внутренних колец буксовых подшипников на шейки осей колесных пар вагонов с помощью гидрораспора, а для дополнительного контроля напрессовки цельнокатаного колеса на подступичную часть оси.

Приведено описание новой конструкции колеса составного типа для железнодорожного подвижного состава, позволяющей увеличить прочность в соединении колесного центра и бандажа до 18% .

Литература

1. Павлов, В. Вагоностроители себя не сдерживают / В. Павлов. – Режим доступа: <https://www.gudok.ru/newspaper/?ID=1469889&archive=2019.07.11>. – Дата доступа: 25.02.2024.
2. Скорлыгина, Н. Подшипники докатились до правительства / Н. Скорлыгина. – Режим доступа: <https://www.kommersant.ru/doc/4097231>. – Дата доступа: 25.02.2024.
3. Потаева, К. В России нарастает дефицит подшипников для инновационных вагонов / К. Потаева. – Режим доступа: <https://www.vedomosti.ru/business/articles/2022/08/31/938372-narastaet-defitsit-podshipnikov>. – Дата доступа: 25.02.2024.
4. Рыжова, А. О. Акустические методы контроля прессовых соединений колец подшипников с шейками осей колесных пар : дис. ... канд. техн. наук : 02.02.08 / А. О. Рыжова. – Новосибирск, 2022. – 145 с.
5. Нотик, З. Х. Тепловозы ЧМЭЗ, ЧМЭЗТ, ЧМЭЗЭ. Пособие машинисту / З. Х. Нотик. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Транспорт, 1996. – 444 с.
6. Колесная пара для локомотивов : пат. № 2551862 Рос. Федерации : МПК В60В 4/04, В60В 17/00 / Сливинский Е. В., Гусев А. В. – № 2014110439/11 ; заявл. 18.03.2014 ; опубл. 27.05.2015 / Федер. служба по интелект. собственности. – Бюл. № 2.
7. Соединение с натягом бандажа с колесным центром : пат. № 2504698 Рос. Федерации : МПК F16В 4/00 / Бородин А. В., Ярышева Л. В. – № 2012119535/12 ; заявл. 11.05.2012 ; опубл. 20.01.2014 / Федер. служба по интелект. собственности. – Бюл. № 15.
8. Соединение бандажа с колесным центром : пат. № 184604 Рос. Федерации : МПК В60В 17/00 / Рауба А. А., Дюндин В. В. – № 2018126406/10 ; заявл. 17.07.2018 ; опубл. 31.10.2018 / Федер. служба по интелект. собственности. – Бюл. № 31.
9. Устройство для распрессовки оси колесной пары вагона : пат. № 22509 Респ. Беларусь : МПК В23Р 19/02 / Чернин И. Л., Чернин Р. И., Сенько В. И., Сенько Н. Г. ; заявитель Белорус. гос. ун-т трансп. – № а 20170296 ; заявл. 07.08.2017 ; опубл. 30.04.2019 // Афіц. бюл. / Нац. цэнтр інтэлект. уласнасці. – 2019. – № 2 (127). – С. 124.
10. Оси колесных пар железнодорожного подвижного состава. Общие технические условия : ГОСТ 33200–2014. – Введ. 01.11.2015. – М. : Стандартинформ, 2015. – 41 с.
11. Устройство для распрессовки колец буксовых подшипников колесной пары : пат. № 13904 Респ. Беларусь : МПК В23Р 19/02 / Сенько В. И., Чернин И. Л., Чернин Р. И. ; заявитель Белорус. гос. ун-т трансп. – № а 20080460 ; заявл. 10.04.2008 ; опубл. 30.12.2010 // Афіц. бюл. / Нац. цэнтр інтэлект. уласнасці. – 2010. – № 6 (77). – С. 81.
12. Руководящий документ по ремонту и техническому обслуживанию колесных пар с буксовыми узлами грузовых вагонов магистральных железных дорог колеи 1520 (1524 мм). – М., 2012. – 276 с.
13. Способ неразрушающего контроля прочности напрессовки колец подшипников на шейке оси колесной пары : пат. № 2329478 Рос. Федерации : МПК G01L 1/22 / Сенько В. И., Чернин И. Л., Чернин Р. И., Сенько Н. Г. ; заявитель Белорус. гос. ун-т. трансп. – № 2006134798/28 ; заявл. 02.10.2006 ; опубл. 20.07.2008 / Федер. служба по интелект. собственности. – Бюл. № 20.

14. О контроле прочности соединений с гарантированным натягом колец подшипников с шейками осей колесных пар // И. Л. Чернин [и др.] / Вестн. Белорус. гос. ун-та трансп. Наука и транспорт. – 2010. – № 1 (20). – С. 5–9.
15. Устройство для неразрушающего контроля прочности напрессовки колец подшипников на шейке оси колесной пары : пат. № 15308 Респ. Беларусь : МПК G01L 1/22, B23P 11/02 / Сенько В. И., Чернин И. Л., Чернин Р. И. ; заявитель Белорус. гос. ун-т трансп. – № а 20090634 ; заявл. 04.05.2009 ; опубл. 30.12.2012 // Афіц. бюл. / Нац. цэнтр інтэлект. уласнасці. – 2012. – № 1 (84). – С. 145–146.
16. Генич, Б. А. Гидравлический способ демонтажа подшипников качения / Б. А. Генич, Б. З. Акбашев. – М. : ВНИИЖТ, 1960. – 20 с.
17. Устройство для контроля прочности механической напрессовки колеса на ось колесной пары : пат. № 2431 Респ. Беларусь : МПК B23P 11/02, G01L 1/22 // Сенько В. И., Чернин И. Л., Чернин Р. И., Гориченко С. Ф. ; заявитель Белорус. гос. ун-т трансп. – № и 20050254 ; заявл. 02.05.2005 ; опубл. 28.02.2006 // Афіц. бюл. / Нац. цэнтр інтэлект. уласнасці. – 2006. – № 1 (48). – С. 172–173.
18. Колесо составного типа рельсового транспорта : пат. № 12203 Респ. Беларусь : МПК B61F 13/00, B60B 3/04 / Брильков Г. Е., Путято А. В., Демидович В. Н. ; заявитель Белорус. гос. ун-т трансп. – № и 20190125 ; заявл. 10.05.2019 ; опубл. 30.12.2019 // Афіц. бюл. / Нац. цэнтр інтэлект. уласнасці. – 2019. – № 6 (131). – С. 121–122.

References

1. Pavlov V. *Car builders do not restrain themselves*. Available at: <https://www.gudok.ru/newspaper/?ID=1469889&archive=2019.07.11> (accessed 25 February 2024) (in Russian).
2. Skorlygina N. *The bearings have reached the government*. Available at: <https://www.kommer-sant.ru/doc/4097231> (accessed 25 February 2024) (in Russian).
3. Potaeva K. *There is a growing shortage of bearings for innovative railcars in Russia*. Available at: <https://www.vedomosti.ru/business/articles/2022/08/31/938372-narastaet-defitsit-podshipni-kov> (accessed 25 February 2024) (in Russian).
4. Ryzhova A. O. *Acoustic methods for monitoring the press connections of bearing rings with the axle necks of wheelsets*. Diss. kand. tekhn. nauk. Novosibirsk, 2022. 145 p. (in Russian).
5. Notik Z. Kh. *Diesel locomotives ЧМЕНЗ, ЧМЕНЗТ, ЧМЕНЗЕН*. Moscow, Transport Publ., 1996. 444 p. (in Russian).
6. Slivinskii E. V., Gusev A. V. A promising wheelset for locomotives. Patent Rossiiskaya Federatsiya, no. 22551862, 2015 (in Russian).
7. Borodin A. V., Yarysheva L. V. Connection with the tension of the bandage with the wheel center. Patent Rossiiskaya Federatsiya, no. 2504698, 2014 (in Russian).
8. Rauba A. A., Dyundin V. V. Connecting the brace to the wheel center/ Patent Rossiiskaya Federatsiya, no. 184604, 2018 (in Russian).
9. Chernin I. L., Chernin R. I., Sen'ko V. I., Sen'ko N. G. A device for pressing rings of axle box bearings of a wheelset. Patent Respublika Belarus', no. 22509, 2019 (in Russian).
10. GOST 33200–2014. Axles of wheelsets of railway rolling stock. General technical conditions. Moscow, Standartinform Publ., 2015. 47 p. (in Russian).

11. Sen'ko V. I., Chernin I. L., Chernin R. I. A device for pressing rings of axle box bearings of a wheelset. Patent Respublika Belarus', no. 13904, 2010 (in Russian).
12. Rukovodyashchii dokument po remontu i tekhnicheskomu obsluzhivaniyu kolesnykh par s buksovymi uzlami gruzovykh vagonov magistral'nykh zheleznykh dorog kolei 1520 (1524 mm). Moscow, 2012. 276 p. (in Russian).
13. Sen'ko V. I., Chernin I. L., Chernin R. I., Sen'ko N. G. A method for non-destructive testing of the strength of pressing bearing rings on the neck of the axle of a wheelset. Patent Rossiiskaya Federatsiya, no. 2329478, 2008 (in Russian).
14. Chernin I. L., Chernin R. I., Sen'ko N. G., Rudenok V. A. On the control of the strength of joints with guaranteed tension of bearing rings with axle necks of wheel pairs. *Vestnik Belorusskogo gosudarstvennogo universiteta transporta. Nauka i transport*, 2010, no. 1 (20), pp. 5–9 (in Russian).
15. Sen'ko V. I., Chernin I. L., Chernin R. I. A device for non-destructive testing of the strength of the pressing of bearing rings on the neck of the axle of a wheelset. Patent Respublika Belarus', no. 15308, 2012 (in Russian).
16. Genich B. A., Akbashev B. Z. *Hydraulic method of dismantling rolling bearings*. Moscow, VNIIZHT Publ., 1960. 20 p. (in Russian).
17. Sen'ko V. I., Chernin I. L., Chernin R. I., Gorichenko S. F. A device for monitoring the strength of the mechanical pressing of a wheel on the axle of a wheelset. Patent Respublika Belarus', no. 2431, 2006 (in Russian).
18. Bril'kov G. E., Putyato A. V., Demidovich V. N. A composite type of rail transport wheel. Patent Respublika Belarus', no. 12203, 2019 (in Russian).

Поступила 26.02.2024 г.

УДК 658.012.011.56

<https://doi.org/10.62595/1819-5245-2024-1-41-47>

ОСОБЕННОСТИ АНАЛИТИЧЕСКОГО ОПИСАНИЯ МЕХАНИЗМА АГРЕГАТИРОВАНИЯ КОСИЛКИ САМОХОДНОЙ КС-200

В. Б. ПОПОВ

*Учреждение образования «Гомельский государственный
технический университет имени П. О. Сухого»,
Республика Беларусь*

Представлена математическая связь между функциональными математическими моделями, описывающими механизмы агрегатирования косилки самоходной КС-200. Особенностью конструкции КС-200 является использование механизмов навески и механизмов вывешивания адаптера одних и тех же звеньев. Поэтому для их проектирования необходимо определить, как влияет изменение внутренних параметров, например, механизма навески на изменение выходных параметров механизма вывешивания адаптера.

Ключевые слова: косилка самоходная, механизм агрегатирования, механизм вывешивания адаптера, механизм навески, гидроцилиндр, передаточное число.

Для цитирования. Попов, В. Б. Особенности аналитического описания механизма агрегатирования косилки самоходной КС-200 / В. Б. Попов // Вестн. Гомел. гос. техн. ун-та им. П. О. Сухого. – 2024. – № 1 (96). – С. 41–47. <https://doi.org/10.62595/1819-5245-2024-1-41-47>

FEATURES OF ANALYTICAL DESCRIPTION OF SELF-PROPELLED MOWER KC-200 AGGREGATION MECHANISM

V. B. POPOV

*Sukhoi State Technical University of Gomel,
the Republic of Belarus*

Author presents a mathematical connection between functional mathematical models describing the aggregation mechanisms of the self-propelled mower KC-200 in this article. A design feature of the KC-200 is the use of linkage mechanisms and adapter hanging mechanisms of the same links. Therefore, to design them, it is necessary to determine how changes in internal parameters, for example, the hanging mechanism, affect changes in the output parameters of the adapter hanging mechanism.

Keywords: self-propelled mower, aggregation mechanism, adapter hanging mechanism, linkage mechanism, hydraulic cylinder, gear ratio.

For citation. Popov V. B. Features of analytical description of self-propelled mower KC-200 aggregation mechanism. *Vestnik Gomel'skogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta imeni P. O. Sukhogo*, 2024, no. 1 (96), pp. 41–47 (in Russian). <https://doi.org/10.62595/1819-5245-2024-1-41-47>

Введение

Применение мощных кормоуборочных комбайнов эффективно только при скашивании и укладке в валок трав жатками с большой шириной захвата. Прицепные валковые жатки из-за особенностей конструкции не могут обеспечить ширину захвата, создающую условия для эффективной работы мощных кормоуборочных комбайнов. В связи с этим наиболее перспективным направлением для скашивания трав с последующим их подбором и измельчением мощными кормоуборочными комбайнами является применение косилок самоходных с широкозахватными валковыми жатками [1].

Косилка самоходная (рис. 1) предназначена для скашивания и укладки в валок трав, зерновых колосовых, зернобобовых, крупяных и других культур.



Рис. 1. Общий вид косилки самоходной КС-200

Косилка предусматривает возможность агрегатирования и работы сменными рабочими органами (адаптерами):

- с жаткой валковой КС-200.12 шириной захвата 9,2 м;
- с жаткой ротационной КС-200.15 шириной захвата 4 м.

Особенностью данной конструкции является то, что механизм агрегатирования самоходного шасси с адаптером состоит из подъемно-навесного устройства (ПНУ), включающего механизм навески (МН), и механизма вывешивания адаптера (МВА).

Целью работы является поиск и определение связи между выходными параметрами МН и МВА и общими для них внутренними параметрами.

Основная часть

Подъемно-навесное устройство косилки КС-200 состоит из объемного гидропривода (ГП) и МН, выполненного по четырехточечной схеме (рис. 2). Механизм навески состоит из опор 1, в которых при помощи осей 2 установлены рычаги 3. На опорах 1 крепятся кронштейны 4, в которых установлены гидроцилиндры 5, которые через упор с пазом 6 воздействуют на рычаги 3. На раме машины шарнирно закреплены гидроцилиндры 5, которые связаны с рычагами 3 и служат для подъема МН в верхнее положение.

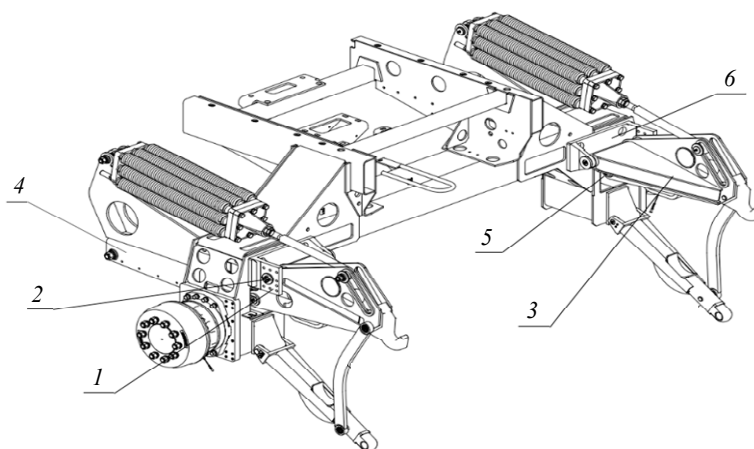


Рис. 2. Закрепленные на раме КС-200 механизм навески и механизм вывешивания адаптера:

- 1 – опора; 2 – ось; 3 – рычаг; 4 – кронштейн;
- 5 – гидроцилиндр; 6 – упор с пазом

Снижение потерь кормов в процессе уборки самоходной косилкой (СК) связано в том числе с обеспечением правильного функционирования МВА. Механизм вывешивания адаптера предназначен для качественного копирования рельефа башмаками жатки в заданном диапазоне вертикального перемещения адаптера относительно самоходного шасси. При этом башмаки адаптера должны иметь постоянный контакт с почвой, а нагрузка на них должна оставаться в заданных пределах. Поэтому наиболее полной характеристикой, описывающей процесс копирования, является реакция под башмаками жатки.

Идеализируя геометрические модели МН и МВА, считаем, что оси, проходящие через центры шарниров их звеньев, параллельны друг другу, а звенья – несжимаемы, тогда правая и левая части механизмов, будучи спроецированы на продольную плоскость симметрии СК, образуют из пространственных механизмов их плоские аналоги (рис. 3).

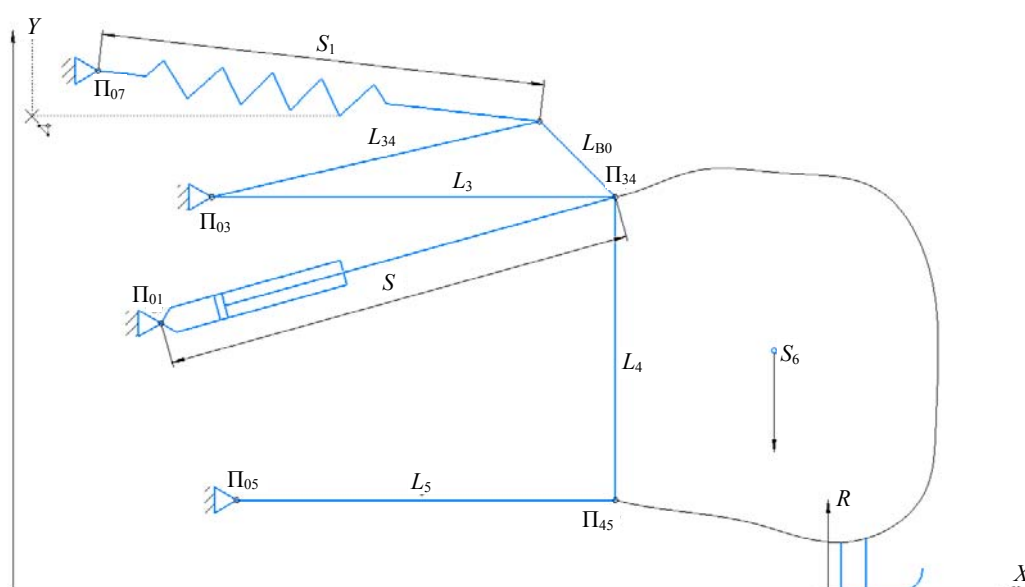


Рис. 3. Плоские аналоги механизма навески и механизма вывешивания адаптера

Преобразовав 3D-модели МН и МВА в их плоские аналоги, получим рычажный механизм, структура которого идентифицируется одноподвижным шестизвенником (рис. 3). Адаптер присоединяется к МН и МВА посредством поворотных рычагов и нижних тяг, а на плоскости преобразуется в выходное звено, положение центра тяжести которого однозначно связано с изменением обобщенных координат (S, S_1).

Ход поршня или растяжения пружины ($\Delta S, \Delta S_1$) рассматривается как изменение входных (обобщенных) координат, а изменение положения центра тяжести адаптера (S_6) и контакта башмака с опорной поверхностью – как изменение выходных.

Для определения положения подвижных шарниров МН и МВА, аналогов угловых и линейных скоростей формируются процедуры геометрического и кинематического анализа на базе метода замкнутого векторного контура [2].

В результате геометрического анализа определяются углы, образуемые векторами, имитирующими звенья МН, в правой декартовой системе координат, координаты подвижных шарниров МН и характерных точек цепи (рис. 4).

В частности координаты оси подвеса МН (Π_{45}) определяются по выражениям:

$$\begin{aligned} X_{45}(S) &= X_{05} + L_5 \cos \varphi_5(S); \\ Y_{45}(S) &= Y_{05} + L_5 \sin \varphi_5(S), \end{aligned} \quad (1)$$

где X_{05} , Y_{05} – координаты неподвижного шарнира Π_{05} на раме измельчителя; φ_i – угол, образуемый соответствующим звеном, в правой декартовой системе координат.

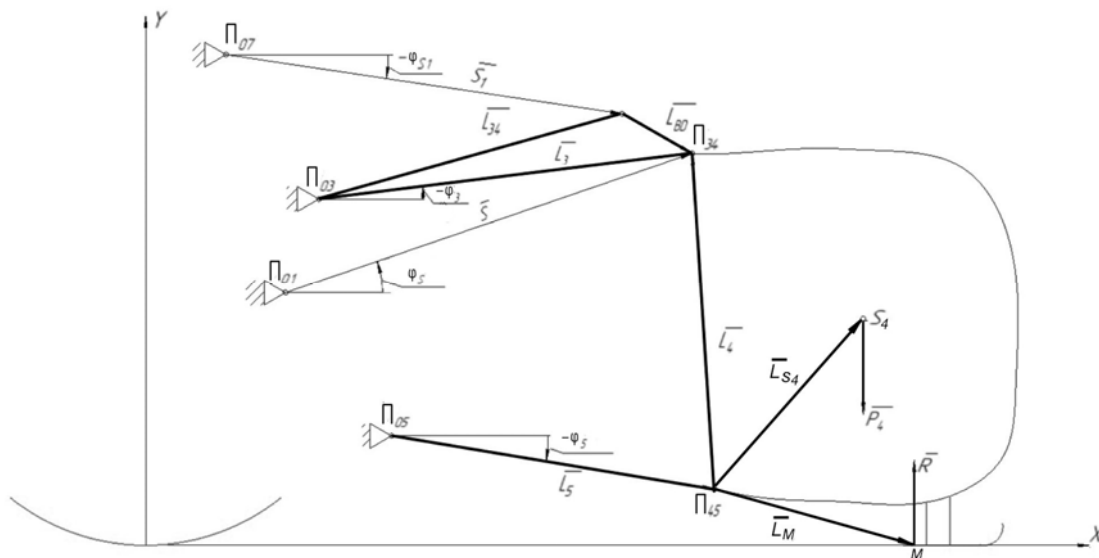


Рис. 4. Векторная интерпретация плоских аналогов механизма навески и механизма вывешивания адаптера

Координаты характерной точки – центра тяжести адаптера – определяются в соответствии с выражениями:

$$\begin{aligned} X_{S_6}(S) &= X_{45}(S) + L_{S_6} \cos[\varphi_4(S) + \varphi_{S_6}]; \\ Y_{S_6}(S) &= Y_{45}(S) + L_{S_6} \sin[\varphi_4(S) + \varphi_{S_6}], \end{aligned} \quad (2)$$

где L_{S_6} и φ_{S_6} – характеристики (модуль и направление) вектора, проведенного от оси подвеса к центру тяжести навесного адаптера.

Координаты другой характерной точки – контакта башмака с опорной поверхностью – определяются в соответствии с выражениями:

$$\begin{aligned} X_M(S) &= X_{S_6}(S) + L_M \cos[\varphi_6(S) - \varphi_M]; \\ Y_M(S) &= Y_{S_6}(S) + L_M \sin[\varphi_6(S) - \varphi_M], \end{aligned} \quad (3)$$

где $X_{S_6}(S)$, $Y_{S_6}(S)$ – координаты оси подвеса жатки; L_M , φ_M – параметры, жестко связывающие характерные точки со звеном L_6 .

Аналитические выражения (1)–(3) представляют собой функции положения для центров шарниров звеньев МН, центров тяжести адаптера и точки контакта башмака с опорной поверхностью одновременно, необходимые для формирования процедур кинематического анализа.

В результате кинематического анализа определяются аналитические выражения для передаточных чисел МН и МВА – $I_{S_6}(S)$, $I_M(S)$:

$$\begin{aligned} I_{S_6}(S) &= \varphi'_3 [U_{53}L_5 \cos \varphi_5 + U_{65}L_{S_6} \cos(\varphi_6 + \varphi_{S_6})]; \\ I_M(S) &= \varphi'_3 [U_{53}L_5 \cos \varphi_5 + U_{65}L_M \cos(\varphi_6 + \varphi_M)], \end{aligned} \quad (4)$$

где $\varphi'_3(S)$ – аналог угловой скорости звена L_3 ; U_{53} , U_{65} – передаточные отношения; L_5 , L_{S_6} , L_M – длина нижней тяги, расстояние от оси подвеса до центра тяжести адаптера и до точки контакта башмака с опорной поверхностью; φ_5 , φ_6 – углы, образуемые L_5 , L_6 в правой декартовой системе координат (рис. 4).

При помощи вышеприведенных передаточных чисел легко определяется нагрузка на гидроцилиндр или блок пружин.

Таким образом, выражение для передаточного числа МН позволяет определить полезную нагрузку $F(S)$ на гидроцилиндре и грузоподъемность G_{S_6} ПНУ [3]:

$$G_{S_6} = \frac{p_{гц}^{\max} F_{п} - [F_{ин}^{np}(S^*) + F_{тр}^{np}(S^*)]}{I_{S_6}(S^*)_{\max}}, \quad (5)$$

где $p_{гц}^{\max}$ – максимальное давление в гидроцилиндре; $F_{п}$ – площадь поршня гидроцилиндра; $F_{ин}^{np}(S^*)$ – приведенная сила инерции и $F_{тр}^{np}(S^*)$ – приведенная сила трения, определенные для значения обобщенной координаты, соответствующей максимуму передаточного числа.

В процессе копирования рельефа вертикальная координата точки контакта башмака с опорной поверхностью (Y_M) изменяет свое расположение относительно точки аналогичного контакта колеса СК. Ее вертикальные колебания относительно этого (нулевого) уровня в заданном диапазоне сопровождаются соответствующими изменениями S_1 , что приводит к росту растяжения пружины (S_1) при уменьшении Y_M и сокращению растяжения при росте Y_M . Одновременно с этими параметрами изменяются и передаточные числа (4) МВА. В результате, на уровне Y_M отличном от нулевого, реакция на башмаке будет отличаться от первоначального значения R_0 . В заданном диапазоне колебания $Y_M(S)$ реакция на башмаке рассчитывается по выражению [4]

$$R(S) = \frac{1}{I_M(S)} [P I_{S_6}(S) - C \Delta X(S) + F_{тр}^{np} \pm F_{ин}^{np}]. \quad (6)$$

Сила давления башмака на опорную поверхность зависит от геометрических и кинематических параметров МВА, массово-геометрических параметров адаптера, характеристики пружины, скорости движения СК, а также характеристики микро-рельефа и представляет количественную характеристику качества копирования. С помощью ее упрощенного аналитического выражения можно предварительно выбрать рациональное сочетание внутренних параметров проектируемого МВА.

Из аналитических выражений (5) и (6) очевидно, что соответствующие выходные параметры обратно пропорциональны передаточным числам МН и МВА. Но задачей разработчика МН является снижение максимального значения I_{S6} (рис. 5), а задачей разработчика МВА является стабилизация его передаточного числа с целью более стабильного значения реакции от опорной поверхности (рис. 6).

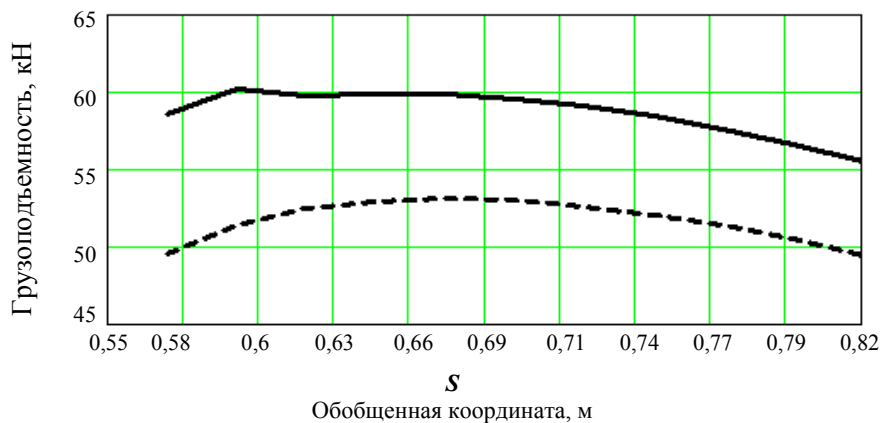


Рис. 5. Изменение грузоподъемности в процессе подъема адаптера (исходный и улучшенный варианты):
 - - - $G_s(S)$; — $G_{s1}(S)$

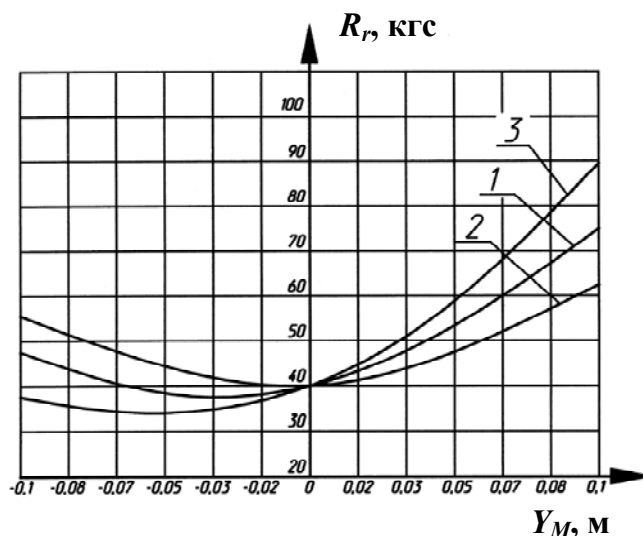


Рис. 6. Статическая характеристика механизма вывешивания адаптера кормоуборочного комбайна

Таким образом, взаимовлияние основных критериев эффективности МН и МВА должно рассматриваться с учетом изменений приведенных выше выражений.

Заключение

Определение связи между выходными параметрами и характеристиками механизма навески и механизма вывешивания адаптера позволяет рационально, а в некоторых случаях и оптимально выбирать внутренние параметры упомянутых механизмов.

Данный подход и соответственно описания функционирования МН и МВА могут быть использованы для самоходной косилки КС-100 и других самоходных косилок, имеющих аналогичные по структуре механизмы вывешивания.

Литература

1. Косилка самоходная КС-200 : инструкция по эксплуатации. – Гомель : ГОМ-СЕЛЬМАШ, 2022. – 81 с.
2. Артоболевский, И. И. Теория механизмов и машин / И. И. Артоболевский. – М. : Машиностроение, 1988. – 640 с.
3. Попов, В. Б. Математическое моделирование подъемно-навесных устройств мобильных энергетических средств / В. Б. Попов. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2016. – 251 с.
4. Ключков, А. В. Сельскохозяйственные машины. Теория и расчет / А. В. Ключков, В. Г. Ковалев, П. М. Новицкий. – Минск : ИВЦ Минфина, 2019. – 439 с.

References

1. Self-propelled mower KS-200. Gomel, Nauchno-tekhnicheskii tsentr kombainostroeniya. Otkrytoe aktsionernoe obshchestvo «GOMSEL"MASh», 2022. 81 p. (in Russian).
2. Artobolevskii I. I. *Theory of mechanisms and machines*. Moscow, Mashino-stroenie Publ., 1988. 640 p. (in Russian).
3. Popov V. B. *Mathematical modeling of lifting and attachment devices of mobile energy vehicles*. Gomel, Sukhoi State Technical University of Gomel, 2016. 251 p. (in Russian).
4. Klochkov A. V., Kovalev V. G., Novitskii P. M. *Agreecultural machines. Theory and calculation*. Minsk, Informatsionno-vychislitel'nyi tsentr Ministerstva finansov Respubliki Belarus' Publ., 2019. 439 p. (in Russian).

Поступила 05.02.2024 г.

УДК 620.22

<https://doi.org/10.62595/1819-5245-2024-1-48-62>

ВЛИЯНИЕ СОСТАВА СТАЛИ НА КОРРОЗИОННУЮ СТОЙКОСТЬ НАСОСНО-КОМПРЕССОРНЫХ ТРУБ В УСЛОВИЯХ УГЛЕКИСЛОТНОЙ КОРРОЗИИ

Ю. И. ПОПКОВА

Белорусский научно-исследовательский и проектный институт нефти Республиканское унитарное предприятие «Производственное объединение «Белоруснефть», г. Гомель

А. Я. ГРИГОРЬЕВ

Государственное научное учреждение «Институт механики металлополимерных систем имени В. А. Белого Национальной академии наук Беларуси», г. Гомель

Представлены результаты стендовых коррозионных испытаний сталей насосно-компрессорных труб в реальных скважинных средах нефтяных месторождений РУП «Производственное объединение «Белоруснефть». Оценивалась коррозионная стойкость среднеуглеродистых сталей марок 32Г1А N80 (Q) API Spec 5CT, 37Г2Ф Е ГОСТ 633 и низколегированных сталей марок 30Х L80 (I) API Spec 5CT, 32ХГ Р110 API Spec 5CT, 25ХГБ К72 ГОСТ 31446, 30ХГМА-1 С90 API Spec 5CT. Обнаружено, что среднеуглеродистая трубная сталь в горячекатаном состоянии с крупнозернистой структурой подвержена более интенсивным локальным повреждениям в сравнении с аналогичной сталью после закалки с высоким отпуском, имеющей мелкозернистую структуру. Анализ данных состава и микроструктуры исследованных материалов свидетельствует, что в заданных условиях основными факторами, снижающими коррозионную стойкость исследованных материалов, являются содержание марганца более 1 мас. %, разнородность или наличие структуры видманитетта. Установлено, что трубная сталь с содержанием хрома 0,5 мас. %, микролегированная кальцием и бором, имеющая мелкозернистую структуру с 12-м баллом зерна по ГОСТ 5639, может проявлять повышенную коррозионную стойкость наравне с трубной сталью с содержанием хрома 1 мас. %, имеющей мелкозернистую структуру с 10-м баллом зерна по ГОСТ 5639. Полученные результаты могут быть использованы при выборе материалов насосно-компрессорных труб, эксплуатируемых в условиях нефтяных месторождений Республики Беларусь.

Ключевые слова: коррозия, скважина, нефтяное месторождение, трубная сталь, низколегированная сталь, элементный состав, микроструктура.

Для цитирования. Попкова, Ю. И. Влияние состава стали на коррозионную стойкость насосно-компрессорных труб в условиях углекислотной коррозии / Ю. И. Попкова, А. Я. Григорьев // Вестн. Гомел. гос. техн. ун-та им. П. О. Сухого. – 2024. – № 1 (96). – С. 48–62. <https://doi.org/10.62595/1819-5245-2024-1-48-62>

INFLUENCE OF STEEL CHARACTERISTICS ON THE CORROSION RESISTANCE OF TUBING UNDER CARBON DIOXIDE CORROSION CONDITIONS

Yu. I. POPKOVA

*Belarusian Oil Research and Design Institute BelNIPIneft
Republican unitary enterprise “Production Association
“Belorusneft”, Gomel*

A. Ya. GRIGORIEV

*The State Scientific Institution “V. A. Belyi Metal-Polymer
Research Institute of National Academy of Sciences
of Belarus”, Gomel*

Results of bench corrosion tests of tube steels in real well mediums of oil fields of Production Association “Belorusneft” are presented. Corrosion resistance of plain carbon steels 32Mr1A N80 (Q) API Spec 5CT, 37Mr2V E GOST 633, low-alloyed steels 30Cr L80(1) API Spec 5CT, 32CrMr P110 API Spec 5CT, 25CrMrB K72 GOST 31446, 30CrMrMoA-1 C90 API Spec 5CT has been evaluated. It was found that hot-rolled plain carbon steel with coarse-grained microstructure is subject to more intense local corrosion than similar steel with a fine-grained microstructure after quenching and high tempering. Analysis of the composition and microstructure data of the investigated materials indicates that, under given conditions, the main factors reducing the corrosion resistance of the investigated materials are the manganese content of more than 1 % wt., the heterogeneity and the presence of metallographic structure of Widmannstetter. It is established that tube steel with chromium content of 0.5 % wt., micro-alloyed with calcium and boron, having fine-grained structure with 12 grain grades according to GOST 5639, can show increased corrosion resistance on a par with tube steel with chromium content of 1 % wt., having fine-grained structure with 10 grain grade according to GOST 5639. The obtained results can be used when selecting materials for operating under the conditions of oil fields in the Republic of Belarus.

Keywords: corrosion, well, oil field, tube steel, low-alloy steel, chemical composition, microstructure.

For citation. Popkova Yu. I., Grigoriev A. Ya. Influence of steel characteristics on the corrosion resistance of tubing under carbon dioxide corrosion conditions. *Vestnik Gomel'skogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta imeni P. O. Sukhogo*, 2024, no. 1 (96), С. 48–62 (in Russian). <https://doi.org/10.62595/1819-5245-2024-1-48-62>

Введение

Насосно-компрессорные трубы (НКТ) являются важным элементом системы добычи нефти и газа, обеспечивая транспортировку газожидкостной смеси из скважины на поверхность. Однако НКТ подвергаются интенсивному коррозионному износу в условиях агрессивных скважинных сред. Коррозия ведет к снижению прочности и долговечности НКТ, а также к увеличению риска аварий и экологических последствий. Поэтому важно исследовать влияние различных факторов на коррозионную стойкость НКТ, в том числе состава стали, из которой они изготовлены.

Состав стали является одним из ключевых параметров, определяющих ее коррозионную стойкость, так как он влияет на фазовый состав, микроструктуру, механические свойства и электрохимическое поведение материала. В настоящее время при добыче нефти из глубоких скважин используют НКТ из сталей различных марок и групп прочности: среднеуглеродистых низко- и среднелегированных, а также нержавеющей. В Беларуси наиболее распространены НКТ группы прочности N80 (Q), изготовленные в соответствии с требованиями Американского нефтяного института (The American Petroleum Institute) (API Specification 5CT) [1]. Требуемые механические характеристики НКТ достигаются термообработкой стали – закалкой с последующим отпуском.

Опыт эксплуатации РУП «Производственное объединение «Белоруснефть», а также данные зарубежных компаний показали, что для НКТ группы прочности N80 (Q) API Specification 5CT или E ГОСТ 633 подходят среднеуглеродистые марганцовистые трубные стали 30Г2, 32Г2 или 35Г2 по ГОСТ 4543 (наименование согласно ТУ производителя «32Г1А»), а также стали 35Г2С, 32Г2С [2–5]. Реже используется сталь 20ГЮ [6].

В соответствии со стандартом API Specification 5CT к среднеуглеродистым НКТ предъявляются требования только по содержанию серы и фосфора – не более 0,030 % (мас. % здесь и далее по тексту) каждого, другие элементы не нормируются.

Эти трубные стали обычно закаляются с высоким отпускком и имеют структуру отпущенного мартенсита. Единственное требование к микроструктуре – получение мелкозерна (балл не указан). По ГОСТ 5639 мелкозернистой структуре соответствует сталь с баллом 7 и выше. Количество неметаллических включений не нормируется.

Среднеуглеродистые стали не рекомендуются для эксплуатации в коррозионно-агрессивных средах нефтедобывающих скважин, однако они широко применяются при наличии нефтяной фазы и использовании ингибиторной защиты от коррозии. Поскольку применение труб из нержавеющей сталей не всегда экономически целесообразно, в настоящее время разработаны и выпускаются НКТ из сталей с содержанием хрома 1, 3 или 5 %, которые позиционируются как стали с повышенной коррозионной стойкостью.

Низко- и среднелегированные НКТ изготавливают по стандарту API Specification 5CT или ГОСТ 31446 групп прочности L80 (1), P110, C90 (реже группы прочности K72); по ГОСТ 633 группы прочности E. К трубным сталям групп прочности P110, K72, как и к сталям по N80 (Q), предъявляются требования только по содержанию серы и фосфора – не более 0,030 % каждого, другие элементы не нормируются. Для НКТ групп прочности L80 (1) и C90 дополнительно устанавливаются требования по максимальному содержанию углерода – 0,43 и 0,50 %, соответственно, марганца – 1,9 %, никеля – 0,25 и 0,99 %, соответственно, фосфора – 0,03 %, серы – 0,03 и 0,01 %, соответственно. Для L80 (1) устанавливаются дополнительные требования по максимальному содержанию меди – 0,35 % и кремния – 0,45 %.

Изучение опыта зарубежных компаний [7–10] показывает, что коррозионная стойкость низко- и среднелегированных трубных сталей НКТ зависит от условий эксплуатации. В некоторых случаях они проявляют себя лучше среднеуглеродистых, а в некоторых – нет. Поэтому нефтегазодобывающие компании часто подбирают марки трубных сталей НКТ экспериментально. Выбор марки трубной стали с учетом конкретных условий нефтяных месторождений может существенно снизить эксплуатационные затраты на добычу нефти.

Цель работы заключается в установлении закономерностей влияния состава и структуры трубных сталей на эксплуатационную надежность и коррозионную стойкость в условиях нефтяных скважин и в разработке рекомендаций по выбору сталей НКТ для месторождений Беларуси.

Методика проведения испытаний

Из патрубков НКТ, предоставленных заводами-производителями, изготавливались образцы-свидетели коррозии (ОСК). Испытания проводились на установке для моделирования скважинных условий «АА-КОНКОР», представляющей собой замкнутый циркуляционный контур с двумя участками (вертикальным и горизонтальным) для установки ОСК (рис. 1).

Испытания проводились по методике, разработанной для условий нефтяных месторождений Беларуси, в реальных скважинных средах, взятых из Осташковичского, Южно-Осташковичского и Южно-Сосновского нефтяных месторождений, представляющие собой крепкие рассолы хлоридно-кальциевого типа, содержащие растворенный углекислый газ. Химический состав попутных вод этих месторождений приведен в табл. 1.

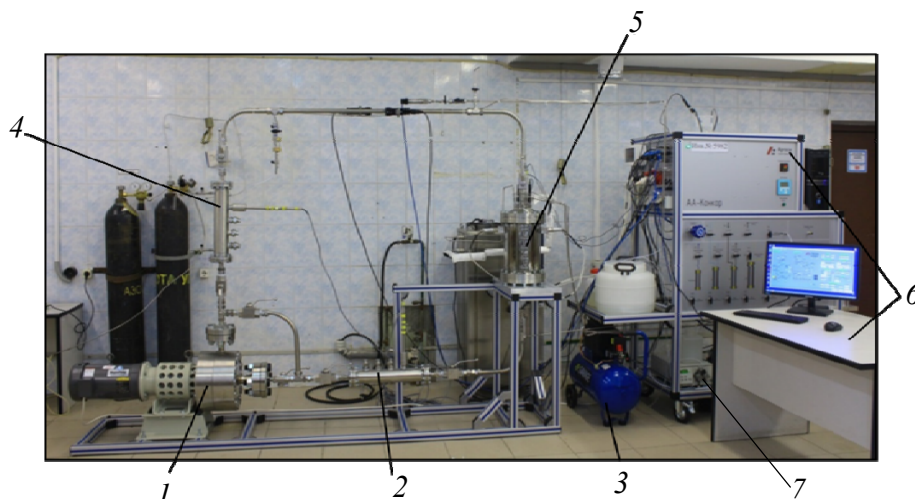


Рис. 1. Установка моделирования скважинных условий эксплуатации образцов сталей насосно-компрессорных труб «АА-КОНКОР»:
 1 – циркуляционный насос с электродвигателем; 2 – горизонтальный испытательный участок; 3 – компрессор; 4 – вертикальный испытательный участок; 5 – накопительный резервуар-смеситель с нагревательным элементом; 6 – система управления; 7 – плунжерный насос создания давления

Таблица 1

Химический состав воды скважин нефтяных месторождений Беларуси, осложненных углекислотной коррозией

Плотность, кг/м ³	Минерализация, г/л	рН	Общая жесткость	Содержание, мг/л								
				Cl ⁻	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺ + K ⁺	Fe ²⁺	CO ₂	H ₂ S
Осташковичское нефтяное месторождение												
1155	225	5,9	1600	140307	89	325	26947	2974	54370	6	27	0
Южно-Осташковичское нефтяное месторождение												
1152	219	6,2	1015	135357	96	415	16904	2452	63661	4	25	0
Южно-Сосновское нефтяное месторождение												
1200	284	5,7	1883	176667	98	249	32078	3432	71415	16	38	0

По классификации В. А. Сулина [11], вода использованных скважинных сред относится к хлоридно-кальциевому типу, по минерализации классифицируется как рассол крепкий и по значению водородного показателя является слабокислой [12]. Объемное содержание CO₂ в попутном нефтяном газе этих месторождений равно 0,80, 0,40 и 0,28 %, соответственно, при нулевой концентрации H₂S.

Давление рабочей среды при испытаниях составляло 15 МПа, температура – +70 °С, скорость потока – 0,3 и 0,6 м/с, что соответствует условиям эксплуатации добывающих скважин месторождений Беларуси, осложненных коррозией. По окончании испытаний скорость коррозии ОСК определялась гравиметрическим методом по потере массы в соответствии с требованиями NACE TM0169 [13].

Исследования элементного состава, микроструктуры и морфологии поверхности ОСК проводились в Государственном научном учреждении «Институт порошковой металлургии имени О. В. Романа». Определение элементного состава проводились на аттестованном рентгенофлуоресцентном спектрометре ED 2000 (Oxford Instruments

analytical, Великобритания) и на аттестованном атомно-эмиссионном спектрометре ЭМАС-200ССД (ЗАО «Спектроскопические системы», Беларусь). Погрешность методов составляла 3–5 относительных процентов. Анализ на углерод и серу проводили на экспресс-анализаторах АН 7529 и АС 7932, соответственно (ОАО «Гомельский завод измерительных приборов», Беларусь). Изучение морфологии поверхности образцов осуществляли с помощью стереоскопического микроскопа СМ0745 («Альтами», Россия). Исследование микроструктуры проводили на световом микроскопе МЕФ-3 (Reichert, США) при увеличении $\times 100$, $\times 500$. Загрязненность неметаллическими включениями определяли по ГОСТ 1778; размер зерна – по ГОСТ 5639; полосчатость – по ГОСТ 5640. Испытания образцов на растяжение проводили на универсальной машине Н150К-У (Tinius Olsen, Великобритания) в соответствии с ГОСТ 10006 и ГОСТ 1497 с погрешностью измерений 1 %.

Кроме исследования морфологии поверхностей определялась глубина проникновения коррозии на поперечных микрошлифах, что позволило выяснить, какие из испытываемых марок трубных сталей подвержены сплошной (общей) коррозии, а какие – локальной. Для оценки скорости локальной коррозии оценивалась глубина коррозионного разрушения за год (мм/год).

Объекты исследований: трубные стали, применяемые при изготовлении НКТ, – среднеуглеродистые марганцовистые стали марок 32Г1А группы прочности N80 (Q), изготовленные по стандарту API Specification 5CT; 37Г2Ф группы прочности E, изготовленная по ГОСТ 633; низколегированные стали марок 32ХГ группы прочности P110; 30Х группы прочности L80 (1); 30ХГМА-1 группы прочности C90, изготовленные по стандарту API Specification 5CT; 25ХГБ группы прочности K72, изготовленная по ГОСТ 31446; среднелегированные трубные стали марок 18Х3МФБ и 15Х5МФБ группы прочности E, изготовленные по ГОСТ 633; высоколегированная сталь 13Cr группы прочности L80 (1), изготовленная по стандарту API Specification 5CT. В качестве базы сравнения использована промышленно применяемая среднеуглеродистая марганцовистая сталь марки 32Г1А группы прочности N80 (Q). Оценка концентрации углерода и основных легирующих элементов исследованных сталей приведена в табл. 2.

Таблица 2

**Концентрация основных легирующих элементов
исследованных трубных сталей, мас. %**

Легирующие элементы	Марка стали								
	32Г1А	37Г2Ф	32ХГ	30Х	30ХГМА-1	25ХГБ	18Х3МФБ	15Х5МФБ	13Cr
C	0,31–0,35	0,36	0,31–0,34	0,31–0,36	0,31–0,32	0,23–0,28	0,17–0,18	0,15–0,16	0,20–0,22
Mn	1,10–1,12	1,50–1,60	0,64–0,72	0,63–0,75	1,03–1,15	0,85–1,00	0,55–0,64	0,57–0,62	0,59–0,67
Cr	0,05–0,07	0,39–0,42	1,10	0,96–1,15	0,96–1,02	0,85–1,00	2,50–3,00	4,90–5,20	13,40–13,95

Результаты и обсуждение

Влияние содержания хрома на коррозионную стойкость трубных сталей.

При оценке коррозионной стойкости трубных сталей НКТ наиболее важным показателем является скорость локальной коррозии. Как известно, равномерная коррозия является наименее опасным видом разрушения, поскольку не приводит к образованию концентраторов напряжений. Локальная коррозия может приводить к быстрому разрушению металла и, соответственно, к преждевременным подъемам погружного

оборудования скважин нефтяных месторождений для проведения ремонтных работ, в связи с чем основные исследования направлены на выявление локальных коррозионных повреждений, определение глубины проникновения локальной коррозии на поперечных микрошлифах и расчет глубинного показателя скорости коррозии. Результаты исследований на примере Осташковичского нефтяного месторождения представлены на рис. 2, а–е.

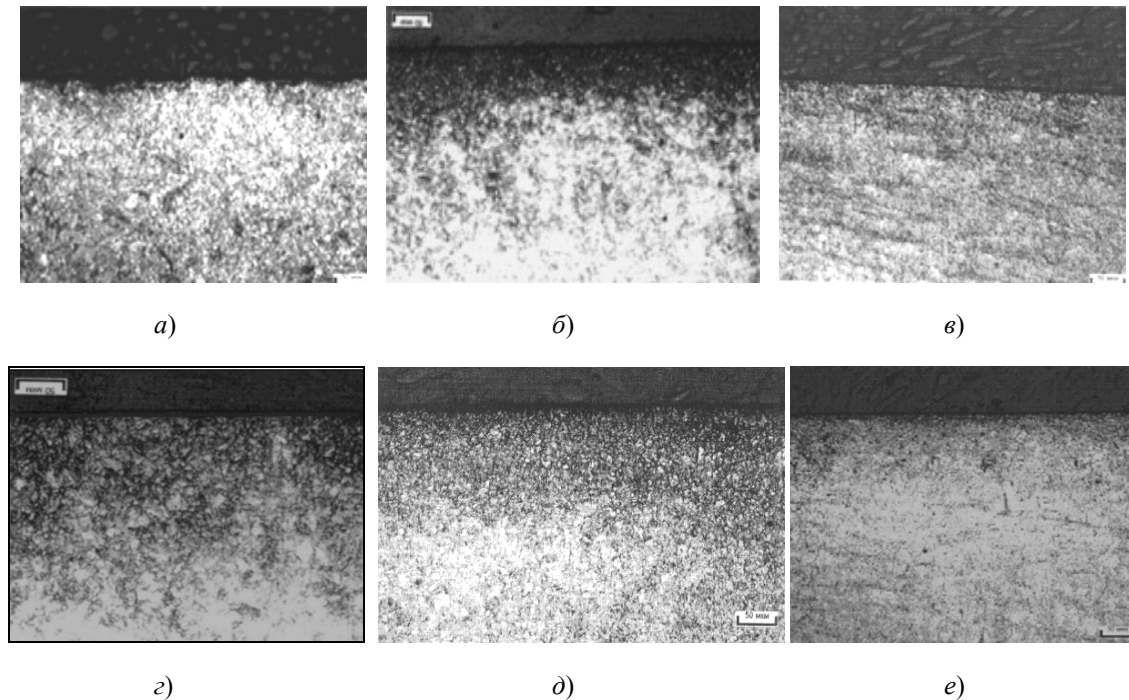


Рис. 2. Морфология поверхности образцов-свидетелей коррозии из трубных сталей после испытаний, моделирующих эксплуатационные условия Осташковичского месторождения (поле зрения снимков 550×400 мкм): а – 32Г1А; б – 32ХГ; в – 30Х; г – 18Х3МФБ; д – 15Х5МФБ; е – 13Cr

Как видно, в условиях Осташковичского нефтяного месторождения локальные коррозионные повреждения исследуемых трубных сталей, за исключением среднеуглеродистой стали 32Г1А, не выявлены. На основании проведенных экспериментов установлено, что для условий добывающих скважин Осташковичского и Южно-Осташковичского нефтяных месторождений для предупреждения локальных коррозионных повреждений необходимы трубные стали с содержанием хрома 1 % и более. По данным эксперимента промышленно применяемая среднеуглеродистая марганцовистая трубная сталь с содержанием хрома менее 0,1 % корродирует со скоростью до 2,4 мм/год, что соответствует фактическим данным на промысловых участках.

Для условий Южно-Сосновского нефтяного месторождения сталь с содержанием хрома менее 0,1 % также подвержена локальной коррозии со скоростью до 2,4 мм/год. Однако коррозионная стойкость трубных сталей в этом случае проявляется при содержании в них хрома 3 % и более.

Наблюдаемый неравномерный локальный характер повреждения среднеуглеродистой марганцовистой стали обусловлен образованием на поверхности рыхлого слоя продуктов коррозии, который легко удаляется потоком, открывая участки металла для дальнейших повреждений. Данный факт подтверждается результатами стендовых испытаний. После извлечения ОСК из испытательной ячейки по завершению испытаний поверхность неравномерна покрыта продуктами коррозии.

Для трубной стали с содержанием хрома 1 % и более характерно образование более плотного и равномерного слоя продуктов коррозии, которые играют роль защитного покрытия. Известно, что в продуктах коррозии хром находится в составе аморфного, непроводящего электрический ток, соединения $\text{Cr}(\text{OH})_3$. Соответственно, с повышением содержания хрома в сталях увеличивается и его концентрация в продуктах коррозии, которая снижает их электропроводность и повышает катионные свойства, что в результате положительно сказывается на коррозионной стойкости сталей [10, 14–16]. Данный факт согласуется с теорией коррозионных повреждений: хромосодержащие стали могут эффективно подавлять локальную коррозию. Однако, как можно видеть из результатов эксперимента, особенности скважинных сред и условий накладывают ограничения на минимальное содержание хрома.

Типичное состояние образцов из трубных сталей с различным содержанием хрома представлено на рис. 3.

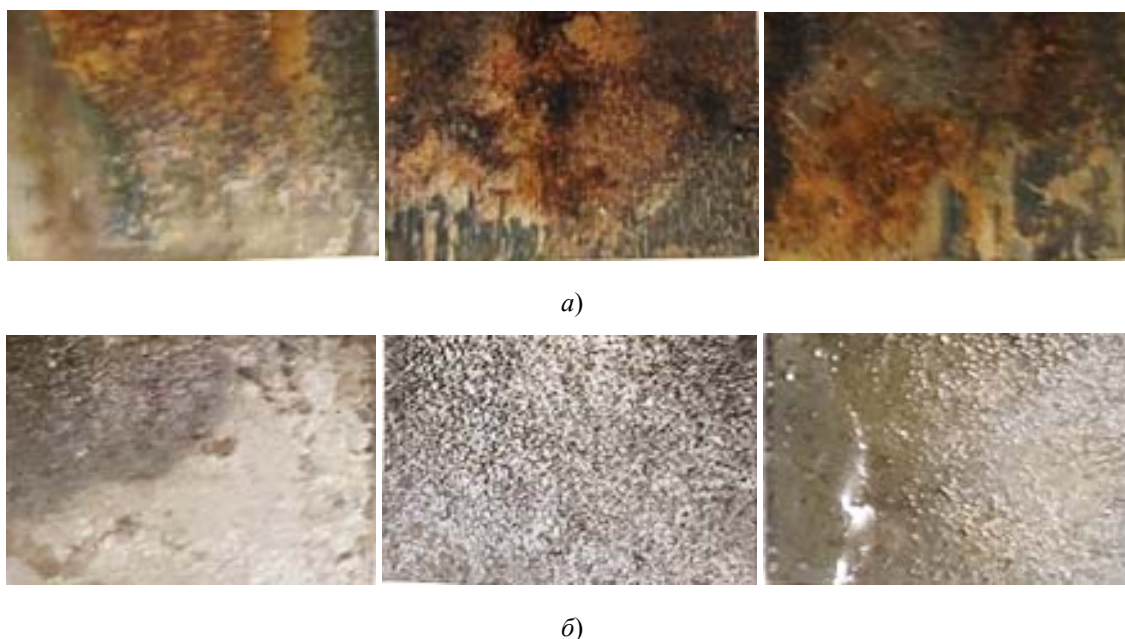


Рис. 3. Образцы трубных сталей после испытаний в скважинной среде Осташковичского нефтяного месторождения (поле зрения снимков 550×400 мкм):
a – 32Г1А; *б* – 30Х

Полученные экспериментальные данные позволяют сделать вывод, что в условиях Осташковичского и Южно-Осташковичского нефтяных месторождений для образования плотного защитного осадка является достаточным содержание хрома на уровне 1 %.

Отличительной особенностью Южно-Сосновского нефтяного месторождения является большая минерализация, в частности большее содержание хлорид-ионов. На основании проведенной работы определено предельное содержание хлорид-ионов, при которых содержания хрома 1 % является недостаточным для образования защитного осадка продуктов коррозии. Установлено, что для условий Южно-Сосновского нефтяного месторождения содержание хрома в трубной стали должно быть не менее 3 %, при котором будет наблюдаться снижение скорости общей коррозии при отсутствии локальных повреждений.

На основании полученных данных построена номограмма применения низколегированных трубных сталей для условий углекислотной коррозии, охватывающая условия эксплуатации скважин нефтяных месторождений Беларуси, продукция которых содержит углекислый газ и относится по существующей классификации к высоко агрессивным. Данная диаграмма представлена на рис. 4.

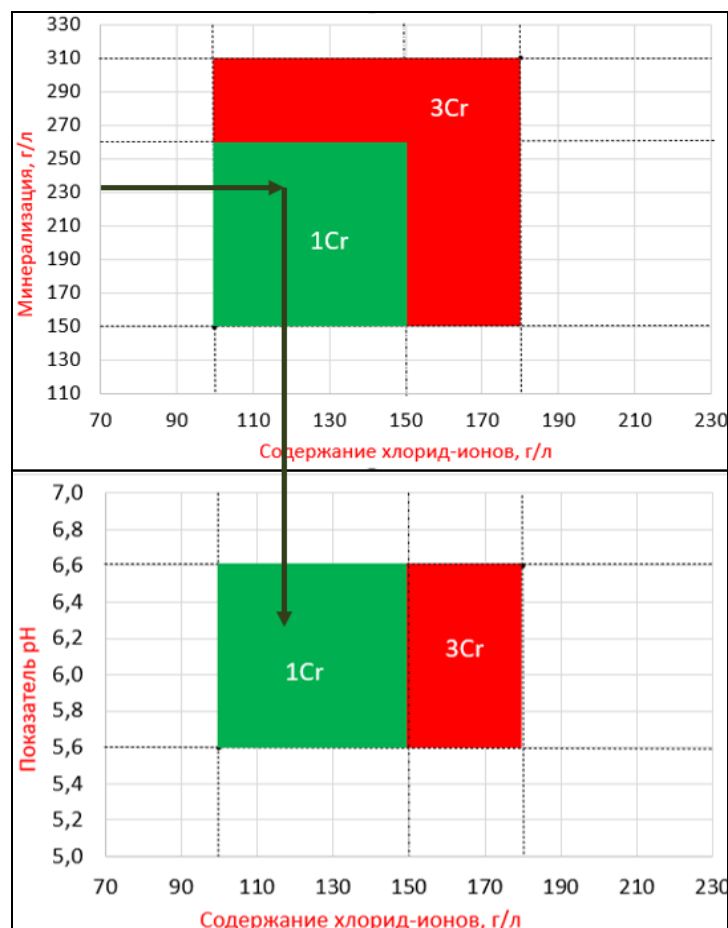


Рис. 4. Номограмма определения условия применимости низколегированных сталей с различным содержанием хрома

Влияние содержания марганца на коррозионную стойкость трубных сталей.

Содержание марганца в трубных сталях марок 30X L80 (1), 32ХГ Р110 не превышает примесного значения (0,80%), при котором он не оказывает существенного влияния на коррозионную стойкость [17]. В сталях марок 25ХГБ К72, 32Г1А N80 (Q), 30ХГМА-1 С90, 37Г2Ф Е содержание марганца составляет 0,85–1,00%, 1,10–1,12%, 1,03–1,15%, 1,50–1,60%, соответственно. Содержание марганца более 1% в среднеуглеродистых сталях снижает их коррозионную стойкость, так как марганец обладает большей активностью в сравнении с железом, что приводит к образованию оксидов и сульфидов марганца. Продукты коррозии, содержащие оксиды и сульфиды марганца, разрыхляются и отслаиваются от поверхности металла из-за разницы параметров кристаллических решеток, что приводит интенсификации процессов проникновения коррозионно-агрессивных компонентов к металлу [15]. Однозначные данные о степени влияния повышенного содержания марганца в трубных сталях НКТ, легированных хромом на уровне 1%, в условиях углекислотной коррозии отсутствуют.

Для определения закономерностей коррозионной деградации низколегированных трубных сталей при различном содержании марганца проведены эксперименты, моделирующие условия Осташковичского нефтяного месторождения, в которых трубные стали с содержанием хрома 1 % показали повышенную коррозионную стойкость. В качестве объектов испытаний были выбраны трубные стали 30Х, 32ХГ и 30ХГМА-1 с содержанием марганца 0,63–0,75 %, 0,64–0,72 %, 1,03–1,15 %, соответственно. Морфология поверхностей испытанных сталей представлена на рис. 5.

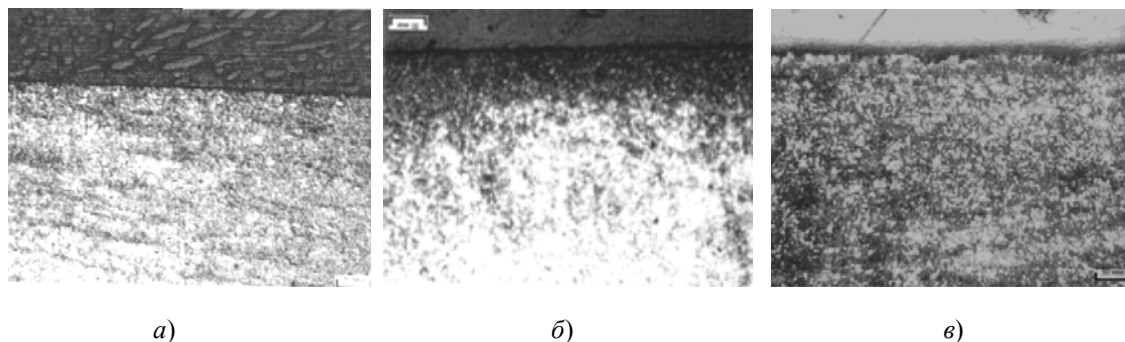


Рис. 5. Морфология поверхностей образцов-свидетелей коррозии из трубных сталей после испытаний, моделирующих эксплуатационные условия Осташковичского нефтяного месторождения (поле зрения снимков 550×400 мкм):
а – 30Х; б – 32ХГ; в – 30ХГМА-1

Полученные результаты свидетельствуют, что при содержании марганца в низколегированной стали 0,63–0,75 % локальная коррозия не происходит, имеет место сплошная коррозия. При повышении содержания марганца до уровня 1,03–1,15 % происходит значительная коррозионная деградация трубной стали. Показатель скорости локальной коррозии достигает значения 3,7 мм/год. Выявленная зависимость скорости локальной коррозии от содержания марганца в составе низколегированных сталей отражена на рис. 6.

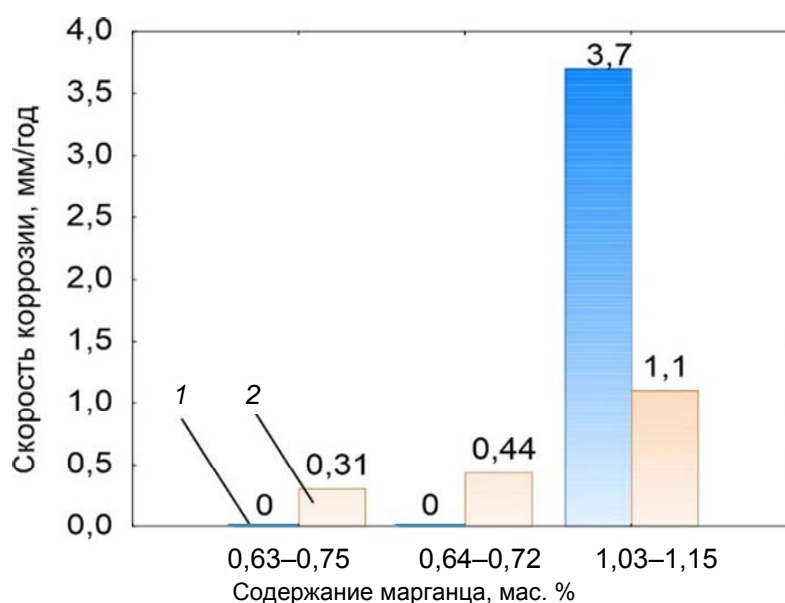


Рис. 6. Зависимость скорости коррозии от содержания марганца в составе низколегированных сталей:
1 – скорость локальной коррозии; 2 – скорость общей коррозии, определенной весовым методом

Таким образом, несмотря на повышенное содержание хрома, марганец оказывает негативное влияние, не позволяя образовываться прочному защитному слою продуктов коррозии.

Для оценки влияния микролегирования трубных сталей кальцием и бором, а также их микроструктуры были проведены стендовые испытания с использованием сталей Voestalpine Tubulars (Австрия) группы прочности L80 (1) и N80 (Q) в сравнении с трубными сталями марок 30X L80 (1) и 32ХГ Р110 для условий Осташковичского нефтяного месторождения. Полученные результаты свидетельствуют, что для всех сталей локальные коррозионные повреждения не образуются, но для стали Voestalpine Tubulars показатель общей коррозии 0,11–0,16 мм/год за год в 2–3 раза ниже, чем для 30X и 32ХГ, составляющий 0,33–0,44 мм/год.

Подобная закономерность для трубных сталей производства Voestalpine Tubulars группы прочности N80 (Q) возможно связана с микролегированием кальцием и бором (0,0019 и 0,0004 %, соответственно), а для трубной стали группы прочности L80 (1) – кальцием, бором и ниобием (0,0024, 0,0001 и 0,0010 %, соответственно). Все данные элементы приводят к получению равномерной мелкозернистой структуры. Измельчение структурных составляющих и их равномерное распределение в металле выравнивает потенциал поверхности, уменьшает ток микропар и снижает скорость коррозии.

Анализ литературных данных показывает отсутствие единой точки зрения о влиянии термообработки, микроструктуры, полосчатости и величины действительного зерна на скорость коррозии [18–20]. На основании проведенных исследований установлено, что трубные стали 30X L80 (1), а также трубные стали производства Voestalpine Tubulars группы прочности N80 (Q), L80 (1), несмотря на полосчатость в 3 балла, показали меньшую скорость локальной коррозии, в сравнении со сталью 32ХГ Р110, имеющей полосчатость в 1 балл. Можно сделать вывод, что для исследуемых условий полосчатость в 3 балла низко- и микролегированных сталей не оказывает влияние на скорость коррозии.

Выявлены существенные отличия протекания коррозионных процессов в зависимости от микроструктуры. Все трубные стали, кроме стали марок 37Г2Ф Е и 25ХГБ К72, после закалки с высоким отпуском имеют мелкозернистую структуру (10-й балл по ГОСТ 5639) «феррит + сорбит». Стали марки 30ХГМА-1 С90 после аналогичной термообработки характеризуются микроструктурой «феррит + сорбит + бейнит». Трубная сталь марки 37Г2Ф Е находится в горячекатаном состоянии, ее микроструктура – «перлит + феррит по границам зерен». Для стали 25ХГБ К72 выявлена разнородная микроструктура «феррит + сорбит», присутствует структура видманштетта, которая свидетельствует о нарушении технологии ее термообработки. Установлено, что среднеуглеродистая трубная сталь в горячекатаном состоянии, имеющая крупнозернистую структуру, подвержена более интенсивным локальным повреждениям в сравнении с аналогичной сталью закалки с высоким отпуском, имеющей мелкозернистую структуру: крупнозернистая микроструктура «перлит + феррит» среднеуглеродистой марганцевистой стали приводит к появлению значительных коррозионных разрушений в виде «бороздок» вдоль направления проката; скорость локальных повреждений возрастает в 1,5 раза по сравнению со сталью, имеющей равномерную мелкозернистую структуру «феррит + сорбит» (10-й балл по ГОСТ 5639). Разнородная структура и наличие структуры видманштетта в трубных сталях, легированных хромом на уровне 1 %, приводят к интенсивным коррозионным разрушениям в виде «бороздок» вдоль направления проката, скорость локальных повреждений соответствует аналогичному показателю среднеуглеродистой марганцевистой стали, при этом наблюдается повышение скорости общей коррозии в 1,2–1,3 раза в сравнении с аналогичной сталью, имеющей

равномерную мелкозернистую структуру. Подобная структура является недопустимой, так как кроме ухудшения прочностных характеристик НКТ приводит к снижению их коррозионной стойкости.

Установлено, что размер действительного зерна оказывает влияние на коррозионную стойкость низколегированных сталей. Низколегированная трубная сталь, имеющая мелкозернистую структуру с размером действительного зерна в 12 баллов по ГОСТ 5639, несмотря на содержание марганца (более 1 %) и более низкое содержание хрома (до 0,3 %), не подвержена локальным коррозионным повреждениям в исследуемых условиях, в то время как трубная сталь с содержанием хрома более 1 % и содержанием марганца более 1 %, имеющая размер зерна в 10 баллов по ГОСТ 5639, подвержена локальным коррозионным повреждениям. Установлено, что повышение коррозионной стойкости стали можно получить при содержании хрома до 0,3 % и при содержании марганца более 1 % при условии мелкозернистой структуры после закалки с высоким отпуском с 12-м баллом зерна по ГОСТ 5639.

Заключение

Обнаружено, что трубные стали, содержащие хром на уровне 1 %, при содержании марганца до 0,8 % не подвержены локальной коррозии, имеет место снижение скорости общей коррозии в 1,7–2,6 раза по сравнению с аналогичной сталью с содержанием марганца более 1 %.

Установлено, что содержание марганца более 1 % в трубных сталях, легированных хромом на уровне 1 %, приводит к снижению коррозионной стойкости. Наблюдается локальная коррозия, сопоставимая по скорости со среднеуглеродистой марганцовистой сталью.

Экспериментально определено, что для исследуемых условий и трубных сталей полосчатость в 3 балла по ГОСТ 1778 низколегированных сталей не оказывает влияние на скорость коррозии.

Показано, что разнотекстурированная структура и наличие структуры видманштетта в трубных сталях, легированных хромом на уровне 1 %, приводят к интенсивным коррозионным разрушениям.

Обнаружено, что низколегированная трубная сталь, имеющая мелкозернистую структуру с размером действительного зерна в 12 баллов по ГОСТ 5639, несмотря на содержание марганца более 1 % и содержание хрома до 0,3 %, не подвержена локальным коррозионным повреждениям в исследуемых условиях, в то время как трубная сталь с содержанием хрома более 1 % и содержанием марганца более 1 %, имеющую размер зерна в 10 баллов по ГОСТ 5639, подвержена локальным коррозионным повреждениям. Показано, что среднеуглеродистая трубная сталь в горячекатаном состоянии, имеющая крупнозернистую структуру, подвержена более интенсивным локальным повреждениям в сравнении с аналогичной сталью после термообработки «закалка + высокий отпуск», имеющей мелкозернистую структуру.

Установлены условия применения трубной стали с содержанием хрома на уровне 1 %: минерализация попутно добываемой воды – 150–260 г/л; содержание хлорид-ионов – 100000–150000 мг/л; показатель pH – 5,6–6,6; максимальная температура скважинной среды – +75 °С; максимальное давление – 15 МПа; максимальная скорость скважинной среды – 0,5 м/с; максимальное содержание углекислого газа в попутно добываемом газе – 0,8 % об.; содержание сероводорода – 0 мг/л.

Установлено, что при минерализации более 260 г/л и содержании хлорид-ионов более 150000 мг/л легирование трубной стали для обеспечения требуемой эксплуатационной надежности должно составлять не менее 3 %. Условия применения стали с содержанием хрома 3 %: минерализация попутно добываемой воды – 150–310 г/л;

содержание хлорид-ионов – 100000–180000 мг/л; показатель pH – 5,6–6,6; максимальная температура скважинной среды – +75 °С; максимальное давление – 15 МПа; максимальная скорость скважинной среды – 0,5 м/с; максимальное содержание углекислого газа в попутно добываемом газе – 0,4 % об.; содержание сероводорода – 0 мг/л.

Показано, что для условий нефтяных месторождений Беларуси, наибольшей коррозионной стойкостью обладает трубная сталь 30X L80(1). Разработаны требования к низколегированным НКТ с учетом полученных результатов: содержание хрома – 0,8–1,1 %; содержание углерода – 0,24–0,32 %; содержание кремния – 0,17–0,37 %; содержание марганца – 0,5–0,8 %; содержание никеля – до 0,25 %; содержание меди – до 0,35 %; содержание серы – до 0,03 %; содержание фосфора – до 0,03 %. Насосно-компрессорные трубы должны быть подвергнуты термообработке «закалка + высокий отпуск»; микроструктура трубной стали должна быть мелкозернистой, однородной, размер зерна не крупнее 10-го балла по ГОСТ 5639; загрязненность стали неметаллическими включениями по ГОСТ 1778 не должна превышать: оксидами точечными, оксидами строчечными, силикатами пластичными, силикатами хрупкими, силикатами недеформирующимися (2 балла по каждому виду включения); сульфидами (1 балл); группа прочности – L80 (1) по стандарту API Specification 5CT.

Практическое применение полученных результатов

На основании полученных результатов установлены требования к характеристикам низколегированных трубных сталей НКТ; определены условия применения низко- и среднелегированных трубных сталей. Трубные стали 30X L80 (1) и 32ХГ Р110, показавшие повышенную коррозионную стойкость при стендовых испытаниях, успешно прошли опытно-промышленную эксплуатацию в условиях нефтяных месторождений Беларуси, подтвердив полученные результаты. В настоящее время проводится промышленное внедрение.

Литература

1. API Specification 5CT. Specification for casing and tubing : 10th ed. – American Petroleum Institute, 2018. – 291 p.
2. Фрейдлин, М. О. Проблема выбора стали для насосно-компрессорных труб, эксплуатируемых в углекислотных средах / М. О. Фрейдлин, С. А. Шадымухамедов // Коррозия «Территории нефтегаз». – 2011. – № 3. – С. 28–34.
3. Валекжанин, И. В. Результаты эксплуатации насосно-компрессорной трубы из стали марки 32Г1А в условиях углекислотной коррозии / И. В. Валекжанин // Инженер. практика. – 2022. – № 2. – С. 4–12.
4. Степанов, С. Г. Борьба с коррозией погружного оборудования на месторождениях ООО «РН-Ставропольнефтегаз» / С. Г. Степанов // Инженер. практика. – 2010. – № 6. – С. 99–104.
5. Богатов, Н. А. Развитие технологии изготовления труб в коррозионностойком исполнении / Н. А. Богатов, А. А. Богатов, Д. Р. Салихьянов // Вестн. Магнитог. гос. техн. ун-та им. Г. И. Носова. – 2015. – Т. 1, № 4. – С. 33–38.
6. Юнусов, Р. Н. Влияние фактора коррозии при добыче нефти и газа в ТПП «Покачевнефтегаз» и методы защиты / Р. Н. Юнусов // Инженер. практика. – 2021. – № 8–9. – С. 12–17.
7. Особенности коррозионно-электрохимического поведения сталей с различным содержанием хрома в углекислотных низкотемпературных средах / А. И. Бирюков [и др.] // Вестн. Юж.-Ур. гос. ун-та. Серия «Химия». – 2017. – Т. 9, № 2. – С. 26–30.

8. Влияние концентрации хрома, температуры и давления CO₂ на коррозионную стойкость насосно-компрессорных труб / И. В. Костицына [и др.] // Вестн. Юж.-Ур. гос. ун-та. Серия «Химия». – 2012. – Вып. 8, № 13. – С. 30–37.
9. Sun, J. Effect of chromium on corrosion behavior of P110 steels in CO₂–H₂S environment with high pressure and high temperature / J. Sun // Materials. – 2016. – Vol. 9. – Mode of access: <https://www.mdpi.com/1996-1944/9/3/200#metrics>. – Date of access: 23.11.2023.
10. Effect of chromium on the pitting resistance of oil tube steel in a carbon dioxide corrosion system / C. F. Chen [et al.] // Corrosion. – 2005. – N 61. – P. 594–601.
11. Карцев, А. А. Гидрогеология нефтяных и газовых месторождений / А. А. Карцев. – М. : Недра, 1972. – 280 с.
12. Воды подземные. Классификация по химическому составу и температуре : ОСТ 41-05-263–86. – Введ. 12.05.86. – М. : ВСЕГИНГЕО, 1986. – 9 с.
13. Standard guide for laboratory immersion corrosion testing of metals : NACE TM0169–2012. – The National Association of Corrosion Engineers, 2012. – 10 p.
14. Борисенкова, Е. А. Механизм образования защитного слоя продуктов углекислотной коррозии на низколегированных сталях с 1 % хрома / Е. А. Борисенкова, М. К. Ионов // Вестн. Самар. гос. техн. ун-та. Серия «Технические науки». – 2015. – № 3 (47). – С. 195–200.
15. Особенности коррозионного разрушения нефтегазопроводных труб в условиях эксплуатации Коми и Западной Сибири / А. В. Иоффе [и др.] // Вектор науки ТГУ. – 2010. – № 4 (14). – С. 50–53.
16. Ueda, M. Effect of microstructure and Cr content in steel on CO₂ corrosion / M. Ueda, A. Ikeda // Corrosion: Mechanism of CO₂ corrosion. – Houston, 2017. – P. 10–25.
17. Лахтин, Ю. М. Материаловедение / Ю. М. Лахтин, В. П. Леонтьева. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Машиностроение, 1980. – 493 с.
18. Коррозионное разрушение металла НКТ и промышленных трубопроводов в условиях эксплуатации и при лабораторных испытаниях / С. С. Петров [и др.] // Инженер. практика. – 2020. – № 5–6. – С. 32–45.
19. Завьялов, В. В. Проблемы эксплуатационной надежности трубопроводов на поздней стадии разработки месторождений / В. В. Завьялов. – М. : ВНИИОЭНГ, 2005. – 332 с.
20. Kermani, B. Depiction of metallurgical parameters as governing CO₂ corrosion / B. Kermani // Mechanism CO₂ and H₂S metal loss corrosion: 10-year review. – Houston, 2017. – P. 205–214.

References

1. *API Specification 5CT. Specification for casing and tubing*. American Petroleum Institute Publ., 2018. 291 p.
2. Freidlin M. O., Shadymukhamedov S. A. Steel selection problem for tubing operating in carbon dioxide environments. *Korroziya. Territoriya Neftegaz = Corrosion. Territory of Neftegaz*, 2011, no. 3, pp. 28–34 (in Russian).
3. Valekzhanin I. V., Tkacheva V. E., Akhmetov E. A., Rusanov A. B., Chebanov A. V., Nikolaev A. A., Presnyakov A. Yu. Results of operation of tubing made of 32Mn1A steel under conditions of carbon dioxide corrosion. *Inzhenernaya praktika = Engineering practice*, 2022, no. 2, pp. 4–12 (in Russian).

4. Stepanov S. G., Corrosion prevention of submersible equipment at «RN-Stavropol-neftegaz» fields. *Inzhenernaya praktika = Engineering practice*, 2010, no. 6, pp. 99–104 (in Russian).
5. Bogatov N. A., Bogatov A. A., Salikhyanov D. R. Development of manufacturing corrosion-resistant tubing technology. *Vestnik Magnitogorskogo tekhnicheskogo universiteta imeni G. I. Nosova = Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University*, 2015, no. 4, pp. 33–38 (in Russian).
6. Yunusov R. N. Influence of corrosion factor during oil and gas production in «Pokachev-neftegaz» and methods of protection. *Inzhenernaya praktika = Engineering practice*, 2021, no. 8–9, pp. 12–17 (in Russian).
7. Biryukov A. I., Kostitsyna I. V., Batmanova T. V., Vorob'eva D. A. Features of electrochemical corrosion behavior of steels with different content of chromium in cold fluids containing carbon dioxide. *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya «Khimiya» = Bulletin of the South Ural state university. Chemistry Series*, 2017, vol. 9, no. 2, pp. 26–30 (in Russian).
8. Kostitsyna I.V., Tyurin A. G., Parshukov V.P., Biryukov A. I. Influence of chromium content, temperature and pressure CO₂ on corrosion resistance of tubing. *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya «Khimiya» = Bulletin of the South Ural state university. Chemistry Series*, 2012, iss. 8, no. 13, pp. 30–37 (in Russian).
9. Sun J. Effect of chromium on corrosion behavior of P110 steels in CO₂-H₂S environment with high pressure and high temperature. *Materials*, 2016, vol.9. Available at: <https://www.mdpi.com/1996-1944/9/3/200#metrics> (access 23 November 2023).
10. Chen C. F., Chang W. F., Zhang Z. H., Lu M. X. Effect of chromium on the pitting resistance of oil tube steel in a carbon dioxide corrosion system. *Corrosion*, 2005, no. 61, pp. 594–601.
11. Kartsev A. A. *Hydrogeology of oil and gas fields*. Moscow, Nedra Publ., 1972. 280 p. (in Russian).
12. OST 41-05-263–86. *Groundwater. Classification by chemical composition and temperature*. Moscow, VSEGINGEO Publ., 1986. 9 p. (in Russian).
13. NACE TM0169–2012. *Standard guide for laboratory immersion corrosion testing of metals*. The National Association of Corrosion Engineers Publ., 2012. 10 p.
14. Borisenkova E. A., Ionov M. K. Patterns and stages of forming a protective layer of CO₂-corrosion products of low-alloy steel with 1 % Cr. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya «Tekhnicheskie nauki» = Vestnik of Samara State Technical University. Series of technical sciences*, 2015, no. 3 (47), pp. 195–200 (in Russian).
15. Ioffe A. V., Revyakin V. A., Borisenkova E. A., Knyaz'kin S. A. Features of corrosion destruction of petrogas pipes under operating conditions Komi and Western Siberia. *Vektor nauki Tol'yattinskogo gosudarstvennogo universiteta = Science Vector of Togliatti State University*, 2010, no. 4 (14), pp. 50–53 (in Russian).
16. Ueda M., Ikeda A. Effect of microstructure and Cr content in steel on CO₂ corrosion. *CorrCompilation. Mechanism of CO₂ corrosion*. Houston, 2017. pp. 10–25.
17. Lakhtin Yu. M., Leont'eva V. P. *Materials Science*. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1980. 493 p. (in Russian).

18. Petrov S. S., Vasin R. A., Knyazeva Zh. V., Andriyanov D. I., Surgaeva E. S. Corrosion damage of tubing and field pipelines metal under operating conditions and during laboratory tests. *Inzhenernaya praktika = Engineering practice*, 2020, no. 5–6, pp. 32–45 (in Russian).
19. Zav'yalov V. V. *Problems of operational reliability of pipelines at the late stage of field development*. Moscow, VNIIOEHNG Publ., 2005. 332 p. (in Russian).
20. Kermani B. Depiction of metallurgical parameters as governing CO₂ corrosion. *Mechanism CO₂ and H₂S metal loss corrosion*. Houston, 2017. pp. 205–214.

Поступила 21.11.2023 г.

УДК 621.791.725

<https://doi.org/10.62595/1819-5245-2024-1-63-71>

OPTIMIZATION OF PARAMETERS FOR PULSED LASER CLADDING OF 30XГСН2А STEEL VIA GENETIC ALGORITHM

Yu. V. NIKITYUK, G. A. BAYEVICH, A. V. MAXIMENKO

*Francisk Skorina Gomel State University,
the Republic of Belarus*

I. Yu. AUSHEV

*State Educational Institution “University of Civil Protection
of the Ministry for Emergency Situations of the Republic
of Belarus”, Minsk*

The paper presents the optimization of pulsed laser cladding of structural steel using a genetic algorithm. Using the ANSYS Workbench software, finite element modelling of laser cladding on a 30XГСН2А steel substrate with an additive in the form of wire was conducted, considering the temperature dependence of the material's thermophysical properties. A surrogate model for pulsed laser cladding of 30XГСН2А steel was developed employing a face-centered version of the central composite design experiment. The time intervals corresponding to the end time of the three fronts of the laser pulse and the diameter of the filler wire were considered as variable factors. The maximum temperatures in the treatment zone were used as responses. In order to optimize pulsed laser cladding of 30XГСН2А steel, the maximum temperature limit values in the treatment zone were established for three moments of time that corresponded to the laser pulse fronts at the three points in the finite element model. A comparison was made between the parameters obtained from optimization and those derived from finite element modelling. When determining temperatures, the maximum percentage error of the results obtained via the genetic algorithm did not exceed 3.5 %.

Keywords: pulsed laser cladding, optimization, MOGA, ANSYS.

For citation. Parameters optimization of pulsed laser cladding of steel 30KHGSN2A using a genetic algorithm / Nikityuk Yu. V., Bayevich G. A., Maximenko A. V., Aushev I. Yu. *Vestnik Gomel'skogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta imeni P. O. Sukhogo*, 2024, no. 1 (96), pp. 63–71 (in Russian). <https://doi.org/10.62595/1819-5245-2024-1-63-71>

ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ИМПУЛЬСНОЙ ЛАЗЕРНОЙ НАПЛАВКИ СТАЛИ 30XГСН2А С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГЕНЕТИЧЕСКОГО АЛГОРИТМА

Ю. В. НИКИТЮК, Г. А. БАЕВИЧ, А. В. МАКСИМЕНКО

*Учреждение образования «Гомельский государственный
университет имени Франциска Скорины»,
Республика Беларусь*

И. Ю. АУШЕВ

*Государственное учреждение образования
«Университет гражданской защиты Министерства
по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь», г. Минск*

В работе с использованием генетического алгоритма выполнена оптимизация импульсной лазерной наплавки конструкционной стали. Конечно-элементное моделирование лазерной наплавки на основу из стали 30XГСН2А присадкой в виде проволоки выполнялось с учетом зависимости теплофизических

свойств материала от температуры в программе ANSYS Workbench. С использованием границентрированного варианта центрального композиционного плана эксперимента была получена суррогатная модель импульсной лазерной наплавки стали 30XГCH2A. В качестве варьируемых факторов эксперимента использовались временные интервалы, соответствующие времени окончания трех фронтов лазерного импульса, и диаметр присадочной проволоки. В качестве откликов использовались максимальные температуры в зоне обработки. Оптимизация импульсной лазерной наплавки стали 30XГCH2A выполнялась при задании предельных значений максимальной температуры в зоне обработки для трех моментов времени, соответствующих фронтам лазерного импульса, в трех точках конечно-элементной модели. Выполнено сравнение параметров, полученных в результате оптимизации, и параметров, полученных в результате конечно-элементного моделирования. При определении температур максимальная относительная погрешность результатов, полученных с использованием генетического алгоритма, не превысила 3,5 %.

Ключевые слова: импульсная лазерная наплавка, оптимизация, MOGA, ANSYS.

Для цитирования. Оптимизация параметров импульсной лазерной наплавки стали 30XГCH2A с использованием генетического алгоритма / Ю. В. Никитюк [и др.] // Вестн. Гомел. гос. техн. ун-та им. П. О. Сухого. – 2024. – № 1 (96). – С. 63–71. <https://doi.org/10.62595/1819-5245-2024-1-63-71>

Introduction

Currently, many technologies such as electron beam processing, ion-beam processing, and gas-flame treatment are utilized to modify the surface properties of products while maintaining the characteristics of the original material. Each of these technologies has specific areas of application; however, laser technologies are the most promising for processing mechanical-engineering parts due to their productivity, flexibility, and ability to process products of various sizes and geometries, as well as create coatings from various materials. Laser processing technologies are categorized into groups according to the heating, melting, and shock loading of materials, which are determined by the laser radiation density and the exposure time. Quenching, alloying, and cladding are among the most prevalent laser processing technologies. Utilizing solid-state lasers for laser cladding is highlighted for attaining the necessary physical, mechanical, and operational properties of surface layers. Laser cladding is known for its high bonding strength between the overlay and the substrate and minimal heat affected zone [1, 2].

Simultaneously, the formation of joints from structural steels during laser cladding might lead to cracking because of the rapid cooling rates of the melt bath. Rapid cooling rates result in the development of substantial thermal stresses, which ultimately weaken the technological strength of the overlay. Using solid-state pulsed-periodic lasers with time-varying radiation intensity and wire filler materials is recommended to tackle this problem. An essential characteristic of pulsed laser cladding is the ability to regulate the heating and cooling rate of the weld metal and the substrate by adjusting the energy and time parameters of the radiation pulses [3–6].

A substantial enhancement in the effectiveness of laser technologies employed in the processing of materials can be achieved through the optimization of the relevant technological parameters via genetic algorithms [7–18]. In this case, the temperatures generated in the laser treated area serve as parameters the determination of which provides the possibility of optimizing the laser cladding parameters.

The present study employs the MOGA (Multi-Objective Genetic Algorithm) of ANSYS Workbench to optimize parameters for pulsed laser cladding of steel 30XГCH2A by circular laser beams with the use of filler materials in the form of wire.

Determination of optimal parameters for pulsed laser cladding of 30XГCH2A steel

The temperatures were calculated using the ANSYS Workbench software. Simulation of laser cladding was conducted on a steel 30XГCH2A substrate using an additive with a diameter $d = 0.2$ mm from the same material. The simulation process considered the temperature dependence of the thermal conductivity coefficient, specific heat capacity, and

density on [19], along with uniform distribution of laser radiation power density over the beam cross-section. Figure 1 illustrates a schematic of laser radiation exposure on both the additive surface and the substrate surface. The finite element model shown in Fig. 1, consisted of 2120 Solid 90 elements and 10182 node units. The laser beam is focused such that the substrate metal absorbs 50 % of the energy while the additive absorbs the remaining 50 % (see Fig. 1).

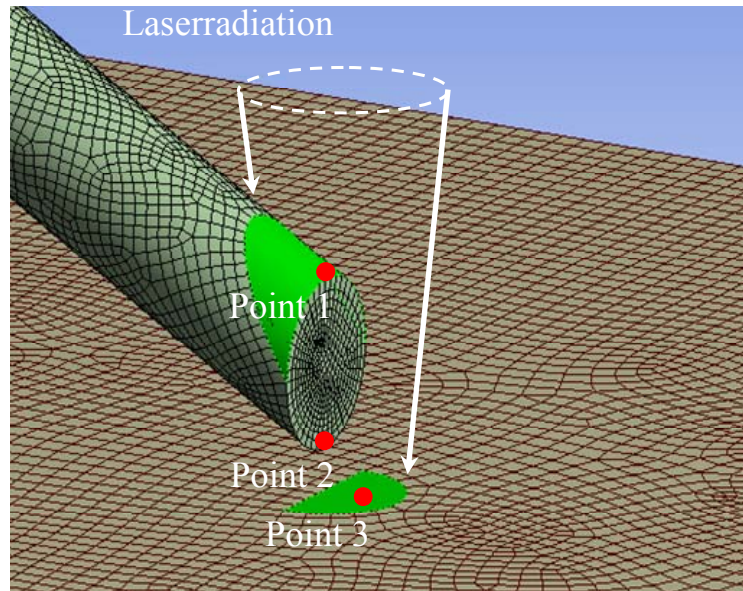


Fig. 1. Finite-element partitioning and a schematic representation of laser radiation exposure on the substrate and additive

The distribution of the laser pulse power density over time was established as follows [5, 6]:

$$p(t) = \begin{cases} \frac{2T_m\lambda}{t_1\sqrt{\alpha\pi}}\sqrt{t}, & 0 < t \leq t_1, \\ \frac{2T_m\lambda}{t_1\sqrt{\alpha\pi}}(\sqrt{t} - \sqrt{t-t_1}), & t_1 < t \leq t_2, \\ \frac{2T_m\lambda}{(t_3-t_2)\sqrt{\alpha\pi}}\sqrt{t-t_2} + q(t_2), & t_2 < t \leq t_3, \end{cases}$$

where λ is the specific thermal conductivity of the additive material; α is the thermal diffusivity of the additive material; T_m is the melting point of the additive material; t_1 is the end time of the first impulse front; t_2 is the end time of the second impulse front; t_3 is the end time of the third impulse front.

The pulse has a rapidly increasing first front that causes the surface of the filler material to melt in the area exposed to the laser, followed by a decreasing second front that causes the entire volume of the filler material to melt. When the third ascending front is applied, the molten metal of the filler material undergoes detachment [5, 6]. Thus, the additive metal in the area exposed to laser radiation is thus heated and melted during the first two-time intervals t_1 and t_2 , which correspond to the end of the first and second fronts of the laser pulse, respectively. At time t_3 , which corresponds to the end of the third front, a droplet of molten metal falls onto the substrate.

Figure 2 displays the distributions temperature fields in the filler wire with a diameter $D = 0.2$ mm at the time moments corresponding to the end of the three fronts of the laser pulse.

Thus, at the time $t_1 = 0.5$ ms, the additive is melted at the introduction of 0.01 mm (Fig. 2, *a*), at $t_2 = 4.0$ ms, the volume of metal additive in the area of laser radiation is completely melted (Fig. 2, *b*), at $t_3 = 4.5$ ms, the surface of the melt is heated to the evaporation temperature (Fig. 2, *c*).

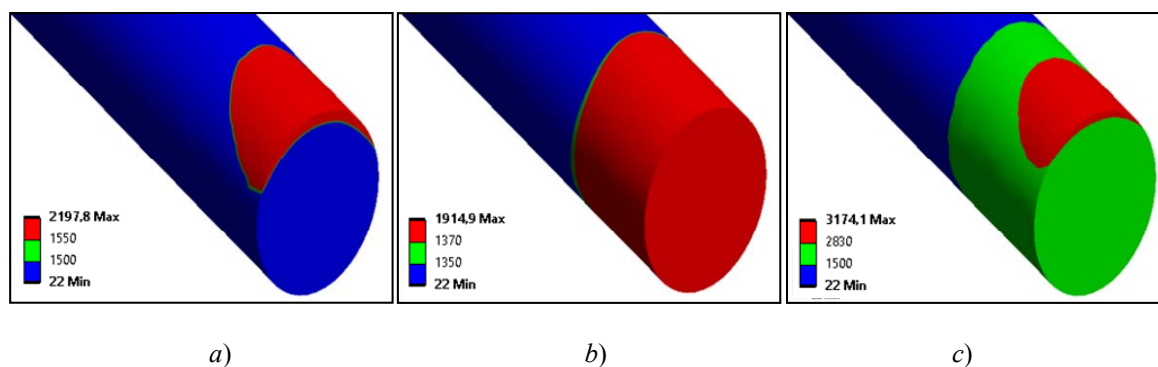


Fig. 2. Distribution of temperature fields in the additive with a diameter of $d = 0.2$ mm:
a – $t_1 = 0.5$ ms; *b* – $t_2 = 4.0$ ms; *c* – $t_3 = 4.5$ ms

It is worth mentioning that in the computational case presented, the laser cladding modes were determined by selecting the durations of the fronts t_1 , t_2 , and t_3 of the laser pulse for a given additive diameter value. This process is time-consuming and demands significant computational resources.

At present, metamodeling is extensively employed; its implementation enables the construction of computational experiment-generated models of complex systems. Models created using this method are referred to be surrogate models or metamodels. Surrogate models are far more computationally efficient than original finite element models. An objective of surrogate modelling is to approximate the values of output parameters based on input parameters, thereby avoiding the need for full calculations. Surrogate modelling is also used to optimize the parameters of technological processes, including the implementation of genetic algorithms, using the models generated [20, 21].

The DesignXplorer module was employed to implement multicriteria optimization of pulsed laser cladding parameters for 30XГCH2A steel with the use of filler materials in the form of wire, in accordance with the procedure outlined in [18].

A four-factor face-centered version of the central composite design experiment was used in the metamodeling. Experiment factors included the diameter D of the filler wire and the time intervals t_1 , t_2 , and t_3 , which corresponded to the durations of three laser pulse fronts. The maximum temperatures in the treatment zone were considered as responses: T1 denoted the temperature on the filler wire surface in the area of laser radiation at the moment of time corresponding to the completion of the first front of the laser pulse; T2 indicated the temperature on the bottom surface of the filler wire at the moment of time corresponding to the completion of the second front of the laser pulse; T3 referred to the temperature on the substrate surface in the area of laser exposure at the moment of time corresponding to the completion of the third front of the laser pulse (Table 1).

Table 1

Experimental design and calculation results

P1 t_1, ms	P2 t_2, ms	P3 t_3, ms	P4 D, mm	P5 $T1, ^\circ\text{C}$	P6 $T2, ^\circ\text{C}$	P7 $T3, ^\circ\text{C}$
0.5	9.5	0.5	0.3	2026	1503	2384
0.4	9.5	0.5	0.3	2076	1508	2384
0.6	9.5	0.5	0.3	2003	1500	2384
0.5	3	0.5	0.3	2026	748	2541
0.5	16	0.5	0.3	2026	1678	2265
0.5	9.5	0.4	0.3	2026	1503	2465
0.5	9.5	0.6	0.3	2026	1503	2307
0.5	9.5	0.5	0.2	2003	1737	2384
0.5	9.5	0.5	0.4	2003	1737	2672
0.4	3	0.4	0.2	2062	1316	2642
0.6	3	0.4	0.2	1966	1311	2641
0.4	16	0.4	0.2	2062	1839	2333
0.6	16	0.4	0.2	1966	1833	2332
0.4	3	0.6	0.2	2062	1316	2465
0.6	3	0.6	0.2	1966	1311	2464
0.4	16	0.6	0.2	2062	1839	2202
0.6	16	0.6	0.2	1966	1833	2202
0.4	3	0.4	0.4	2062	1316	2816
0.6	3	0.4	0.4	1966	1311	2807
0.4	16	0.4	0.4	2062	1839	2495
0.6	16	0.4	0.4	1966	1833	2494
0.4	3	0.6	0.4	2062	1316	2674
0.6	3	0.6	0.4	1966	1311	2668
0.4	16	0.6	0.4	2062	1839	2385
0.6	16	0.6	0.4	1966	1833	2385

Figures 3 demonstrate the dependencies of input parameters on output parameters.

A response surface linking the output parameters ($T1, T2, T3$) to the factors (t_1, t_2, t_3, D) was created using the nonparametric regression method [22].

The following criteria were used to evaluate the resulting regression models:
determination coefficient

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (d_i - y_i)^2}{\sum_{i=1}^n (d_i - \bar{d})^2}.$$

Root Mean Square Error (RMSE):

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (d_i - y_i)^2},$$

where d_i is the values determined via the finite element method, y_i is the values determined using regression models.

The values of the determination coefficients for the output parameters $T1, T2, T3$ possess values equal to 0.9993, 0.9984, 0.9987, respectively. The RMSE values for the temperatures $T1, T2, T3$ are 1.1 °C, 10.8 °C, 6.0 °C, respectively.

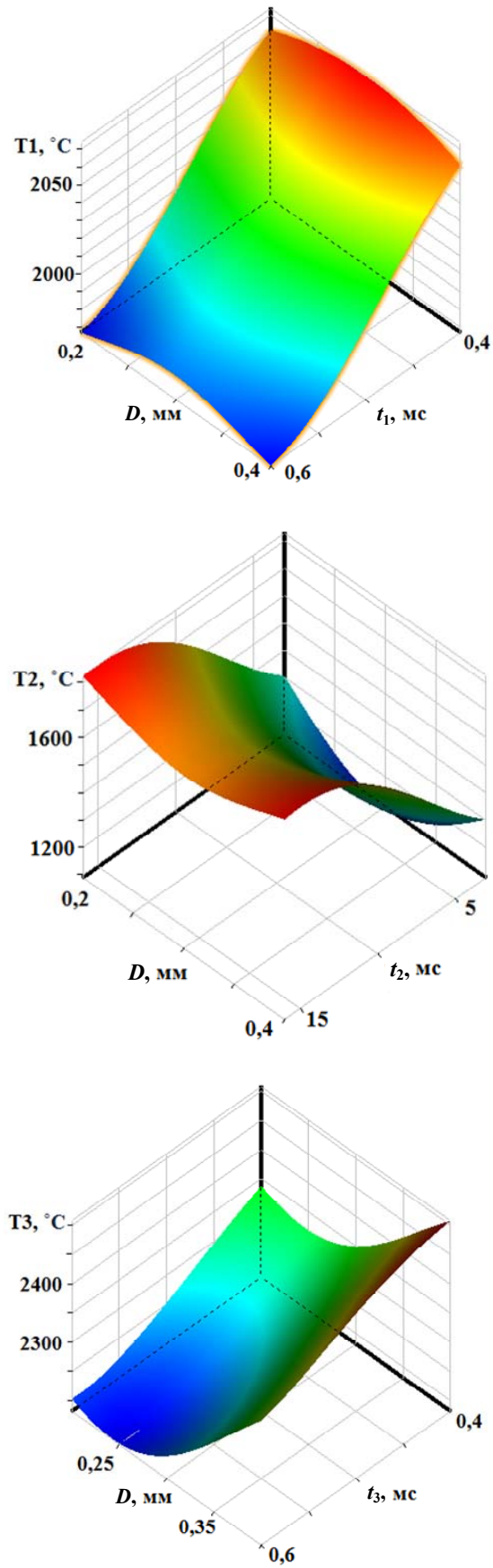


Fig. 3. Dependence of input parameters on output parameters

This may indicate the presence of the required agreement between the surrogate model and the finite element analysis data.

The optimization process was performed using MOGA of the DesignXplorer module. The number of individuals of the initial population was equal to 500 and the number of individuals per iteration was equal to 500.

The laser cladding process of 30XГCH2A steel was optimized in accordance with the given problem formulation:

- to minimize metal evaporation during the cladding process, it is crucial that the temperature of the additive surface (Fig. 1, point 1) at the end of the first laser pulse front be above the melting temperature and below the evaporation temperature of the additive metal;

- to ensure the transfer of the molten metal of the additive to the substrate, it is necessary that its entire volume be melted within the zone of laser radiation exposure at the moment of the end of the second pulse front. This means that the temperature of the bottom surface of the additive (Fig. 1, point 2) must not fall below the melting point of the additive metal;

- to form a reliable cladding joint, the temperature of the substrate surface (Fig. 1, point 3) at the end of the third pulse front must exceed the melting point of the substrate metal, but remain below the vaporization temperature.

Using the genetic algorithm, the three optimal variants of laser pulse front duration for the additive with a diameter of $D = 0.25$ mm were identified (refer to Table 2). The values of parameters derived through finite-element calculations are enclosed in brackets. When determining temperatures, the maximum percentage error of the results determined via MOGA did not exceed 3.5 %.

Table 2

Optimization results

P1 t_1 , ms	P2 t_2 , ms	P3 t_3 , ms	P4 D , mm	P5 $T1$, °C	P6 $T2$, °C	P7 $T3$, °C
0.54	15.44	0.56	0.25	1997 (2026)	1756 (1753)	2173 (2205)
0.58	14.98	0.55	0.25	1986 (1993)	1759 (1743)	2187 (2210)
0.42	14.22	0.55	0.25	2066 (2076)	1763 (1734)	2199 (2229)

Conclusion

This work provides the finite element modeling of pulsed cladding of 30XГCH2A steel with filler material in the form of wire. A surrogate model of the process under study was created using a four-factor face-centered version of the central composite design of numerical experiment and the nonparametric regression approach. By employing MOGA, this research established the feasibility of multicriteria optimization of parameters for pulsed laser cladding of steel with a maximum percentage error no more than 3.5 % in determining the temperatures within the laser treatment zone. The parameters of the laser pulse were found through multicriteria optimization to effectively carry out the process of laser cladding of steel 30XГCH2A.

References

1. Grigoryants A. G., Shiganov I. N., Misyurov A. I. *Technological processes of laser processing*. Moscow, MGTU Bauman Publ., 2006. 664 p. (in Russian).

2. Devoyno O. G., Kardapolova M. A., Kalinichenko A. S., Zharsky V. V., Vasilenko A. G. *Technology of formation of wear-resistant coatings on the iron base by laser processing methods*. Minsk, Belorusskii natsional'nyi tekhnicheskii universitet, 2020. 280 p. (in Russian).
3. Maksimenka A. V. *Technology of restoration of details surfaces of aviation technics pulsing laser weld deposit. Abstract of Ph. D. thesis*. Minsk, 2011. 27 p. (in Russian).
4. Maximenko A. V., Myshkovets V. N., Bayevich G. A. Influence of laser pulse duration on the properties of welded high-strength steels. *Vestnik Gomel'skogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta imeni P. O. Sukhogo*, 2013, no. 2, pp. 61–66 (in Russian).
5. Bayevich G. A., Maximenko A. V., Myshkovets V. N. Dynamics of thermal cycles formation during pulsed laser welding and cladding of high-strength structural steels. *Vestnik Gomel'skogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta imeni P. O. Sukhogo*, 2016, no. 1, pp. 38–44 (in Russian).
6. Bayevich G. A., Maximenko A. V., Myshkovets V. N. Peculiar features of chromium additive melting depending on the shape of laser radiation pulse in welding and cladding processes. *Avtomaticheskaya svarka = Automatic Welding*, 2015, no. 2 (740), pp. 28–31 (in Russian).
7. Bessmeltsev V. P., Bulushev E. D. Optimization of Laser Micromachining Regimes. *Avtometriya*, 2014, no. 6, pp. 3–21 (in Russian).
8. Parandoush P., Hossain A. A review of modeling and simulation of laser beam machining. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2014, no. 85, pp. 135–145.
9. Nikitjuk Yu. V., Serdyukov A. N., Aushev I. Y. Optimization of two-beam laser cleavage of silicate glass. *Journal of Optical Technology*, 2022, no. 89, pp. 121–125.
10. Nikitjuk Yu., Sereda A., Serdyukov A., Shalupaev S., Aushev I. Parametric optimization of silicate-glass-based asymmetric two-beam laser splitting. *Journal of Optical Technology*, 2023, vol. 90, iss. 6, pp. 296–301. <https://doi.org/10.1364/JOT.90.000296>
11. Nikitjuk Yu. V., Serdyukov A. N., Ma J., Wang L., Aushev I. Y. Optimisation of parameters for laser cleaving of silicate glasses using U-shaped beams. *Vestnik Gomel'skogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta imeni P. O. Sukhogo*, 2023, no. 4, pp. 30–39.
12. Nikitjuk Yu. V., Prokhorenko V. A., Kulyba A. I. Multi-criteria optimization of quartz glass laser cutting parameters using neural network simulation and genetic algorithm. *Problemy fiziki, matematiki i tekhniki*, 2023, no. 3, pp. 26–31 (in Russian).
13. Nikitjuk Yu., Prokhorenko V., Semchenko A., Kovalenko D. Multi-criteria optimization of quartz glass laser cleaving parameters via neural network simulation and genetic algorithm. *2023 7th International Conference on Information, Control, and Communication Technologies (ICCT)*, Astrakhan, Russian Federation, 2023, pp. 1–3. <https://doi.org/10.1109/ICCT58878.2023.10347113>
14. Nikitjuk Yu., Prokhorenko V., Semchenko A., Kovalenko D. Optimization of quartz sol-gel glass cutting parameters by elliptical laser beams using neural network simulation and genetic algorithm. *Recent Advances in Technology Research and Education. Inter-Academia 2023. Lecture Notes in Networks and Systems*, vol. 939. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-54450-7_34
15. Nikitjuk Yu., Bayevich G., Myshkovets V., Maximenko A., Aushev I. Characterization of lasercladding of steel 30XГCH2A by combining artificial neural networks and finite element method. *Research and education: traditions and innovations. Inter-Academia 2021*.

- Lecture notes in networks and systems*, vol. 422. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-19-0379-3_28
16. Nikitjuk Yu. V., Bayevich G. A., Maximenko A. V., Myshkovets V. N., Aushev I. Yu. Application of finite element method and artificial neural networks for determining parameters of laser treatment of 12X18H9T steel. *Vestnik Gomel'skogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta imeni P. O. Sukhogo*, 2022, no. 1, pp. 48–55 (in Russian).
 17. Nikitjuk Yu. V., Bayevich G. A., Myshkovets V. N., Maximenko A. V., Aushev I. Yu. Optimization of parameters of 12X18H9T steel processing using circular laser beams. *Vestnik Gomel'skogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta imeni P. O. Sukhogo*, 2022, no. 2, pp. 17–24 (in Russian).
 18. Bayevich G. A., Nikitjuk Yu. V., Myshkovets V. N., Maximenko A. V., Aushev I. Yu. Optimization of 12X18H9T-steel processing by ring laser beams. *Nauka i tekhnika = Science & Technique*, 2023, no. 22 (3), pp. 186–192. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-22-3-186-192> (in Russian).
 19. Zinoviev V. E. *Thermo physical properties of metals at high temperatures: handbook*. Moscow, Metalurgia Publ., 1989. 384 p. (in Russian).
 20. Koziel S., Leifsson L. *Surrogate-based modeling and optimization*. New York, Springer Publ., 2013. 412 p.
 21. Jiang P., Zhou Q., Shao X. *Surrogate model-based engineering design and optimization*. Berlin, Heidelberg, Springer Publ., 2020. 240 p.
 22. Santner T. J., Williams B. J., Notz W. I. *The design and analysis of computer experiments*. New York, Springer New York Publ., 2003. 285 p. <https://doi.org/10.1007/978-1-4757-3799-8>

Поступила 05.03.2024 г.

УДК 004.94:625.142

<https://doi.org/10.62595/1819-5245-2024-1-72-81>

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ СОСТАВНОЙ ДЕРЕВЯННОЙ ШПАЛЫ С УЧЕТОМ ПОЕЗДНОЙ НАГРУЗКИ

А. Б. НЕВЗОРОВА

*Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого»,
Республика Беларусь*

В. В. РОМАНЕНКО

Учреждение образования «Белорусский государственный университет транспорта», г. Гомель

Описан процесс создания 3D-модели составной деревянной шпалы (СДШ) с учетом физических и виртуальных компонентов древесины «сосна». Проведен прочностной анализ шпалы на стадии сборки. Предложена расчетная схема напряжений в СДШ от воздействия подвижного состава. Смоделировано влияние поездной нагрузки на прочность соединения составных элементов шпалы. В результате расчета установлено отсутствие превышения прочностных пределов, что свидетельствует о возможности СДШ выдержать нагрузку от колес подвижного состава до 50 кН без потери надежности в соединениях между элементами.

Ключевые слова: 3D-моделирование, составная деревянная шпала, поездная нагрузка, прочность, рельсовое соединение, ресурс.

Для цитирования. Невзорова, А. Б. Имитационное моделирование несущей способности составной деревянной шпалы с учетом поездной нагрузки /А. Б. Невзорова, В. В. Романенко // Вестн. Гомел. гос. техн. ун-та им. П. О. Сухого. – 2024. – № 1 (96). – С. 72–81 (in Russian). <https://doi.org/10.62595/1819-5245-2024-1-72-81>

SIMULATION MODELLING OF THE LOAD-BEARING CAPACITY OF COMPOSITE WOODEN SLEEPERS TAKING INTO ACCOUNT TRAIN LOAD

A. B. NEVZOROVA

*Sukhoi State Technical University of Gomel,
the Republic of Belarus*

V. V. ROMANENKO

Belarusian State University of Transport, Gomel

In this article the process of a composite wooden sleeper 3D-model creating is described, taking into account the physical and virtual components of pine wood. A strength analysis of the sleeper was carried out at the assembly stage. A calculation scheme of pressure in composite wooden sleeper due to the impact of rolling stock is proposed. The influence of train load on the connection strength of sleeper components was modelled. As a result of the calculation, it was established that the strength limits were not exceeded, which indicates the ability of a composite wooden sleeper to withstand a load from rolling stock wheels of up to 50 kN without loss of reliability in the connections between the elements.

Keywords: 3D-modeling, composite wooden sleeper, train load, strength (durability), rail connection, resource.

For citation. Nevzorova A. B., Romanenko V. V. Simulation modelling of the load-bearing capacity of composite wooden sleepers taking into account train load. *Vestnik Gomel'skogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta imeni P. O. Sukhogo*, 2024, no. 1 (96), pp. 72–81 (in Russian). <https://doi.org/10.62595/1819-5245-2024-1-72-81>

Введение

Несмотря на интенсивное расширение полигона железобетонных шпал, деревянные шпалы в настоящее время востребованы для криволинейных железнодорожных путей малого радиуса, стрелочных переводов, подъездных и подкрановых путей, расположенных как на станционных путях общего пользования, так и на территории предприятий. На сегодняшний день потребность в деревянной шпалопродукции для Белорусской железной дороги обеспечивает ОАО «Борисовский шпалопродукционный завод», в результате производственной деятельности которого остается значительное количество так называемых «остатков» брусьев. Образовавшиеся остатки не имеют широкой сферы реализации и зачастую используются как топливный материал, что существенно снижает значимость ценной древесины, качество которой подразумевает ее применение в виде конструктивных элементов [1], служащих опорой для рельсов, равномерно распределяя нагрузку от поезда на плотный балласт и земляное полотно.

Количество эксплуатируемых стрелочных переводов на деревянных брусьях, после изготовления которых образуются такие остатки, а также отсутствие тенденции значительного снижения их в следующие годы позволяет сформировать задачу по применению остатков деревянных пиловочных брусьев в качестве составной деревянной шпалы (СДШ) [2].

Анализ существующих конструктивных схем СДШ [3–5] выявил необходимость разработки принципиально новой конструкции шпалы и ее исследования для дальнейшего применения на железнодорожном пути в качестве подрельсового основания.

Для реализации производства СДШ требуется проведение исследования, которое предполагает осуществление эксперимента с изучением реальных образцов. Такое исследование несомненно занимает важное место в ходе принятия решения по внедрению СДШ в производство, но даже на первоначальной стадии требует материальных затрат. Одним из первоначальных вариантов практического эксперимента для получения предварительных данных о непосредственной возможности либо невозможности изготовления и дальнейшего использования СДШ в качестве подрельсового основания, а также конкретизации способа проведения эксперимента может стать имитационное моделирование. Для этого необходимо разработать 3D-модель для определения характера поведения и предположительных характеристик исследуемой системы [6].

Цель данного исследования состоит в выборе компонентов для разрабатываемой имитационной модели и подтверждении теоретической возможности применения СДШ в качестве подрельсового основания с учетом моделирования напряжений и прилагаемой поездной нагрузки от колеса на рельс.

Постановка задач

Имитационное моделирование позволяет конструировать модель составной деревянной шпалы как реальной системы и провести эксперименты на основе этой модели с целью проверки функционирования системы «шпала – рельс». В качестве инструмента использовался программный комплекс Autodesk Inventor [7], с помощью которого предполагается решить следующие задачи:

– разработка модели составной деревянной шпалы с соблюдением основных типоразмеров и сечения соединения [8];

- исследование спроектированной модели на предмет восприятия нагрузки от подвижного состава и передачи ее через рельсы на шпалу;
- использование модели для определения возможности изготовления составной шпалы и дальнейшего практического эксперимента.

Создание модели составной деревянной шпалы с применением программного комплекса Autodesk Inventor

В разрабатываемой модели предлагается использование трех элементов, изготавливаемых из остатков брусков, которые между собой сращиваются, т. е. соединяются продольно. Одним из вариантов соединения без дополнительного крепления является способ сращивание впритык – «ласточкин хвост». Двойное сращивание элементов позволяет применять остатки длиной для размера a – 1,25 м и более, для b – 0,75 м и более (рис. 1).

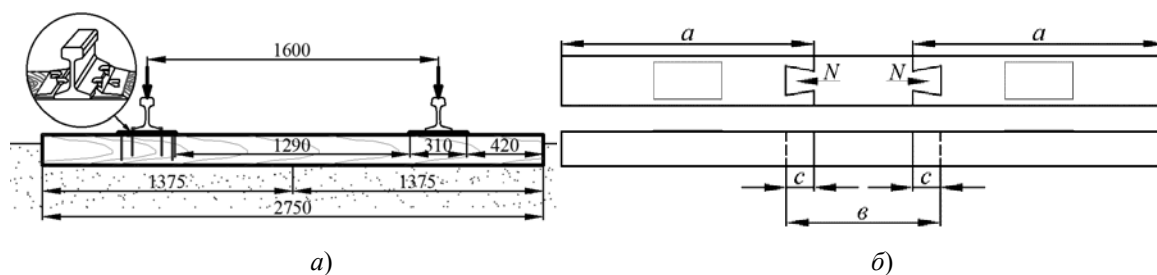


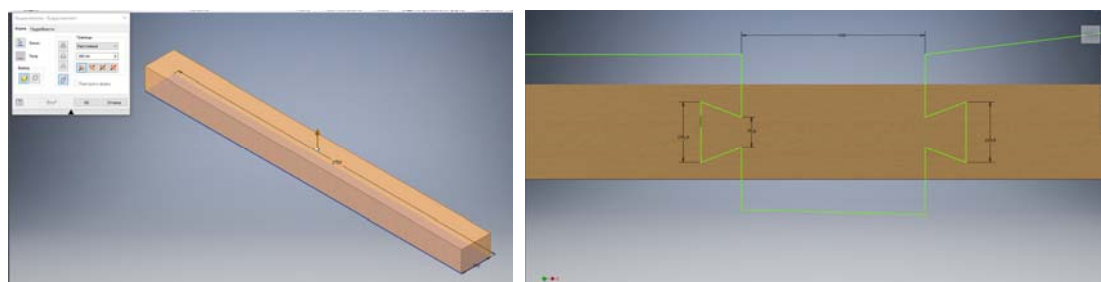
Рис. 1. Конструктивная схема составной деревянной шпалы с двойным сращиванием:
 a – общая схема; b – схема расположения элементов составной деревянной шпалы

Для обеспечения равномерного восприятия поездной нагрузки длина крайних элементов СДШ должна определяться условием симметричности каждого из них относительно оси рельса. Исходя из длины шпалы 2750 мм и расстояния между осями рельсов 1600 мм, размер a будет равен 1150 мм. Длина среднего элемента b станет зависеть от длины шипа c . В случае если $c \leq 150$ мм, то размер среднего элемента будет b в пределах 750 мм.

Коллекции, входящие в состав программного комплекса Autodesk Inventor, позволяют создавать полнофункциональные электронные макеты изделий и сборок, а также применять необходимые технические системы и управляющие параметры на трехмерной модели. Кроме того, Autodesk Inventor основывается на технологии трехмерного параметрического моделирования, включая технологию адаптивного моделирования, что обеспечивает при изменении размера одного элемента возможность изменить сопряженные с ним другие элементы модели.

Поставленная задача 3D-моделирования – с помощью трехмерной графики разработать визуальный объемный образ СДШ, основанный на реальных размерах деревянной шпалы [8].

Трехмерная модель формируется из отдельных конструктивных элементов, разработка большинства которых начинается с построения эскиза. Создание модели производится путем сдвига контура или его вращения вокруг заданной оси. Процесс выполнения компьютерного моделирования должен совпадать с предполагаемыми этапами (технологическим процессом) изготовления СДШ (рис. 2).



а)

б)

Рис. 2. Создание модели составной деревянной шпалы из цельнобрусковой шпалы:

а – модель цельнобрусковой шпалы I типа;

б – проектирование соединений

Создание узлов скрепления

Инструментальные средства Autodesk Inventor обеспечивают полный цикл конструирования, в процессе которого при создании модели СДШ из отдельных элементов реализуется процедура обеспечения их строгой взаимосвязи друг с другом для последующей точной сборки общей конструкции в целом.

Пользовательская модель дает возможность разрабатывать конструкции соединений независимо от конфигурации конструкции, ее параметров или размеров. Для этого необходимо определить критерии сборки деталей, в нашем случае это следующие размеры:

- высота, ширина и длина шпалы (принята согласно I типу) соответственно 180, 250, 2750 мм;
- узкий размер шипа – 80 мм;
- широкий размер шипа – 160 мм;
- длина шипа – 150 мм;
- расстояние от края шипа до боковой грани шпалы – 45 мм.

Размеры соединения для моделирования были приняты исходя из условия обеспечения прочности древесины при растяжении вдоль волокон, на которое оказывают влияние величина боковой составляющей транспортной нагрузки, условия предполагаемой эксплуатации СДШ, качество древесины и т. п. Прочность соединения обеспечивается в том случае, когда напряжения, возникающие от боковой силы, действующей на соединение, не будут превышать расчетное значение прочности древесины при растяжении вдоль волокон:

$$\sigma_{t,o,d} = \frac{N_d}{A_{net}} \leq f_{t,o,d} = f_{t,o,k} \frac{K_{sys} K_h K_{mod}}{\gamma_m}, \quad (1)$$

где N_d – боковая сила, действующая на шпалу от подвижного состава, кН, (рис. 2, б); A_{net} – площадь поперечного сечения шпалы, м²; $f_{t,o,d}$ – расчетное значение прочности древесины при растяжении вдоль волокон; $f_{t,o,k}$ – характеристическое значение прочности древесины при растяжении вдоль волокон; K_{sys} – коэффициент, учитывающий изменение прочности материала в элементах системы, соединенных посредством клея или механических связей; K_h – коэффициент, учитывающий изменение прочности древесины при растяжении вдоль волокон в зависимости от высоты поперечного сечения по отношению к стандартной высоте; K_{mod} – коэффициент модификации (приведения), учитывающий изменение прочности древесины или материала

на ее основе в зависимости от продолжительности действия нагрузки и условий эксплуатации; γ_m – частный коэффициент для свойств материалов и изделий, учитывающий погрешности модели и отклонения размеров.

Определение соответствия отдельных элементов на различных частях СДШ базируется на том, как детали узла должны располагаться в сборках, а именно: размер «паза» должен соответствовать размеру «шипа» (рис. 3 и 4).

Технологии адаптивного конструирования, реализованные в Autodesk Inventor, позволяют определить размеры и пространственное расположение деталей автоматически. При этом не требуется прорисовывать все элементы конструкции каждой детали соединения с большой точностью, так как их конфигурация определяется непосредственно в сборках на основе того, как детали соединения стыкуются друг с другом [9].

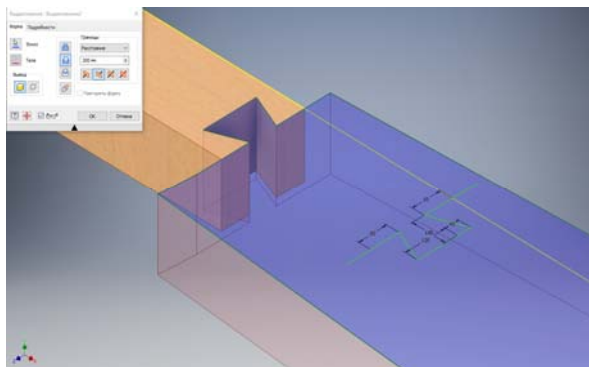


Рис. 3. Моделирование крайних блоков

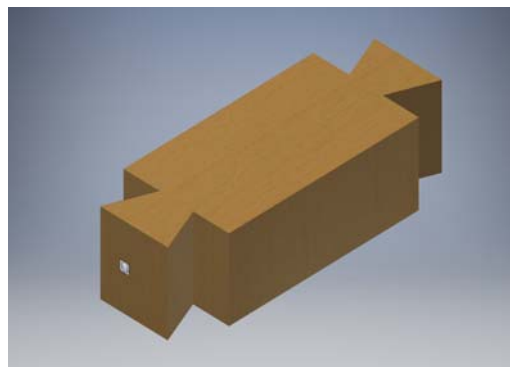


Рис. 4. Моделирование среднего блока

Выбор компонентов для разрабатываемой модели

Деревянные шпалы изготавливают из сосны либо ели 1, 2, 3 сортов. Соответственно для оценки работы модели ей необходимо придать свойства материала. В Inventor материалы представляют собой комбинации различных типов наборов характеристик, имитирующих природный материал, которые называются компонентами.

Используются материалы двух компонентов – физических и представлений модели, первые из которых обладают характеристиками самого материала, вторые – обеспечивают визуальную реализацию материала, например, цвет, текстуру, зернистость.

Информация о составе материала находится в разделе «Физические параметры», такие параметры возможно использовать для определения массы, площади и объема конструкции, а также прочностных и физических характеристик.

Дерево является ортотропным материалом, т. е. обладающим уникальными и независимыми механическими и термическими свойствами вдоль трех взаимно перпендикулярных направлений X , Y , Z . Исходя из этого значения механических показателей, например, модуль Юнга, коэффициент Пуассона и модуль сдвига по каждой из осей X , Y , Z будут одинаковыми.

Материалу «сосна» соответствуют определенные параметры:

- *механические:*
 - плотность – $0,570 \text{ г/см}^3$;
 - модуль Юнга (характеристика способности материала сопротивляться растяжению, сжатию при упругой деформации) – $12066,469 \text{ МПа}$;

- коэффициент Пуассона (показатель отношения относительного поперечного сжатия к относительному продольному растяжению) – 0,37;
- модуль сдвига (характеристика способности материала сопротивляться сдвиговой деформации) – 663,656 МПа;
- *прочностные:*
 - предел прочности древесины при статическом изгибе (в зависимости от породы – 75–155 МПа при влажности 12 %) – 90,326 МПа;
 - предел прочности при сжатии вдоль волокон (в зависимости от породы – 40–60 МПа при влажности 12 %) – 50,128 МПа;
 - предел прочности при сжатии поперек волокон (для всех пород – около 50 МПа) – 5,600 МПа;
 - предел прочности при продольном сдвиге – 9,600 МПа;
 - предел прочности при растяжении вдоль волокон (для всех пород – 130 МПа) – 79,983 МПа;
 - предел прочности при растяжении поперек волокон – 3,241 МПа;
 - модуль среднего натяжения – 12066,469 МПа;
 - предел текучести – 0,000 МПа.

Создание трехмерного соединения подрельсового узла

Рельсовые крепления (промежуточные рельсовые крепления) – важнейший элемент верхнего строения пути, так как он в значительной степени определяет надежность прикрепления рельса к шпале, геометрические параметры и параметры пространственной жесткости рельсовой колеи. От подобных показателей во многом зависят условия взаимодействия пути и подвижного состава.

При воздействии боковой составляющей нагрузки от колес подвижного состава рельс не должен изменять уровень своей подуклонки (1 : 20 внутрь колеи относительно вертикальной оси рельса). Воздействие значительной (при высоких скоростях движения локомотива) динамической составляющей транспортной нагрузки вызывает незначительные отклонения рельса относительно своей вертикальной оси, но с учетом того, что в настоящее время деревянные шпалы эксплуатируются на станционных железнодорожных путях и путях необщего пользования, подобные перемещения возможно не учитывать.

При моделировании наличие промежуточного крепления реализовано за счет жесткого прикрепления рельса к шпале, что практически соответствует правильной установке прикрепителей в реальных условиях эксплуатации (рис. 5).

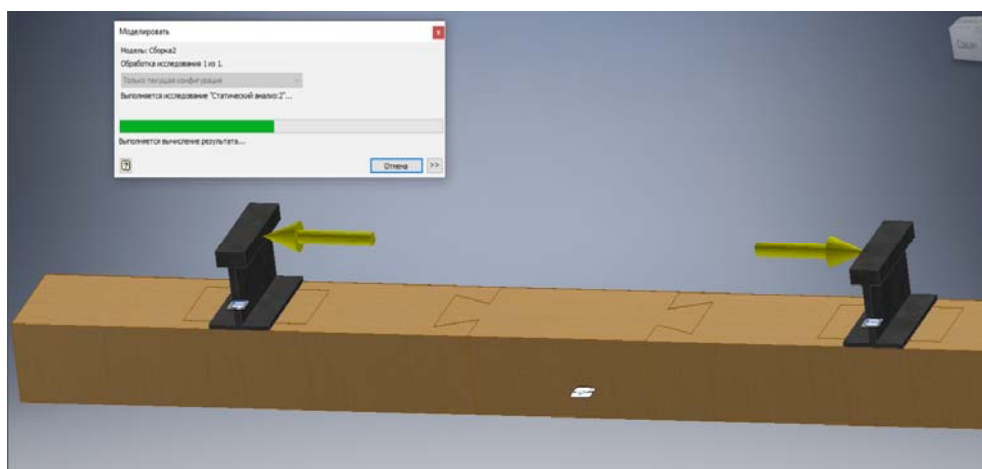


Рис. 5. Моделирование боковой составляющей транспортной нагрузки

Результаты моделирования

Использование современных САПР дает возможность не только создавать цифровые прототипы будущих конструкций, но и проводить инженерный анализ спроектированных моделей. Комплекс Autodesk Inventor также содержит среду прочностного анализа элементов, позволяющую реализовать проверку моделей без испытания опытных образцов.

Inventor имеет встроенный инструмент анализа прочности, базирующийся на методе конечных элементов, для прогнозирования поведения модели под действием различных сил, а также величин деформаций, напряжений и перемещений, для определения возможности выдерживания конструкцией нагрузки в конкретных условиях ее эксплуатации.

При передаче нагрузки от подвижного состава в элементах верхнего строения железнодорожного пути возникают напряжения, величина которых и определяет надежные условия эксплуатации как отдельного элемента в отдельности, так и всего железнодорожного пути в целом.

Используя возможность, предоставленную средой «Анализ напряжений», на полученную модель СДШ накладываем нагрузку 50 кН и как результат – получаем запас прочности шпалы методом конечных элементов, эквивалентные напряжения по Мизесу от воздействия подвижного состава. Для цельнобрусковых шпал максимальная концентрация напряжений возникает в подрельсовой зоне, которые будут «затухать» приближаясь, с одной стороны, к середине шпалы и, с другой, к концу шпалы. Так как СДШ предполагает наличие трех элементов, соединенных между собой, распределение концентрации напряжения будет иным (рис. 6).

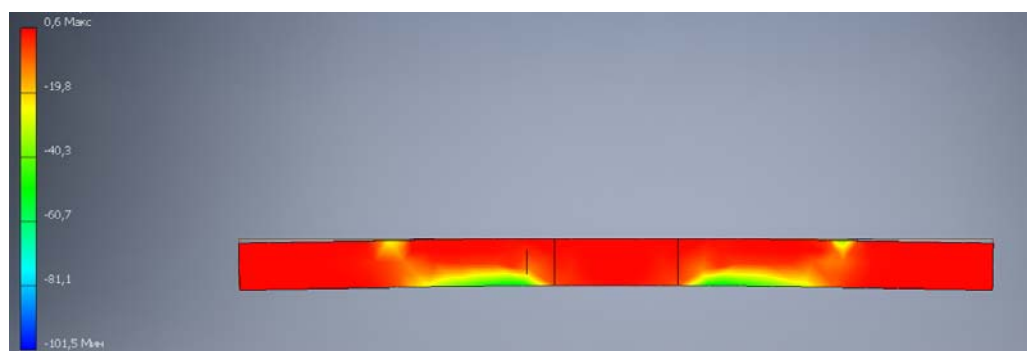


Рис. 6. Распределение напряжений в СДШ от воздействия колес подвижного состава (вид сбоку)

Распределение напряжений соответствует цветовой схеме-шкале визуализации результатов расчета с метками максимального (красный цвет) и минимального (синий цвет) значений напряжений (рис. 7). Анализ конструкции позволил определить, как будут работать элементы при различных нагрузках и надо ли улучшить конструкцию. Согласно цветовой шкале распределения напряжений, установлено, что максимальные напряжения распределяются по верхней постели шпалы, минимальные – по нижней, при этом они сконцентрированы в зоне широкого размера соединения. Следовательно, в разработанной конструкции СДШ отсутствуют критические точки напряжения и отказа.

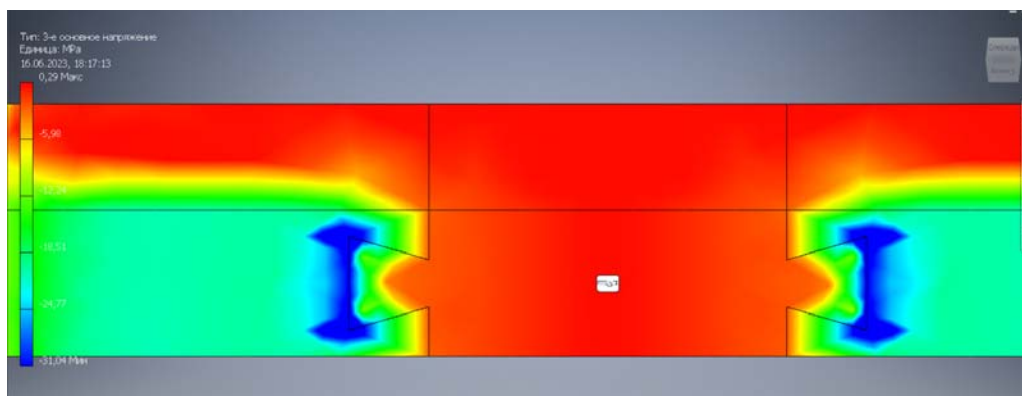


Рис. 7. Распределение напряжений в составной деревянной шпале от воздействия колес подвижного состава (нижняя постель)

В процессе моделирования СДШ в среде прочностного анализа Autodesk Inventor были выполнены следующие операции:

- создана модель СДШ согласно размерам деревянной шпалы I типа, которая включает в себя набор атрибутов по материалу конструкции, прочностным и физическим характеристикам, соответствующим материалу «сосна»;

- спроектирована схема нагружения рельсового узла поездной нагрузкой для определения возможности ее восприятия рельсами и передачи на составляющие элементы шпалы;

- проведен прочностной расчет с анализом схемы распределения напряжений во всех элементах СДШ, а также определения возможности изготовления СДШ и проведения практического эксперимента.

Согласно принципам визуализации распределения напряжений Autodesk Inventor, положительный знак напряжений означает, что на верхней постели шпалы возникают растягивающие напряжения, а на нижней – сжимающие.

В реальных условиях эксплуатации шпалы различные напряжения по верхней и нижней постелям возникают из-за жесткого прикрепления рельса к шпале за счет промежуточного скрепления. Схема распределения напряжений (рис. 7) повторяет принцип реального распределения напряжений, что указывает на адекватность разработанной модели СДШ и правильность проектирования основных узлов конструкции.

Заключение

Полученные сведения о максимальных и минимальных растягивающих и сжимающих напряжениях СДШ и прочих важных характеристиках позволяют установить возможные места измерений и контроля при проведении практического эксперимента. Визуализация модели дает возможность оценить поведение элементов СДШ при восприятии поездной нагрузки 50 кН с целью обеспечения достаточной прочности мест сращивания брусьев, определить такие контрольные места для более подробного изучения их после изготовления образцов СДШ и укладки последних в путь, как:

- угловые участки длинного размера шипа по верхней постели шпалы (возникновение сжимающих напряжений в зоне растяжения);

- угловые участки длинного размера шипа по нижней постели шпалы (максимальные сжимающие напряжения);

- зона шипа по нижней постели шпалы (интенсивный переход растягивающих напряжений в сжимающие).

Работа выполнена в рамках отдельного проекта научно-исследовательских работ Министерства образования Республики Беларусь на 2023–2024 гг. (номер государственной регистрации 20231587 от 17.10.2023 г. Тема «Научное обоснование ресурсосберегающей технологии изготовления и применения составных деревянных шпал»).

Литература

1. Романенко, В. В. Комплексный подход к оценке факторов, влияющих на надежность работы деревянных шпал / В. В. Романенко, А. Б. Невзорова // Тр. БГТУ, Сер. 1. Лес. хоз-во, природопользование и перераб. возобновляемых ресурсов. – 2023. – № 1 (264). – С. 147–155.
2. Романенко, В. В. Сбережение древесины при рациональном изготовлении железнодорожной продукции / В. В. Романенко // Экология родного края: проблемы и пути их решения : материалы XVIII Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием, Киров, 24–25 апр. 2023 г. / Вят. гос. ун-т. – Киров, 2023. – С. 365–369.
3. Составная шпала : пат. 2256020 RU, МПК Е 01 В 3/10, В 27 М 3/14 / Л. А. Занегин ; заявитель Иркут. науч.-исслед. ин-т лес. пром-сти : заявл. 08.01.04 ; опубл. 10.07.05, Бюл. № 29.
4. Составная композиционная шпала для железных дорог : пат. 2536569 RU, МПК Е 01 В 3/10 (2006.01) / В. Я. Бершацкий ; заявитель Урал. гос. ун-т путей сообщения : заявл. 15.03.13 ; опубл. 27.12.14, Бюл. № 36.
5. Божелко, И. К. Физико-механические свойства комбинированных деревянных шпал / И. К. Божелко // Тр. БГТУ, Сер. 1. Лес. хоз-во, природопользование и перераб. возобновляемых ресурсов. – 2018. – № 2 (210). – С. 211–217.
6. Сембина, Г. К. Моделирование как средство проектирования сложных систем / Г. К. Сембина // Механика и технологии. – 2015. – № 1 (47). – С. 94–100.
7. Амангельдиева, А. А. Использование графических редакторов Autocad Autodesk и Autodesk Inventor в качестве инструментов проектирования в трехмерной системе автоматизированного проектирования / А. А. Амангельдиева, А. Т. Кишубаева // Вестн. Астрах. гос. техн. ун-та. – 2021. – № 1 (71). – С. 7–14.
8. ГОСТ 78–2014. Шпалы деревянные для железных дорог широкой колеи. Общие технические условия. – Введ. 01.03.16. – Минск : Гос. ком. по стандартизации Респ. Беларусь, 2016. – 18 с.
9. Корягина, О. М. Моделирование сборочных единиц и создание их чертежей в среде программы Autodesk Inventor / О. М. Корягина, С. В. Корягин // Cloud of Science. – 2018. – Т. 5, № 1. – С. 60–73.

Referens

1. Romanenko V. V., Nevzorova A. B. Comprehensive approach to the assessment of factors affecting the reliability of wooden sleepers. *Trudy Belorusskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta. Serija Lesnoe hozjajstvo*. Minsk, 2023, no. 1 (264), pp. 147–155 (in Russian).
2. Romanenko V. V. Saving wood in the sustainable manufacture of railway products. *Ekologiya rodnogo kraya: problemy i puti ih resheniya: materialy XVIII Vserossijskoj nauchno-prakticheskoy konferencii s mezhdunarodnym uchastiem, Киров, 2023 g.* [Ecology of the Native Land: Problems and Ways to Solve Them: Proceedings of the XVIII All-Russian Scientific and Practical Conference with International Participation, Kirov, 2023]. Kirov, Vyatskii gosudarstvennyi universitet, 2023, pp. 365–369 (in Russian).

3. Zanegin L. A. Composite sleeper. Patent Rossiiskaya Federatsiya, no. 2256020, 2005 (in Russian).
4. Bershatskii V. Ya. Composite sleeper for railways. Patent Rossiiskaya Federatsiya, no. 2536569, 2014 (in Russian).
5. Bozelko I. K. The physico-mechanical properties of combined wooden sleepers. *Trudy Belorusskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta. Serija Lesnoe hozjajstvo*. Minsk, 2018, no. 2 (210), pp. 211–217 (in Russian).
6. Sembina G. K. Modeling as a tool for designing complex systems. *Mekhanika i tekhnologii = Mechanics and technology*, 2015, no. 1 (47), pp. 94–100 (in Russian).
7. Amangel'dieva A. A., Kishubaeva A. T. The use of Autocad Autodesk and Autodesk Inventor graphic editors as design tools in a three-dimensional computer-aided design system. *Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2021, no. 1 (71), pp. 7–14 (in Russian).
8. GOST 78–2014. *Sleepers, wooden, for broad-gauge railways*. Minsk, Gosudarstvennyi komitet po standartizatsii Respubliki Belarus', 2016. 18 p. (in Russian).
9. Koryagina O. M., Koryagin S. V. Modeling assembly units and creating their drawings in the Autodesk Inventor software environment. *Cloud of Science*. 2018, no. 1, pp. 60–73 (in Russian).

Поступила 02.02.2024 г.

УДК 621.311

<https://doi.org/10.62595/1819-5245-2024-1-82-98>

КЛЮЧЕВЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ И МИРОВЫЕ ПРАКТИКИ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ И НАДЕЖНОСТИ ВОДОСНАБЖЕНИЯ

А. А. КАПАНСКИЙ

*Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого»,
Республика Беларусь*

Представлен обзор современных исследований и практических разработок в области повышения эффективности и надежности систем водоснабжения. Анализ охватывает как микроуровень, включающий оптимизацию работы отдельных компонентов системы, так и макроуровень, связанный с управлением и оптимизацией работы системы водоснабжения в целом. Особое внимание уделено вопросам повышения эффективности насосных агрегатов, управлению утечками и потерями напора, а также оптимизации процессов очистки воды. На макроуровне рассмотрены стратегии оптимального распределения воды между водозаборами, изучены зоны влияния водозаборов на гидравлическую сеть, дана характеристика динамического планирования давления и управления электропотреблением насосных станций. Подчеркнута значимость систем мониторинга и диагностики для повышения надежности систем водоснабжения. Выявлены ключевые направления исследований и актуальные проблемы, а также предложены перспективные подходы к улучшению управления городскими системами водоснабжения.

Ключевые слова: эффективность водоснабжения, насосные агрегаты, утечки воды, оптимизация водоснабжения, мониторинг и диагностика, управление давлением, электропотребление, искусственный интеллект, IoT-технологии.

Для цитирования. Капанский, А. А. Ключевые направления и мировые практики повышения эффективности и надежности водоснабжения / А. А. Капанский // Вестн. Гомел. гос. техн. ун-та им. П. О. Сухого. – 2024. – № 1 (96). – С. 82–98. <https://doi.org/10.62595/1819-5245-2024-1-82-98>

KEY DIRECTIONS AND GLOBAL PRACTICES OF EFFICIENCY AND RELIABILITY IMPROVEMENT OF WATER SUPPLY

A. A. KAPANSKY

*Sukhoi State Technical University of Gomel,
the Republic of Belarus*

The article reviews modern research and practical developments in the field of increasing the efficiency and reliability of water supply systems. The analysis covers both the micro level, which includes optimizing the operation of individual components of the system, and the macro level, related to the management and optimization of the water supply system as a whole. Particular attention is paid to improving the efficiency of pumping units, leaks and pressure losses management, as well as water treatment processes optimization. At the macro level, the article presents a review of strategies for the optimal distribution of water between water intakes, a study of the zones of water intakes influence on the hydraulic network, dynamic pressure planning and power consumption management of pumping stations. The importance of monitoring and diagnostics systems for increasing the reliability of water supply systems is emphasized. Key areas of research and current problems are identified, and promising approaches to improving the management of urban water supply systems are proposed.

Keywords: water supply efficiency, pumping units, water leaks, water supply optimization, monitoring and diagnostics, pressure control, power consumption, artificial intelligence, IoT technologies.

For citation. Kapansky A. A. Key directions and global practices of efficiency and reliability improvement of water supply. *Vestnik Gomel'skogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta imeni P. O. Sukhogo*, 2024, no. 1 (96), pp. 82–98 (in Russian). <https://doi.org/10.62595/1819-5245-2024-1-82-98>

Введение

В современном мире системы водоснабжения в крупных городах представляют собой высокоорганизованные и сложные структуры, направленные на обеспечение непрерывной и эффективной подачи питьевой воды к потребителям. Эти системы, как показывают научные исследования, функционируют как многоуровневые комплексы, которые адаптируются к широкому спектру изменяющихся задач и внешних воздействий [1, 2]. В условиях растущей глобализации и урбанизации вопрос обеспечения надежного и эффективного водоснабжения населенных пунктов приобретает особую актуальность. В этих условиях спектр основных задач, определяющих стратегии развития водоканалов, включает в себя не только обеспечение экономичности технологических процессов, но и соблюдение стандартов качества воды, поддержание нормативного давления в сетях, минимизацию утечек, снижение рисков аварий и производственных сбоев.

Мировые тенденции развития централизованных систем водоснабжения направлены на постоянную модернизацию и обновление существующих сетей, внедрение энергоэффективного оборудования и применение современных информационно-аналитических технологий, включая методы искусственного интеллекта и продвинутые алгоритмы оптимизации. Комплекс этих задач способствует повышению надежности систем водоснабжения, что крайне важно для обеспечения непрерывного доступа к питьевой воде нормативного качества.

Поскольку проблематика водоснабжения охватывает целый ряд различного рода вопросов, существует множество подходов и решений, которые на данный момент не имеют единой систематизации. Это создает необходимость в комплексном анализе различных стратегий и мировых практик, позволяющих повысить эффективность и надежность систем водоснабжения. Важно понимать, что каждое решение должно учитывать как технические, так и экономические аспекты, а также быть адаптировано к конкретным условиям и особенностям водоканалов. В этом контексте данное исследование представляет собой попытку систематизировать существующие методы и подходы, а также выявить наиболее перспективные направления для будущих исследований.

Целью настоящей работы является выявление и анализ современных стратегий и подходов, направленных на повышение эффективности и надежности систем водоснабжения. Это включает в себя изучение последних разработок в области энергосберегающих технологий и инновационных методов оптимизации работы водопроводных сетей. Особое внимание уделяется анализу примеров из практик водоканалов Беларуси, что позволяет оценить реальный опыт внедрения и адаптации современных технологий в условиях конкретной страны. Представлен всесторонний обзор существующих и потенциально возможных решений в области управления системами водоснабжения, что актуально как для ученых, так и для специалистов, работающих в данной сфере.

Научная значимость публикации заключается в комплексном анализе и систематизации современных подходов и технологий в вопросах повышения эффективности и надежности водоснабжения. Практическая значимость обусловлена возможностью использования полученных результатов для масштабирования опыта на региональном и национальном уровнях. Особое внимание уделяется аспектам устойчивости систем водоснабжения к различным внешним воздействиям, что является критически важным для обеспечения бесперебойного доступа к питьевой воде.

Материалы и методы

В рамках анализа городского водоснабжения важно учитывать всю сложность и многоуровневость технологии, включающей водозаборные сооружения, насосные станции первого и второго подъема, установки водоподготовки, резервуары чистой воды, повысительные насосные станции и водопроводные сети. Каждая из этих подсистем вносит свой вклад в общую эффективность и устойчивость системы водоснабжения, требуя индивидуального подхода к анализу, управлению и оптимизации. При исследовании отдельных элементов системы водоснабжения необходимо учитывать не только применяемые в мировой практике технические аспекты, но и вопросы экономичности, надежности и бесперебойности транспортировки воды.

В процессе подготовки данной публикации был проведен тщательный анализ научной литературы, охватывающий современные стратегии повышения энергоэффективности и бесперебойности водоснабжения. Исследование основывалось на данных крупных научных баз, таких как eLibrary.ru, Scopus и Google Академия, с использованием продвинутых поисковых стратегий. Процесс отбора литературы включал анализ научной актуальности, методологической строгости и цитируемости публикаций. Такой подход позволил выделить наиболее значимые и актуальные статьи, имеющие научную ценность в предметной области исследования.

В контексте анализа системы городского водоснабжения подходы к повышению эффективности целесообразно разделить на микро- и макроуровни. На микроуровне акцент делается на исследовании режимов работы отдельных насосов и оборудования и состоит из детального анализа эффективности каждого компонента системы, включая такие характеристики, как производительность, давление, общие и удельные расходы электропотребления. На макроуровне исследуются системные свойства водоснабжения, учитывающие вопросы прогнозирования и управления электропотреблением [3], кластеризации режимом потребления воды и оптимизации работы всей сети в целом [4].

Для каждой стадии подъема воды (первого и второго подъемов, а также повысительных насосных станций) необходимо изучение современных путей повышения эффективности, апробированных в практических условиях. Так, для одиночных районных скважин в практике водоснабжения широкое применение находит частотное регулирование производительности насоса, что отражается в многочисленных исследованиях [5, 6]. Простота монтажа оборудования позволяет не только оптимизировать потребление электроэнергии, но и увеличить срок службы оборудования, так как регулирование частоты вращения рабочего колеса насоса способствует снижению его износа [7].

Структура водоканалов часто определяется как группами скважин в рамках водозаборов, так и отдельными скважинами населенных пунктов, обеспечивающими водоснабжение через водонапорные башни. Эта конфигурация позволяет гибко управлять водными ресурсами, обеспечивая надежное водоснабжение потребителей, удаленных от централизованных систем. Одной из альтернатив повышения эффективности таких объектов является применение двигателей на постоянных магнитах. Так, группа ученых Уральского федерального университета провела сравнительный анализ энергетических потерь в электроприводах насосов с регулируемой скоростью работы для асинхронных и синхронных двигателей, представленный в статье [8]. Авторами выполнено обширное моделирование и ряд экспериментов, доказав, что при работе двигателей в повторно-кратковременном режиме общий коэффициент полезного действия насоса с синхронным приводом на 7,9–11,5 % выше, чем с асинхронным.

Следует отметить, что модернизация скважин с помощью синхронных двигателей привела к заметному улучшению общей эффективности на ряде объектах водоснабжения Беларуси. Наглядный пример внедрения эффективных технологий – деятельность в сфере энергосбережения руководства водоканала г. Жлобина, в результате которого произведена замена главного скважинного насоса на водозаборе «Лебедевский» с установкой синхронного двигателя на постоянных магнитах мощностью 32 кВт. Подтвержденный экономический эффект способствовал дальнейшей замене большей части скважин Жлобинского района на двигатели энергоэффективных серий, используя насосное оборудование от ОАО «Завод Промбурвод», известное своими инновационными решениями в данной области.

Несмотря на значительные успехи в автоматизации насосных систем и внедрении высокоэффективных приводов, в сфере водоснабжения остаются актуальными некоторые нерешенные задачи. Одной из ключевых является разработка методов оценки потенциала энергосбережения насосных установок, работающих на водонапорные башни. Исследования показывают, что во многих случаях насосы поднимают воду, создавая избыточный напор, который фактически превышает необходимый для нормальной эксплуатации системы [9]. Оптимизация частоты работы насоса, отличной от стандартных 50 Гц, на основе расчетов подъема воды может значительно снизить энергопотребление. Кроме того, использование частотно-регулируемых приводов сокращает затраты за счет обеспечения плавности пуска насосов, что, в свою очередь, снижает механические нагрузки на оборудование и обеспечивает предотвращение гидравлических ударов в системе. Вместе с этим при снижении давления необходимо учитывать уменьшение производительности насоса, что требует разработки алгоритма для правильной настройки регулятора давления, который будет балансировать между минимизацией электропотребления и удовлетворением потребностей в воде.

В вопросе повышения эффективности водоснабжения особое внимание уделяется снижению потерь напора в трубах и уменьшению утечек воды. Недавние исследования в этой области представляют большой интерес. Статья А. Абу-Махфуза и соавторов [10] вносит весомый вклад в область управления водными ресурсами, особенно в контексте снижения потерь питьевой воды. Основной акцент в исследовании делается на разработке реальной динамической модели гидравлики водоснабжения. Эта модель фокусируется на трех основных компонентах: обнаружении фоновых утечек, управлении давлением и прогнозировании потребности в воде. Авторы предложили алгоритм, который позволяет локализовать потенциально критические узлы или трубы с высоким уровнем утечек в сети. Это дает возможность проводить целенаправленное управление давлением в этих местах, что оказывает значительное влияние на эффективность водоснабжения.

Сотрудники департамента искусственной среды университета Аалто в Финляндии, С. Ахопелто и Р. Вахала в своей статье [11] представили анализ затрат и выгод от различных методов сокращения утечек воды, включая зонирование счетчиков, снижение давления и реновацию труб. Они пришли к выводу, что предпринимаемые меры для управления потерями воды не всегда являются экономически выгодными для коммунальных предприятий с умеренным уровнем утечек в сетях водоснабжения. В контексте этого исследования интересной является работа китайского ученого П. Ченга, опубликованная в 2021 г. [12]. В этой публикации приводятся результаты анализа влияния изменений давления в различных диаметрах труб на снижение утечек в системе распределения воды. Работа П. Ченга дополняет исследование Ахопелто и Вахала, предоставляя более глубокое понимание того, как изменения давле-

ния в трубопроводах могут влиять на величину потерь, что становится важным фактором в оптимизации работы систем водоснабжения и выборе экономически оправданных стратегий по модернизации трубопроводной сети.

В Беларуси частные компании активно работают над усовершенствованием систем диагностики водоснабжения, что находит отражение в проекте «Акватория» фирмы ООО «Техникон». Согласно информации из открытых источников [13], одним из применяемых методов диагностики утечек является анализ ночных расходов воды на протяжении длительного времени и их сравнение с базовыми показателями. Любое отклонение от базового уровня расхода рассматривается как индикатор потенциальной утечки. Кроме того, для повышения надежности водоснабжения используются генетические алгоритмы в диагностике насосов. Еще один важный аспект диагностики – проверка обратных клапанов, что также способствует повышению эффективности системы. Стоит отметить, что публикации, описывающие использование этих алгоритмов в деталях, в открытом доступе отсутствуют. Это указывает на потенциальную уникальность и инновационность применяемых методов, а также на необходимость дальнейшего изучения этой области.

Исследования эффективности отдельных скважин неизбежно приводят к анализу путей повышения эффективности и для группы насосов, которые объединяют скважины в единую сеть. Это позволяет переходить от изолированного рассмотрения отдельного объекта к пониманию их взаимодействия в рамках широкомасштабной схемы городского водоснабжения. Отдельные элементы формируют собственную сеть микроуровня, где взаимное влияние скважин друг на друга и вопросы их оптимизации активно исследуются в настоящее время [14].

В зарубежных источниках научные работы акцентируют внимание на важности применения алгоритмов оптимизации при управлении насосами водопроводной сети [15–17]. Широкий спектр исследований в водоснабжении включает разработку информационно-коммуникационных систем, генетических алгоритмов, нечеткой логики и методов на основе нейронных сетей [18–20]. Это способствует эффективному обнаружению утечек, снижению потерь воды и эксплуатационных расходов, улучшению качества воды и снижению общего удельного энергопотребления [16].

Водоканалы областных центров Беларуси выбирают стратегию комплексной модернизации водозаборов. Здесь ключевой особенностью является не столько замена низкоэффективного оборудования, сколько внедрение интеллектуальных систем управления водопользованием, способных самостоятельно адаптироваться к текущим условиям работы без жесткой привязки к расходно-напорным характеристикам [22]. В контексте станции первого подъема стоит обратить внимание на схему взаимосвязи водозабора «Ипуть» г. Гомеля, представленную на рис. 1. В такой системе включение насосов регулируется оператором станции в зависимости от объемов водопотребления и уровня воды накопительных резервуарах. Вместе с тем современные пути адаптивного управления насосными станциями основаны на анализе текущих потребностей в воде и его непрерывном прогнозировании.

Переменный состав включения насосов, определяемый спросом водопотребления, создает сложную целевую функцию с нелинейной эффективностью. Это подразумевает, что повышение коэффициента полезного действия одного насоса не гарантирует аналогичное улучшение общей экономичности системы микроуровня. Более того, в определенных случаях это может привести к снижению общего группового удельного расхода электроэнергии при подъеме воды, особенно, если взаимное влияние между насосами приводит к нежелательному перераспределению рабочих точек их расходно-напорных характеристик в менее эффективные зоны. Исследования, проводимые на базе Гомельского водоканала, подтверждают, что влияние одних насосов на

соседние может вызывать эффект передавливания, который отражается сильной корреляцией давлений на оголовке скважин близлежащих насосов (см. таблицу). Это подчеркивает важность комплексного подхода к управлению системой насосного оборудования.

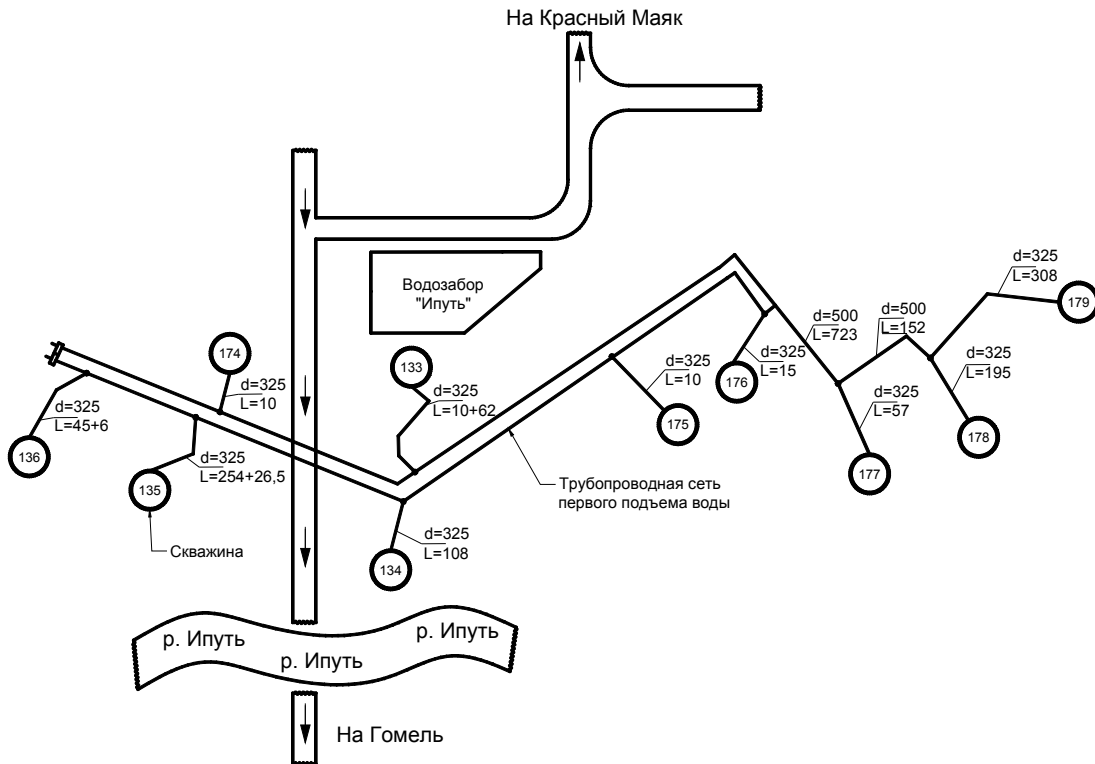


Рис. 1. Пример сети микроуровня первого подъема расположения скважин водозабора «Ипуть»

Оценка корреляции Пирсона для давления на оголовке между скважинами водозабора «Ипуть»

Номер скважины	133	134	135	174	175	176	178	179
133	1							
134	0,98	1						
135	0,61	0,63	1					
174	0,87	0,85	0,5	1				
175	0,6	0,62	0,3	0,55	1			
176	0,12	0,12	0,02	0,19	0,11	1		
178	0,21	0,23	0,1	0,28	0,26	0,14	1	
179	0,21	0,2	0,05	0,23	0,08	0,18	-0,43	1

В задачах оптимизации прикладного уровня особую актуальность приобретают математические модели, которые могут учитывать и предсказывать не только эффекты взаимного влияния скважин, но и различные операционные факторы, такие как изменение спроса на воду, износ оборудования и прочие эксплуатационные характеристики, включая изменяющийся динамический уровень скважины. В этом контексте особую ценность обретает полезная модель, представленная в патенте № 27710 U1 [17]. Здесь приводится детальное описание взаимодействия элементов

управления и планирования режимов работы насосов на различных уровнях подъема воды, а также схемы подключения датчиков, фиксирующих ключевые параметры гидравлической сети. Отличительной особенностью является способность модели корректировать действия запорной арматуры, тем самым регулируя производительность насосов в реальном времени, обеспечивая оптимизацию потока воды и эффективность использования ресурсов, в том числе в сложной климатической среде.

В условиях возможного промерзания трубопроводов требования к оптимизации процессов подачи воды существенно усложняются. В статье [18], посвященной повышению экономической эффективности насосных станций первого подъема в среде колеблющейся температуры окружающей среды, представлена математическая модель, которая учитывает возможность образования наледи в трубах и предлагает механизмы предотвращения таких явлений. Эта модель ориентирована на снижение затрат электроэнергии, основываясь на детальном анализе и прогнозировании различных эксплуатационных сценариев.

В данном контексте особо актуальными становятся исследования, проведенные М. Асламом, Н. Реддичарлой, А. Эльмансуром и К. Альшехи, посвященные разработке алгоритмов для раннего выявления отказов электрических погружных насосов [19], что может быть адаптировано для повышения надежности систем водоснабжения в условиях низких температур. Использование машинного обучения для прогнозирования критических параметров, таких как температура воды и давление в системе, может помочь в своевременном обнаружении и предотвращении аварий оборудования. Тестирование модели на исторических данных показало точность прогнозов на уровне 70%. Разработанные модели были внедрены для работы в реальном времени, предоставляя инженерам ежедневные прогнозы вероятности поломок.

В последние годы водный сектор столкнулся с серьезными вызовами, связанными с разработкой интеллектуальных систем водоснабжения, направленных на повышение эффективности и устойчивости сетей. Одна из ключевых сложностей в этом процессе – интеграция оборудования от различных производителей в общую цифровую платформу, что требует гибкости и совместимости систем. Здесь актуальными остаются механизмы оценки гидравлических характеристик сети в реальном времени, используя технологии быстрого монтажа IoT-устройств для сбора и передачи данных и их интеграции в систему веб-диспетчеризации. Такой подход позволяет не только эффективно управлять ресурсами, но и оперативно реагировать на изменения в системе, что критически важно в условиях экстремальных температурных колебаний, приводящих к риску промерзания трубопроводов.

Интеграция современных алгоритмов искусственного интеллекта и машинного обучения в технологический процесс водоснабжения не обходится без использования цифровых сенсоров. Это является перспективным направлением в исследованиях, особенно в условиях внезапных порывов и других нештатных ситуаций [20]. Результаты работы авторов А. Садегиуна, Н. Метье, Д. Чепмен, С. Энтони, опубликованные в 2014 г., представляют значительный интерес для разработки системы превентивных мер предупреждения аварий в гидравлике [21]. Ввиду того, что с 2009 по 2010 г. в Великобритании примерно 3281 мегалитр воды был потерян из-за неисправностей или утечек в водопроводных сетях, авторы предложили применение новой технологии измерения давления, основанной на датчике, который неинвазивно монтируется к стенке трубы с помощью зажима. Они предположили, что все трубы в той или иной степени расширяются под давлением, и поэтому возникающая контактная сила способна измеряться цифровыми устройствами и передаваться на сервер обработки данных. На основе этой силы рассчитывалось относительное изменение внутреннего давления, по отношению к которому делалась оценка возможных утечек.

Работа А. Садегиуна и его коллег [21], демонстрирующая использование интеллектуальных датчиков для измерения изменений давления в водопроводных трубах, открывает новые перспективы для исследований в этой области. Развитие дальнейшего научного направления может сосредоточиться на улучшении точности сенсорных систем, используя, к примеру, стационарные устройства с врезкой пьезоэлектрических датчиков в сеть. Это позволит значительно повысить надежность измерений и соответственно качество алгоритмов, способных анализировать полученные данные для более точного прогнозирования и локализации утечек. Кроме того, важным направлением является интеграция этих систем с облачными технологиями и интернетом вещей (IoT), что позволит обеспечить более эффективный сбор и обмен данными. Это может включать разработку мобильных приложений и платформ для оперативного информирования об аварийных ситуациях на основе механизмов прогнозирования исследуемых узлов системы водоснабжения.

В рамках анализа систем водоснабжения особое внимание уделяется не только обеспечению эффективности и надежности транспортировки воды, но и поддержанию ее высокого качества. Это требует применения современных технологий очистки и фильтрации, способных эффективно удалять загрязнения и обеспечивать безопасность воды для потребителей. Классические схемы обезжелезивания воды предусматривают методы упрощенной аэрации с использованием кварцевого песка в качестве загрузки фильтров. В свою очередь, современные исследования фокусируются на использовании металлического железа [22], плавающих гранулированных наполнителей из расширенного полистирола [23] или применении гравитационных аэрационных башен для поднятия уровня растворенного кислорода и эффективного удаления железа [24].

Для повышения экономичности очистки воды особое внимание уделяется оптимизации процессов обезжелезивания. Одним из ключевых аспектов является своевременная замена фильтрующего материала, приводящая к увеличению фильтроцикла в 2–3 раза [25]. Это значительно снижает затраты на промывку фильтров и повышает экономическую эффективность процесса водоочистки. Примером эффективности таких мер является опыт водозаборов г. Гомеля, где периодичность промывки фильтров варьируется в зависимости от различных факторов. Фильтроцикл связан как с уровнем содержания железа в сырой воде, так и со скоростью фильтрации на различных водозаборах. В результате периодичность промывки может колебаться от 24 до 72 ч, что позволяет оптимизировать процесс в соответствии с конкретными требованиями каждого водозабора.

Исходя из обозначенных аспектов, одним из важных направлений исследований могут стать современные методы оценки оптимального времени фильтроцикла. Здесь должны учитываться индивидуальные подходы к управлению процессами очистки, а также разнообразные факторы, влияющие на эффективность фильтрации. В этом контексте классические методы дисперсионного анализа могут быть применены для определения оценки значимости фильтроцикла и влияния объемов промывной воды на качество очистки [26]. Такой подход требует разработки алгоритмов, которые позволят отслеживать ежедневные изменения содержания железа на выходе из фильтров. Это обеспечит возможность прогнозирования необходимости своевременной замены фильтрующих материалов, что способствует повышению общей эффективности процесса очистки воды.

В сфере улучшения эффективности городских систем водоснабжения на макроуровне было проведено множество значимых исследований, среди которых выделяется работа А. Джемилогла и его коллег [27]. В этой публикации особое внимание

уделяется оптимизации управления давлением в сетях, что демонстрирует эффективность использования метаэвристического алгоритма для снижения утечек воды. Результаты показывают значительное улучшение среднего давления в сети, что, в свою очередь, важно для системной оценки износа элементов водоснабжения. Со своей стороны, исследование М. Вафаи [28] подчеркивает значимость использования методов динамической симуляции для планирования оптимального времени замены трубопроводов. Представленное исследование дает понимание того, как замена сети водоснабжения может влиять на формирование цен на воду, подчеркивая взаимосвязь между техническим обслуживанием инфраструктуры и экономическими аспектами управления водоснабжением.

Оптимизация давления в системе водоснабжения играет ключевую роль в повышении общей эффективности работы водоканалов, открывая значительный потенциал для энергосбережения. Для точной оценки этого потенциала необходимо применение современных научных подходов и знаний. В системах, состоящих из множества водозаборов, часто возникает проблема избыточного давления, приводящего к неоправданным потерям. В этом контексте в работе О. Матвиенко и П. Спичак [29] исследуется данная область управления давлением. Авторы рассматривают использование стохастической модели квазистационарных режимов водоснабжения для снижения избыточного давления в сети. Они предлагают метод оптимального зонирования водопроводных сетей, который включает выделение изолированных зон с избыточным давлением и расчет параметров регуляторов давления. Результаты показывают, что зонирование и установка регуляторов давления могут снизить общее избыточное давление в сети на 21 %, повышая тем самым эффективность работы системы.

Аналогично, статья А. Абу-Махфуза и соавторов [10] также решает проблему управления давлением в системах водоснабжения. Авторы описывают новые алгоритмы для точного управления давлением, используя клапаны управления давлением или насосы с переменной скоростью, что способствует снижению уровня утечек. Они также разработали модель прогнозирования потребности в воде, учитывающую колебания спроса и анализирующую утечки на различных временных периодах, что позволяет более точно прогнозировать потребности в воде и связанную с ними неопределенность.

Несмотря на значительные достижения в этих областях, остается ряд нерешенных задач, где одной из ключевых является разработка механизма планирования графиков давления на водозаборах с позиции эффективности, учитывающего влияние каждого водозабора на диктующие точки сети водоснабжения. Для оптимизации сети водоснабжения можно использовать математические модели, которые предварительно должны учитывать кластеры потребления воды и удельные показатели. Эти аспекты могут стать частью будущих исследований, направленных на улучшение управления городскими системами водоснабжения.

Результаты и обсуждения

В рамках нашей научной работы проведен всесторонний анализ современных научных работ и практических решений в сфере водоснабжения. Особое внимание уделено комплексному подходу, охватывающему как детальное изучение отдельных элементов системы водоснабжения (микроуровень), так и стратегическое планирование и оптимизацию работы системы в целом (макроуровень). Указанный подход позволяет не только выявить ключевые направления и актуальные проблемы в данной области, но и определить наиболее перспективные стратегии повышения эффективности и надежности водоснабжения городских систем водоснабжения.

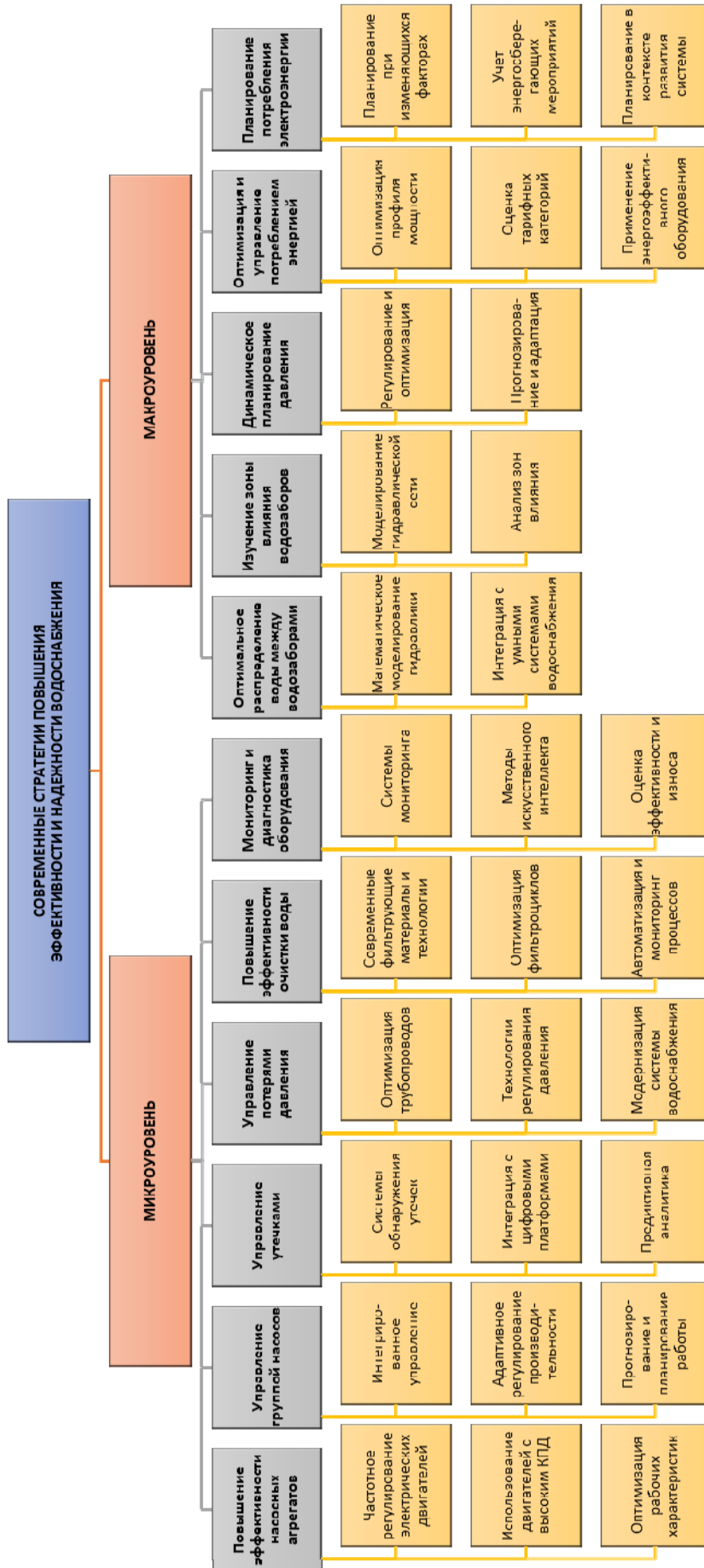


Рис. 2. Современные стратегии повышения эффективности и надежности водоснабжения

На рис. 2 в виде диаграммы систематизированы и показаны основные направления и стратегии повышения эффективности и надежности системы водоснабжения. В рамках микроуровня отмеченные направления включают несколько ключевых аспектов:

1. *Повышение эффективности одиночных насосных агрегатов*: здесь акцентируется внимание на внедрении систем частотного регулирования электроприводов, использовании высокоэффективных двигателей и оптимизацию рабочих характеристик насосов. Эти меры направлены на адаптацию работы насосов к изменяющимся условиям эксплуатации и интеграцию систем мониторинга для оптимизации их работы в реальном времени.

2. *Управление группой насосных агрегатов*: учитывает интегрированное управление и автоматическую настройку работы насосов, а также адаптивное регулирование их производительности. Это включает в себя использование частотно-регулируемых приводов и разработку моделей прогнозирования потребности в воде для эффективного планирования работы насосных станций.

3. *Управление утечками*: ключевыми элементами этого аспекта являются разработка и внедрение систем обнаружения утечек, интеграция этих систем с цифровыми платформами для оперативного реагирования, а также применение предиктивной аналитики для профилактики утечек.

4. *Управление потерями давления*: включает в себя вопросы оптимизации конструкции и материалов трубопроводов, применение технологий регулирования давления, а также модернизацию системы водоснабжения с целью снижения избыточного давления и улучшения контроля состояния сети.

5. *Повышение эффективности очистки воды*: основное внимание уделяется использованию современных фильтрующих материалов, оптимизации фильтроциклов и автоматизации процессов очистки, включая непрерывный контроль качества воды и эффективности очистных процессов.

6. *Мониторинг и диагностика состояния оборудования*: охватывает вопросы разработки и внедрения систем мониторинга с использованием датчиков и IoT-технологий, применение методов искусственного интеллекта для анализа данных и предиктивной аналитики для прогнозирования технического обслуживания и замены компонентов оборудования.

На макроуровне в системах водоснабжения акцент делается на оптимизацию работы всей системы, включая управление распределением воды, динамическое планирование, энергоэффективность и создание инфраструктуры мониторинга. Эти направления представлены следующими элементами:

1. *Оптимальное распределение воды между водозаборами*: представлено математическим моделированием и оптимизацией для эффективного распределения водных ресурсов, учетом гидравлических особенностей сети для определения оптимального распределения воды и интеграцией с системами умного водоснабжения, включая технологии Интернета вещей и умные сенсоры.

2. *Изучение зоны влияния водозаборов на гидравлическую сеть*: включает моделирование гидравлической сети и создание цифровых двойников для анализа потоков воды и определение зон влияния каждого водозабора, а также исследование взаимодействия между водозаборами и их влияния на стабильность и эффективность работы системы.

3. *Динамическое планирование давления водозаборов*: связано с регулированием и оптимизацией давления с использованием автоматизированных систем управления, прогнозированием и адаптацией уровня давления к текущим и предполагаемым потребностям системы.

4. *Оптимизация и управление электропотреблением*: охватывает оптимизацию использования электроэнергии, оценку тарифных категорий для выбора наиболее выгодных планов оплаты электроэнергии и применение энергоэффективного оборудования и технологий.

5. *Планирование электропотребления*: отражает планирование в условиях изменяющихся влияющих факторов, включая сезонные и временные колебания в потреблении воды, планирование с учетом энергосберегающих мероприятий и планирование в контексте будущего развития системы водоснабжения.

Особое место в анализе направлений повышения эффективности водоснабжения занимают системы мониторинга, предназначенные для непрерывного отслеживания состояния гидравлической сети и оперативного реагирования на изменения. Эти системы способны адаптироваться как на микро-, так и на макроуровне, обеспечивая повышение эффективности работы отдельных водозаборов и системы водоснабжения в целом. Их внедрение позволяет не только оптимизировать работу каждого компонента системы, но и гармонизировать взаимодействие между различными элементами инфраструктуры, что в конечном итоге способствует повышению надежности и устойчивости общей системы водоснабжения.

Заключение

В заключение проведенного анализа современных исследований и практик в области водоснабжения можно отметить, что повышение эффективности и надежности систем на микро- и макроуровнях требует комплексного подхода и интеграции различных технологий и методик. На микроуровне важно сосредоточиться на оптимизации работы отдельных компонентов системы, таких как насосные агрегаты, трубопроводные сети и технологии очистки. В то же время на макроуровне ключевыми моментами являются разработка стратегий оптимального распределения воды между водозаборами, изучение зон влияния водозаборов на гидравлическую сеть, динамическое планирование давления и эффективное управление электропотреблением.

Системы мониторинга играют важную роль в обеспечении непрерывного контроля и оперативного реагирования на изменения в системе водоснабжения. Интеграция современных алгоритмов искусственного интеллекта и машинного обучения, а также использование цифровых сенсоров и IoT-технологий открывают новые возможности для повышения эффективности и надежности систем водоснабжения.

Однако, несмотря на значительные успехи в этой области, остаются нерешенными отдельные задачи, что требует дальнейших исследований. В частности, важным направлением является разработка механизмов планирования графиков давления на водозаборах, учитывающих влияние каждого водозабора на диктующие точки сети водоснабжения, а также учет кластеров потребления воды и удельных показателей. Эти аспекты должны стать частью будущих исследований, направленных на улучшение управления городскими системами водоснабжения, снижение эксплуатационных расходов и повышение устойчивости водоснабжения.

Литература

1. Грунтович, Н. В. Исследование влияния факторов на формирование удельных и общих расходов электрической энергии в технологической системе водоснабжения / Н. В. Грунтович, А. А. Капанский, О. В. Федоров // *Электротехн. системы и комплексы*. – 2016. – № 3 (32). – С. 54–59. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2016-3\(32\)-54-59](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2016-3(32)-54-59)

2. Великанов, Н. Л. Оценка энергоэффективности городских систем транспортировки и подъема воды / Н. Л. Великанов // Транспорт и сервис. – 2014. – № 2. – С. 74–82.
3. A novel approach to optimal pump scheduling in water distribution systems / A. M. Bagirov [et al.] // 14th Water Distribution Systems Analysis Conference, Adelaide, Australia, 24–27 Sept., 2012 / University of Adelaide. – Adelaide, 2012. – Vol. 1. – P. 618–631.
4. Sowby, R. B. Review of Energy Management Guidance for Water and Wastewater Utilities / R. B. Sowby, N. Morehead, S. Burdette // Energy Nexus. – 2023. – P. 100235.
5. Голыбин, Ю. А. Энергосбережение при автоматизации насосных станций / Ю. А. Голыбин, Х. Б. Юнусов // Уральская горная школа – регионам : материалы междунар. науч.-практ. конф., Екатеринбург, 6–7 апр. 2020 г. / Урал. гос. гор. ун-т. – Екатеринбург, 2020. – С. 196–197.
6. Xiangqian, X. Research on intelligent frequency conversion control system of pumping unit with auto-adapted function / X. Xiangqian, Z. Haobin, L. Mao // Proceedings of 2011 International Conference on Electronic & Mechanical Engineering and Information Technology, Harbin, Heilongjiang, China, 12–14 Aug., 2011 / Institute of Electrical and Electronics Engineer. – Harbin, 2011. – Vol. 5. – P. 2246–2248.
7. Kan, E. Methods of regulating the work of units at irrigation pumping stations / E. Kan, M. Mukhammadiev, N. Ikramov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2020. – Vol. 869, N 4. – P. 042009.
8. Efficiency analysis of low electric power drives employing induction and synchronous reluctance motors in pump applications / V. Kazakbaev [et al.] // Energies. – 2019. – Vol. 12, N 6. – P. 1144.
9. Optimization of a variable frequency drive pump working on a water tower / N. V. Hruntovich [at al.] // SES 2019 : In E3S Web of Conferences, Kazan, Russia, 18–20 Sept., 2019 / EDP Sciences. – Kazan, 2019. – Vol. 124. – P. 05060.
10. Real-time dynamic hydraulic model of water distribution networks / A. M. Abu-Mahfouz [et al.] // Water. – 2019. – Vol. 11, N 3. – P. 470.
11. Ahopelto, S. Cost-benefit analysis of leakage reduction methods in water supply networks / S. Ahopelto, R. Vahala // Water. – 2020. – Vol. 12, N 1. – P. 195.
12. Cheng, P. Leakage reduction of water distribution network system based on the observation data of water leakage and pressure of actual water distribution network system / P. Cheng // Journal of Physics: Conference Series. – 2021. – Vol. 1881, N 3. – P. 032087.
13. Aquatoria Smart Water. – Mode of access: <https://aquatoria.technikon.by/>. – Date of access: 24.12.2023.
14. Ведерникова, Ю. А. Вопросы моделирования взаимного влияния скважин / Ю. А. Ведерникова, И. Г. Соловьев // Вестн. кибернетики. – 2004. – № 3. – С. 156–162.
15. Горюнов, А. Н. Регулируемый электропривод насосных агрегатов первого подъема станций водоподготовки / А. Н. Горюнов, Г. Б. Онищенко // Вестн. Иван. гос. энергет. ун-та. – 2012. – № 6. – С. 131–134.
16. A comprehensive review on energy efficiency enhancement initiatives in centrifugal pumping system / V. K. A. Shankar [et al.] // Applied Energy. – 2016. – Vol. 181. – P. 495–513.

17. Багаев, Ю. Г. Опыт внедрения станций частотного управления насосными агрегатами / Ю. Г. Багаев, В. Ф. Мелеховский, А. П. Усачев // Водоснабжение и санитар. техника. – 2004. – № 3. – С. 9–11.
18. Studziński, J. Control of pumps of water supply network under hydraulic and energy optimisation using artificial intelligence / J. Studziński, A. Ziółkowski // Entropy. – 2020. – Vol. 22, N 9. – P. 1014.
19. Rojek, I. Detection and localization of water leaks in water nets supported by an ICT system with artificial intelligence methods as a way forward for smart cities / I. Rojek, J. Studzinski // Sustainability. – 2019. – Vol. 11, N 2. – P. 518.
20. Kougiyas, I. P. Multiobjective pump scheduling optimization using harmony search algorithm (HSA) and polyphonic HAS / I. P. Kougiyas, N. P. Theodossiou // Water resources management. – 2013. – Vol. 27. – P. 1249–1261.
21. Муравьев, А. В. Управление энергосберегающими режимами насосных установок по критерию «баланс мощности» / А. В. Муравьев, А. Г. Калинин, Т. В. Мясникова // Вестн. Чуваш. ун-та. – 2019. – № 1. – С. 75–82.
22. Волков, А. А. Интеллектуальные системы управления водопользованием / А. А. Волков // Вестн. МГСУ. – 2011. – № 1-1. – С. 287–293.
23. Система автоматического управления водоснабжением : пат. на полезную модель 27710 U1 Рос. Федерация, МПК G 01 N 35/00 / И. И. Глуховский, А. Б. Каменецкий. – № 2002122270/20 ; заявл. 22.08.02 ; опубл. 10.02.03.
24. Палкин, Г. А. Исследование оптимального метода управления электроприводами насосов первого подъема, эксплуатируемых в условиях отрицательных температур / Г. А. Палкин, А. Ф. Гайсин // Изв. вузов. Проблемы энергетики. – 2021. – Т. 23, № 3. – С. 194–208.
25. Deployment of AI/ML Based Predictive Model for Early Detection of ESP Failure / M. Aslam [et al.] // Decarbonising. Faster. Together : Abu Dhabi International Petroleum Exhibition and Conference, Abu Dhabi, UAE, 2–5 Oct., 2023 / ADNOC. – Abu Dhabi, 2023. – P. D031S085R002.
26. Overview of energy management and leakage control systems for smart water grids and digital water / C. Giudicianni [et al.] // Modelling. – 2020. – Vol. 1, N 2. – P. 134–155.
27. SmartPipes: Smart wireless sensor networks for leak detection in water pipelines / A. M. Sadeghioon [et al.] // Journal of sensor and Actuator Networks. – 2014. – Vol. 3, N 1. – P. 64–78.
28. Characterizing the reactivity of metallic iron for water treatment: H₂ evolution in H₂SO₄ and uranium removal efficiency / A. I. Ndé-Tchoupé [et al.] // Water. – 2020. – Vol. 12, N 6. – P. 1523.
29. Orlov, V. Energy saving in water treatment technologies with polystyrene foam filters / V. Orlov, S. Martynov, S. Kunytskiy // Journal of Water and Land Development. – 2016. – Vol. 31, N 1. – P. 119–122.
30. A Bench Model Design of Gravitational Aeration Tower System as Treatment System for Iron Removal in Groundwater / E. Z. Radzi [et al.] // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2020. – Vol. 991, N 1. – P. 012099.
31. Cescon, A. Filtration process and alternative filter media material in water treatment / A. Cescon, J. Q. Jiang // Water (Switzerland). – 2020. – Vol. 12, N 12. – P. 1–20.

32. Капанский, А. А. Повышение энергетической эффективности водозаборов за счет повторного использования промывной воды и сокращения времени фильтроцикла / А. А. Капанский // Изв. высш. учеб. заведений. Проблемы энергетики. – 2021. – Т. 23, № 3. – С. 105–117.
33. Optimal Exploitation of Urban Water Supply Networks Based on Pressure Management with the Nondominated Sorting Differential Evolution (NSDE) Algorithm / A. Cemiloglu [et al.] // *Water*. – 2023. – Vol. 15, N 14. – P. 2583.
34. Vafae, M. Determining the Minimum Price of Drinking Water and Optimal Scheduling of Water Pipe Replacement in Urban Distribution Network / M. Vafae, H. Nozari, S. Marofi // *Journal of Water and Wastewater [Ab va Fazilab]* (in persian). – 2021. – Vol. 32, N 3. – P. 21–39.
35. Matviienko, O. Method of increasing the efficiency of the water supply network due to its zoning / O. Matviienko, P. Spichak // *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*. – 2023. – N 1 (23). – P. 83–95.

References

1. Gruntovich N. V., Kapansky A. A., Fedorov O. V. Study of the influence of factors on the formation of specific and total electrical energy consumption in the technological water supply system. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы*, 2016, no. 3 (32), pp. 54–59. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2016-3\(32\)-54-59](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2016-3(32)-54-59) (in Russian).
2. Velikanov N. L. Assessing the energy efficiency of urban transportation and water lifting systems. *Transport and service*, 2014, no. 2, pp. 74–82 (in Russian).
3. Bagirov A. M., Barton A. F., Mala-Jetmarova H., Al Nuaimat A., Ahmed S. T., Sultanova N. A novel approach to optimal pump scheduling in water distribution systems. *14th Water Distribution Systems Analysis Conference*, 2012, pp. 618–631.
4. Sowby R. B., Morehead N., Burdette S. Review of Energy Management Guidance for Water and Wastewater Utilities. *Energy Nexus*, 2023, p. 100235.
5. Golybin Yu. A., Yunusov Kh. B. Energy saving in the automation of pumping stations. *Ural'skaya gornaya shkola – regionam: materialy mezhdunar. nauch.-prakt. konf., Ekaterinburg, 6–7 apr. 2020 g.* [Ural Mining School – to the regions: materials of the international scientific and practical conference, Ekaterinburg, April 6–7, 2020]. Ekaterinburg, Ural State Mining University, 2020, p. 196–197 (in Russian).
6. Xiangqian X., Haobin Z., Mao L. Research on intelligent frequency conversion control system of pumping unit with auto-adapted function. *Proceedings of 2011 International Conference on Electronic & Mechanical Engineering and Information Technology*, IEEE, 2011, vol. 5, pp. 2246–2248.
7. Kan E., Mukhammadiev M., Ikramov N. Methods of regulating the work of units at irrigation pumping stations. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2020, vol. 869, no. 4, p. 042009.
8. Kazakbaev V., Prakht V., Dmitrievskii V., Ibrahim M. N., Oshurbekov S., Sarapulov S. Efficiency analysis of low electric power drives employing induction and synchronous reluctance motors in pump applications. *Energies*, 2019, vol. 12, no. 6, p. 1144.
9. Hruntovich N. V., Kapanski A. A., Baczynski D., Vagapov G. V., Fedorov O. V. Optimization of a variable frequency drive pump working on a water tower. *In E3S Web of Conferences, Kazan, Russia, 18–20 Sept., 2019*. Kazan, 2019, vol. 124, p. 05060.

10. Abu-Mahfouz A. M., Hamam Y., Page P. R., Adedeji K. B., Anele A. O., Todini E. Real-time dynamic hydraulic model of water distribution networks. *Water*, 2019, vol. 11, no. 3, p. 470.
11. Ahopelto S., Vahala R. Cost-benefit analysis of leakage reduction methods in water supply networks. *Water*, 2020, vol. 12, no. 1, p. 195.
12. Cheng P. Leakage reduction of water distribution network system based on the observation data of water leakage and pressure of actual water distribution network system. *Journal of Physics: Conference Series*, 2021, vol. 1881, no. 3, p. 032087.
13. Aquatoria Smart Water. Available at: <https://aquatoria.technikon.by/> (accessed 24 January 2023).
14. Vedernikova Yu. A., Solovyov I. G. Issues of modeling the mutual influence of wells. *Vestnik kibernetiki*, 2004, no. 3, p. 156–162 (in Russian).
15. Goryunov A. N., Onishchenko G. B. Adjustable electric drive of pumping units of the first rise of water treatment stations. *Vestnik Ivanovskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta*, 2012, no. 6, pp. 131–134 (in Russian).
16. Shankar V. K. A., Umashankar S., Paramasivam S., Hanigovszki N. A comprehensive review on energy efficiency enhancement initiatives in centrifugal pumping system. *Applied Energy*, 2016, vol. 181, pp. 495–513.
17. Bagaev Yu. G., Melekhovsky V. F., Usachev A. P. Experience in implementing frequency control stations for pumping units. *Vodosnabzhenie i sanitarnaya tekhnika*, 2004, no. 3, pp. 9–11 (in Russian).
18. Studziński J., Ziółkowski A. Control of pumps of water supply network under hydraulic and energy optimization using artificial intelligence. *Entropy*, 2020, vol. 22, no. 9, p. 1014.
19. Rojek I., Studzinski J. Detection and localization of water leaks in water nets supported by an ICT system with artificial intelligence methods as a way forward for smart cities. *Sustainability*, 2019, vol. 11, no. 2, p. 518.
20. Kougiyas I. P., Theodossiou N. P. Multiobjective pump scheduling optimization using harmony search algorithm (HSA) and polyphonic HSA. *Water resources management*, 2013, vol. 27, pp. 1249–1261.
21. Muravyov A. V., Kalinin A.G., Myasnikova T. V. Control of energy-saving modes of pumping units according to the “power balance” criterion. *Vestnik Chuvashskogo universiteta*, 2019, no. 1, pp. 75–82 (in Russian).
22. Volkov A. A. Intelligent water management systems. *Vestnik MGSU = Vestnik MGSU*, 2011, no. 1-1, pp. 287–293 (in Russian).
23. Glukhovskii I. I., Kamenetskii A. B. *Automatic water supply control system*. Patent Rossiiskaya Federatsiya 2002122270/20. Publ. date 10.02.03 (in Russian).
24. Palkin G. A., Gaisin A. F. Study of the optimal method for controlling electric drives of first lift pumps operated in conditions of negative temperatures. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Problemy energetiki*, 2021, vol. 23, no. 3, pp. 194–208 (in Russian).
25. Aslam M., Reddicharla N., Elmansour A., Alshehhi K., Vanam P. R., Al Dhaheri B., Al Sonbaty T. Deployment of AI/ML Based Predictive Model for Early Detection of ESP Failure. *Decarbonising. Faster. Together: Abu Dhabi International Petroleum Exhibition and Conference*, Abu Dhabi, October 2–5, 2023, p. D031S085R002.

26. Giudicianni C., Herrera M., Nardo A. D., Adeyeye K., Ramos H. M. Overview of energy management and leakage control systems for smart water grids and digital water. *Modelling*, 2020, vol. 1, no. 2, pp. 134–155.
27. Sadeghioon A. M., Metj N., David N. Chapman, Carl J. Anthony. SmartPipes: Smart wireless sensor networks for leak detection in water pipelines. *Journal of sensor and Actuator Networks*, 2014, vol. 3, no. 1, pp. 64–78.
28. Ndé-Tchoupé A. I., Hu R., Gwenzu W., Nassi A., Noubactep C. Characterizing the reactivity of metallic iron for water treatment: H₂ evolution in H₂SO₄ and uranium removal efficiency. *Water*, 2020, vol. 12, no. 6, p. 1523.
29. Orlov V., Martynov S., Kunytskiy S. Energy saving in water treatment technologies with polystyrene foam filters. *Journal of Water and Land Development*, 2016, vol. 31, no. 1, pp. 119–122.
30. Radzi E. Z., Wahab M. S., Sahdan M. Z., Hamdan R., Madun A., Zakariah R. A. A Bench Model Design of Gravitational Aeration Tower System as Treatment System for Iron Removal in Groundwater. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2020, vol. 991, no. 1, p. 012099.
31. Cescon A., Jiang J. Q. Filtration process and alternative filter media material in water treatment. *Water (Switzerland)*, 2020, vol. 12, no. 12, pp. 1–20.
32. Kapansky A. A. Increasing the energy efficiency of water intakes by reusing wash water and reducing the filter cycle time. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Problemy energetiki*, 2021, vol. 23, no. 3, pp. 105–117 (in Russian).
33. Cemiloglu A., Licai Z., Ugurenver A., Nanekaran Y. A. Optimal Exploitation of Urban Water Supply Networks Based on Pressure Management with the Nondominated Sorting Differential Evolution (NSDE) Algorithm. *Water*, 2023, vol. 15, no. 14, p. 2583.
34. Vafae M., Nozari H., Marofi S. Determining the Minimum Price of Drinking Water and Optimal Scheduling of Water Pipe Replacement in Urban Distribution Network. *Journal of Water and Wastewater; Ab va Fazilab (in Persian)*, 2021, vol. 32, no. 3, pp. 21–39.
35. Matviienko O., Spichak P. Method of increasing the efficiency of the water supply network due to its zoning. *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, 2023, no. 1 (23), pp. 83–95.

Поступила 31.01.2024 г.

УДК 552.54

<https://doi.org/10.62595/1819-5245-2024-1-99-111>

ВТОРИЧНЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ КАРБОНАТНЫХ ПОРОД НЕПСКО-БОТУОБИНСКОЙ АНТЕКЛИЗЫ ЮГА СИБИРСКОЙ ПЛАТФОРМЫ И ИХ ВЛИЯНИЕ НА КОЛЛЕКТОРСКИЕ СВОЙСТВА ПРОДУКТИВНЫХ ГОРИЗОНТОВ

А. Д. ПОРОШИНА

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И. М. Губкина», г. Москва

Непско-Ботуобинская антеклиза является одной из наиболее перспективных территорий Восточной Сибири, в пределах которой более половины ресурсов углеводородов связано с карбонатными коллекторами. Одна из основных задач по освоению ресурсов нефти и газа в данном регионе связана с прогнозом локализации пород-коллекторов, в значительной степени определяемым степенью изученности проявившихся постседиментационных процессов. Посвящена вопросам влияния вторичных процессов на емкостные и фильтрационные свойства продуктивных карбонатных пород Непско-Ботуобинской антеклизы на примере одной из скважин, пробуренных в пределах ее северо-восточного участка. Детально рассмотрены особенности проявления каждого из протекавших постседиментационных процессов и оценено их влияние на фильтрационно-емкостные свойства пород различных литотипов по всем вскрытым скважиной карбонатным горизонтам. Результаты проведенных исследований будут способствовать повышению достоверности прогноза локализации карбонатных пород с улучшенными емкостными и фильтрационными свойствами, а значит, повышению эффективности освоения нефтегазовых ресурсов рассматриваемого региона.

Ключевые слова: Непско-Ботуобинская антеклиза, венд-нижний кембрий, карбонатные отложения, вторичные процессы, литотипы, пористость, проницаемость.

Для цитирования. Порошина, А. Д. Вторичные изменения карбонатных пород Непско-Ботуобинской антеклизы юга Сибирской платформы и их влияние на коллекторские свойства продуктивных горизонтов // А. Д. Порошина // Вестн. Гомел. гос. техн. ун-та им. П. О. Сухого. – 2024. – № 1 (96). – С. 99–111. <https://doi.org/10.62595/1819-5245-2024-1-99-111>

SECONDARY CHANGES IN CARBONATE ROCKS OF NEPA-BOTUOBA ANTECLISE IN THE SOUTH OF THE SIBERIAN PLATFORM AND THEIR IMPACT ON THE RESERVOIR PROPERTIES OF PRODUCTIVE HORIZONS

A. D. POROSHINA

*National University of Oil and Gas “Gubkin University”,
Moscow, the Russian Federation*

Nepa-Botuoba anteclise is one of the most promising territories in Eastern Siberia, within which more than a half of the hydrocarbon resources are connected with carbonate reservoirs. One of the main tasks in the development of oil and gas resources in this region is associated with the forecast of the localization of reservoir rocks, which is largely determined by the degree of knowledge of the post-sedimentation processes which have occurred. The article is dedicated to the influence of secondary processes on the capacitive

and filtration properties of productive carbonate rocks of the Nepa-Botuoba antecline. One of the wells drilled within its northeastern section has been taken as an example. The features of each of the post-sedimentation processes manifestation which took place were examined in detail and their influence on the filtration-capacitive properties of rocks of various lithotypes was assessed for all carbonate horizons penetrated by the well. The results of the research will help to increase the reliability of the forecast for the localization of carbonate rocks with improved capacitive and filtration properties, and therefore increase the efficiency of development of oil and gas resources in the considered region.

Keywords: Nepa-Botuoba antecline, Vendian-Lower Cambrian, carbonate deposits, secondary processes, lithotypes, porosity, permeability.

For citation. Poroshina A. D. Secondary changes in carbonate rocks of Nepa-Botuoba antecline in the south of the Siberian platform and their impact on the reservoir properties of productive horizons. *Vestnik Gomel'skogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta imeni P. O. Sukhogo*, 2024, no. 1 (96), pp. 99–111 (in Russian). <https://doi.org/10.62595/1819-5245-2024-1-99-111>

Введение

Наиболее интенсивно развивающимся нефтегазодобывающим регионом Российской Федерации в настоящее время является Лено-Тунгусская нефтегазоносная провинция, в состав которой входит Непско-Ботуобинская антеклиз (НБА). Данная геологическая структура имеет линейно-вытянутую в северо-восточном направлении форму при протяженности около тысячи километров и ширине от ста пятидесяти до четырехсот пятидесяти километров.

Осадочный чехол НБА представлен стратиграфическими единицами от раннего протерозоя до настоящего времени. Толщина осадочного чехла варьируется от тысячи пятисот до двух тысяч семисот метров [2, 4, 5]. В разрезе осадочного чехла выделяют три нефтегазоносных комплекса: вендский, венд-нижнекембрийский и кембрийский. Вендский и венд-нижнекембрийский нефтегазоносные комплексы представляют наибольший интерес, так как с ними связана основная продуктивность изучаемой территории [1, 2, 6].

В данном исследовании рассматриваются нефтегазоносные горизонты венд-нижне-кембрийского нефтегазоносного комплекса, а также ербогаченский карбонатный горизонт вендского комплекса. В пределах венд-нижнекембрийского комплекса выделяются преимущественно преображенский, усть-кутский и осинский карбонатные продуктивные горизонты (рис. 1). Преображенский и усть-кутский горизонты имеют практически повсеместное распространение. Осинский горизонт распространен в основном на северо-востоке и юго-востоке антеклизы.

Значительная часть открытых и разрабатываемых месторождений нефти и газа, а также ресурсной базы углеводородов на территории Восточной Сибири сконцентрирована в пределах Непско-Ботуобинской антеклизы, более половины которых здесь связана с карбонатным разрезом [1]. Однако на данный момент освоенность рассматриваемого региона является крайне неравномерной и относительно низкой. Открытие и разведка новых месторождений в пределах НБА затрудняются неравномерным распространением пород-коллекторов, высокой степенью геологической неоднородности продуктивных пластов и преобладанием в регионе нетрадиционных ловушек, где наиболее важным фактором размещения углеводородов является литологический. Поэтому одна из основных задач по освоению нефтегазовых ресурсов углеводородов зависима от прогноза локализации пород-коллекторов, в значительной степени определяемого степенью изученности проявившихся постседиментационных процессов. Рассмотрению вопросов влияния вторичных процессов на емкостные и фильтрационные свойства продуктивных пород Непско-Ботуобинской антеклизы посвящено немало работ [3–7, 9–14]. Несмотря на это, степень изученности данной проблемы в целом остается относительно невысокой, что указывает на необходимость продолжения исследований в этом направлении с привлечением новых фактических данных.

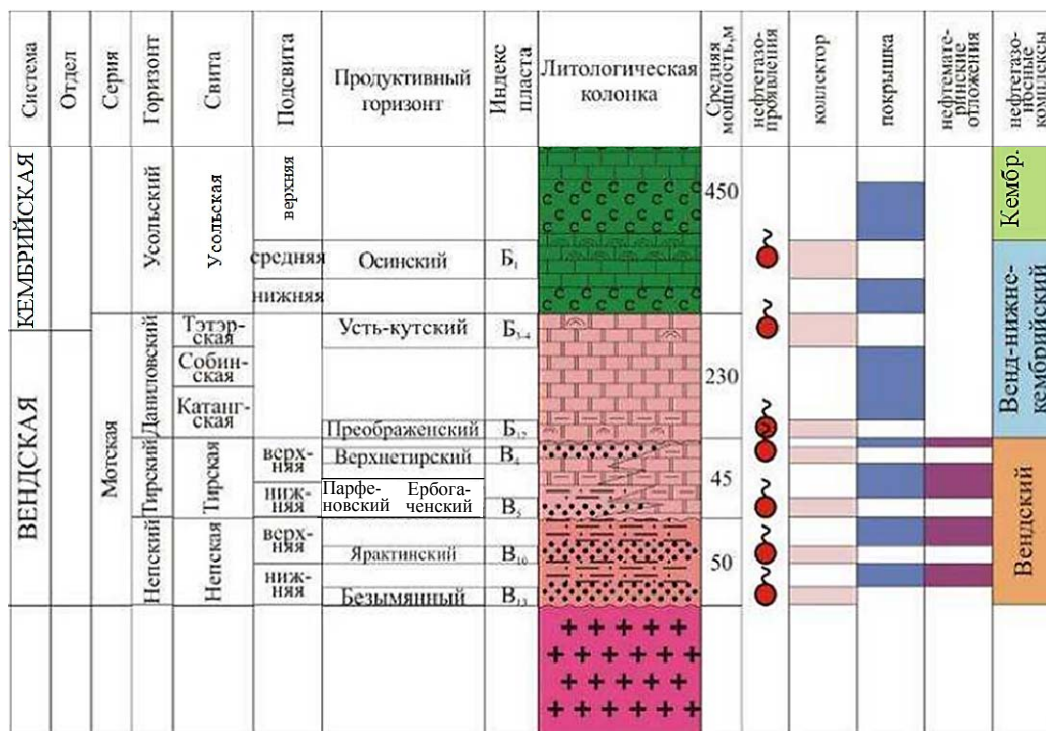


Рис. 1. Нефтегазоносные комплексы венд-кембрийских отложений

Непско-Ботуобинской антеклизы [2]:

- [Рисунок] – мергели; [Рисунок] – известняки; [Рисунок] – доломиты;
- [Рисунок] – алевролиты; [Рисунок] – песчаники; [Рисунок] – соли; [Символ] – НГВП

Объектом наших исследований являются венд-кембрийские карбонатные отложения НБА на примере фактических материалов одной из скважин, пробуренной в пределах ее северо-восточной части со сплошным отбором керна из карбонатных перспективных горизонтов на нефть и газ.

Цель работы – литологическая типизация нефтегазоносных горизонтов, установление условий осадконакопления, формирования и преобразования карбонатных пород этих горизонтов и определение влияния на них вторичных процессов.

Исходными данными для проведения исследований являлись материалы макро- и микроскопического описания керна, фотографирования при естественном освещении и ультрафиолетовом свете, результаты изучения шлифов, данные измерения естественной радиоактивности пород, определения основных петрофизических параметров пород с привлечением материалов геофизических исследований скважин.

При детальном исследовании пород в продуктивных горизонтах рассматриваемой скважины было выделено девять литотипов: доломиты разнокристаллические; доломиты разнокристаллические с реликтовой цианобактериальной структурой; доломиты микрокристаллические; доломиты интракластовые; доломиты микротонкокристаллические горизонтально-слоистые; доломиты мелкокристаллические; доломиты комковато-сгустковые; доломиты строматолитовые; ангидрито-доломиты [9, 10].

Вторичные процессы и их влияние на формирование пустотного пространства карбонатных пород

Существенную роль в формировании коллекторских свойств венд-нижне-кембрийских карбонатных отложений Непско-Ботуобинской антеклизы, как уже отмечалось, сыграли разнообразные постседиментационные преобразования. Степень интенсивности этих процессов во многом определялась вещественным составом и структурно-

текстурными особенностями пород, которые зависели от условий их седиментации. При анализе кернового материала и микроскопического изучения шлифов в разрезе исследуемой скважины были выявлены следующие типы вторичных изменений: перекристаллизация, доломитизация, выщелачивание, трещинообразование, стилолитизация, кальцитизация, доломитообразование, окремнение, сульфатизация и галитизация.

Перекристаллизация. Как правило, перекристаллизация проявляется в текстурно-структурном преобразовании минеральных агрегатов без изменения их минерального состава. Перекристаллизация обычно приводит к образованию более крупных кристаллов. Так, в разрезе нашей скважины в интракластовых доломитах первично илистый матрикс слабо перекристаллизован до микротонкокристаллической структуры (рис. 2). Наиболее интенсивно этот процесс проявился в цианобактериальных и археоциатовых карбонатных породах, содержащих минимальное количество глин, так как наличие глинистого материала и органического вещества оказывает сильное «тормозящее» действие на перекристаллизацию [8].

При перекристаллизации происходят текстурно-структурные перестройки, зачастую приводящие к формированию более крупных кристаллов и изменению начальных коллекторских свойств пород. При формировании крупных кристаллов образуются более крупные поры в межкристаллическом пространстве, а также межпоровые каналы. В целом же на материалах нашей скважины подтверждается неоднозначное влияние этого процесса на коллекторские свойства пород [7]. В одних случаях перекристаллизация приводит к улучшению фильтрационно-емкостных свойств, а в других – к их снижению.

Доломитизация. Процесс доломитизации известняков заключается в замене одной молекулы кальция известняка на молекулу магния морских или пластовых вод. Так как молекула кальция крупнее молекулы магния, то при их замещении происходит уменьшение объема твердой фазы с повышением пористости породы. Наиболее интенсивно этот процесс протекает в породах с повышенной начальной пористостью и пониженной глинистостью [4, 8]. Доломитизация в шлифах отражается в виде развития доломитовых кристаллов по первичному цианобактериальному и археоцетатовому каркасу (рис. 3).

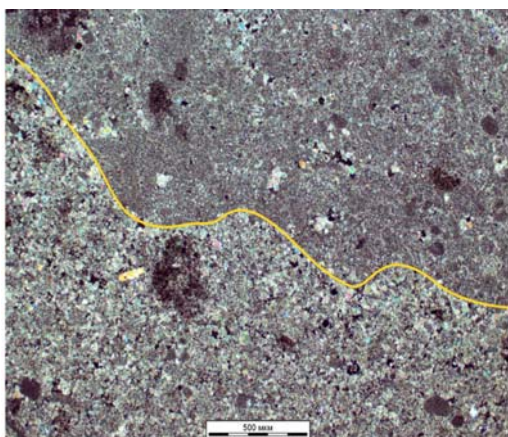


Рис. 2. Перекристаллизация илистого матрикса до микротонкокристаллической структуры в доломите интракластовом. Глубина отбора – 1779,1 м (осинский горизонт). Николи скрещены

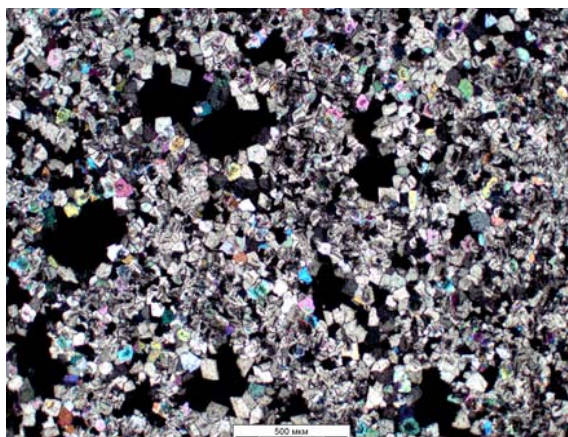


Рис. 3. Разнокристаллическая микроструктура доломита, кристаллы доломита развиты по первичному цианобактериальному известняку. Николи скрещены

Процесс доломитизации карбонатных пород в рассматриваемом регионе происходил на разных стадиях диагенеза и начального катагенеза. Наиболее ранние генерации вторичного доломита, вероятнее всего, формировались на самых первых стадиях диагенеза. Однако более интенсивная доломитизация пород проявилась на стадии катагенеза при их взаимодействии с поступившими в пласты (из соленосных толщ) высококонцентрированными растворами с большим содержанием магния. Сформировавшийся при этом дополнительный объем пустотного пространства пород мог лучше сохраниться из-за достаточной набранной прочности структурного каркаса [8]. В целом процессы доломитизации оказали положительное влияние. Это подтверждается отмечаемой нами повышенной пористостью и проницаемостью пластов вторичных доломитов по сравнению с известняками во всех карбонатных горизонтах изучаемой скважины.

Выщелачивание. Выщелачивание является процессом, при котором происходит растворение с последующим выносом подземными или атмосферными водами, в первую очередь, наиболее легкорастворимых компонентов горных пород. Наиболее ранняя стадия выщелачивания связана с диагенезом при воздействии на карбонатные осадки элизийонных вод. Выщелачивание также могло происходить и при подъеме территории. Выходя на поверхность, в зону влияния атмосферных осадков, в межкаркасном пространстве пород возникали пустоты за счет растворения и выноса карбонатного материала за пределы рассматриваемого участка. Примечательно то, что выщелачивание имеет унаследованный характер, т.е. процесс более интенсивно протекал по первичным седиментационным пустотам [3, 6]. При этом незначительные по размерам поры и трещины превращались в каверны. Так, в разрезе изучаемой скважины выщелачивание наблюдается практически во всех литотипах продуктивных горизонтов. Наиболее активно оно прошло в доломитах разнокристаллических и доломитах разнокристаллических с реликтовой цианобактериальной структурой (рис. 4).

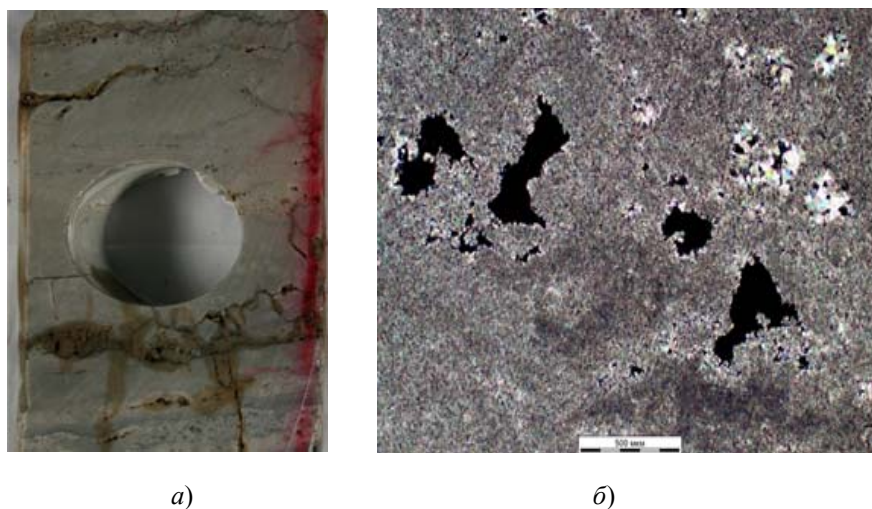


Рис. 4. Доломит разнокристаллический с реликтовой цианобактериальной структурой. Глубина отбора – 2073,57 м (ербогаченский горизонт):
а – пустоты выщелачивания вблизи стилолитовых швов;
б – пустоты выщелачивания. Николи скрещены

Анализ кернового материала и многочисленных шлифов позволяет говорить, что выщелачивание (как уже отмечено) наиболее активно прошло в нижнем устьевом пласте в доломитах разнокристаллических и разнокристаллических с реликтовой цианобактериальной структурой. На пустотное пространство пород осинского

горизонта выщелачивание оказало менее значительное влияние. В ербогаченском и преображенском горизонтах этот процесс проявился еще в меньшей степени. В целом выщелачивание положительно влияло на фильтрационно-емкостные свойства пород рассматриваемых продуктивных горизонтов и является основным процессом формирования их кавернозности.

Трещиноватость. Разрез исследуемой скважины часто характеризуется интенсивной трещиноватостью. Подавляющее большинство трещин имеет литогенетическое и тектоническое происхождение. Среди литогенетических – трещины напластования распространены более широко. Их раскрытость измеряется сотыми и десятими долями миллиметров, а протяженность – миллиметрами. Внутрислойные трещины также незначительны по раскрытости, часто являются нитевидными.

Тектонические трещины представляют собой секущие, прямые, крутопадающие, нередко вертикальные трещины. Их раскрытость изменяется от долей миллиметра до одного сантиметра. Трещины в керне из нашей скважины часто заполнены вторичными сульфатами, галитом, кремнистыми минералами, органическим веществом. Реже встречаются открытые трещины, которые образовались в литифицированных породах преимущественно на поздних этапах катагенеза в результате новейших тектонических подвижек.

Нами установлено, что трещины не оказывают заметного влияния на полезную емкость коллекторов, однако случаи высокой проницаемости пород при их низкой пористости связаны именно с трещиноватостью.

В разрезе нашей скважины вблизи зон сульфатизации отмечаются участки повышенной трещиноватости доломитов. Нередко прослои отделяются друг от друга зонами трещиноватости (рис. 5). Отмечаемую трещиноватость можно объяснить повышенной хрупкостью ангидрита.



Рис. 5. Трещиноватость в зоне чередования карбонатных прослоев с прослоями ангидрита. Глубина отбора – 1939,89 м (усть-кутский горизонт)

Стилолитизация. В результате проведенных нами исследований установлено, что наиболее широкое развитие в карбонатных породах исследуемой скважины микростилолиты получили в доломитах разнокристаллических, мелкокристаллических и микротонкоккристаллических горизонтально-слоистых. Микростилолиты выполнены преимущественно глинистым и глинисто-органическим веществом (рис. 6). Они

возникали в результате локального растворения под давлением как на поздних этапах диагенеза, так и на этапах стадийного катагенеза, что привело к частичному увеличению их фильтрационно-емкостных свойств. Увеличение фильтрационно-емкостных свойств пород также может быть обусловлено проявлением на более поздних этапах стадийного катагенеза процесса выщелачивания по поверхности стилолитового шва [4, 8]. Примечательно то, что стилолиты являются проводящими каналами для различных флюидов, в результате действия которых интенсивность выщелачивания повышалась. Так, вблизи стилолитов часто наблюдается повышенная кавернозность (рис. 4, а).

Стилолитовые швы, являясь путями миграции флюидов, обычно способствовали улучшению коллекторских свойств. Однако их пустотное пространство зачастую заполнено глиной и аутигенными минералами, что отрицательно влияло на фильтрационно-емкостные свойства пород и «затушевывало» положительный эффект.

Кальцитизация. Кальцитизация является процессом заполнения вторичными кристаллами кальцита порового пространства. Процесс развивался преимущественно по остаточным пустотам выщелачивания в межкаркасном пространстве. Кальцитизация проходила в два этапа. Сперва формировались крустификационные каемки, далее в остаточном пустотном пространстве, залечивая его, выпадали кристаллы кальцита (рис. 7). В некоторых случаях это приводило к почти полному выполнению пустот, что ухудшало начальные коллекторские свойства карбонатных пород [3].

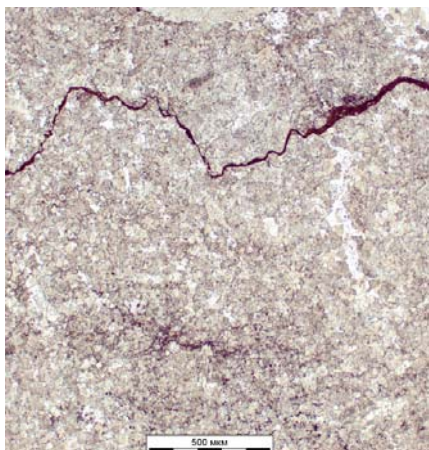


Рис. 6. Микростилолитовый шов, выполненный органическим веществом, в доломите разнокристаллическом. Глубина отбора – 1819,20 м (осинский горизонт). Николи параллельны

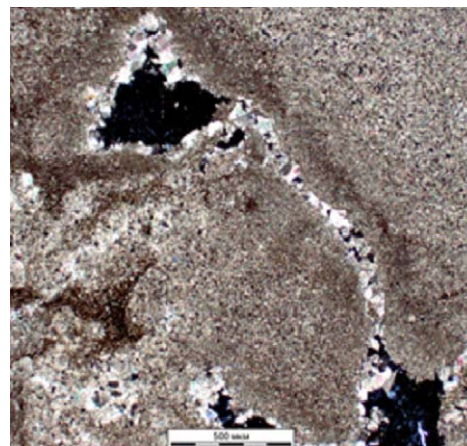


Рис. 7. Кальцитовая крустификационная каемка в доломите разнокристаллическом. Глубина отбора – 1884, 70 м (усть-кутский горизонт). Николи скрещены

Установлено, что в изучаемой скважине в строматолитовых доломитах большая часть остаточных пустот заполнена вторичным кальцитом. В разнокристаллических, разнокристаллических с реликтовой цианобактериальной структурой, комковато-сгустковых и интракластовых доломитах кальцитизация прошла по пустотам выщелачивания.

Доломитообразование. Вторичное доломитообразование является процессом выпадения доломита в пустотном пространстве. При этом процессе ромбовидные кристаллы доломита формировались на стенках трещин, пор и каверн, а также внутри стилолитовых швов на раннем этапе наложенного галокатагенеза при выпадении кристаллов доломита из циркулирующих по пустотам высокоминерализованных раство-

ров. Максимально активно процесс доломитообразования происходил в пустотах, которые в наибольшей степени подверглись выщелачиванию. Это связано с тем, что наибольший объем магниевых вод перемещался именно в таких зонах. Данный процесс приводил к образованию вторичных кристаллов доломита в пустотном пространстве и соответственно к сокращению емкостного пространства (рис. 8).

Окремнение. Окремнение – заполнение пустот минералами кремнезема. Процесс, вероятнее всего, протекал на стадии катагенеза и был связан с флюидами, проходящими через породы, из которых вдоль пустот отлагался растворенный кремнезем. В разрезе исследуемой скважины окремнение встречается редко и отмечается по отдельным пустотам выщелачивания и трещинам (рис. 9). Опираясь на данные геофизического изучения скважины, можно констатировать, что окремнение приводило к понижению фильтрационно-емкостных свойств пород. С другой стороны, при окремнении увеличивалась хрупкость пород, что могло способствовать появлению трещиноватости и повышению проницаемости пород [7].

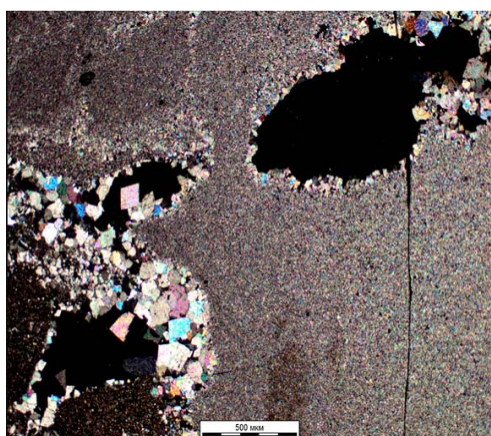


Рис. 8. Кристаллы доломита, выполняющие пустоты выщелачивания в доломите с реликтовой цианобактериальной структурой. Глубина отбора – 2070,85 м (ербогаченский горизонт). Николи скрещены

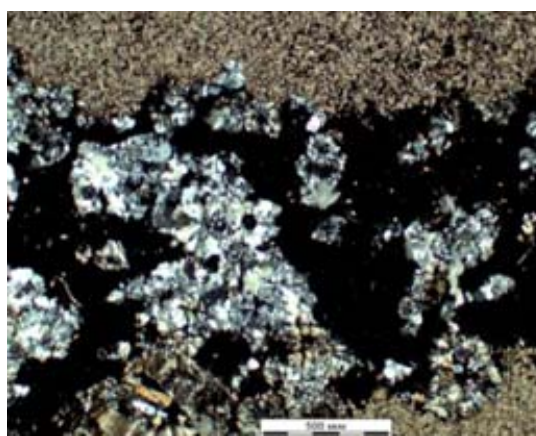


Рис. 9. Окремнение по трещинам в доломите микрокристаллическом. Глубина отбора – 1827,50 м (осинский горизонт), шлиф с анализатором. Николи скрещены

Сульфатизация. Сульфатизация – частичное или полное заполнение остаточных пустот кристаллами ангидрита, реже – гипса. О первичном или вторичном происхождении этих минералов можно говорить по их форме. Ангидрит в доломит-ангидритовых породах, имеющий таблитчатую форму кристаллов, вероятнее всего, первичный, т. е. образовался на раннем этапе диагенеза (рис. 10). Вторичные сульфаты образовались в результате проникновения сульфатных вод в пустоты карбонатных пород, при этом образуя пойкилитовую структуру или кристаллы, заполняющие межзерновое и межформенное пространство, которые имеют более позднее вторичное образование (рис. 11). Массовое выполнение пустот сульфатами, вероятно, происходило на этапе наложенного катагенеза, когда в поровое пространство начали поступать рассолы сульфатной стадии галогенеза. Как правило, сульфатизация приводит к существенному снижению емкости и проницаемости коллекторов. В исследуемой скважине сульфатизация затронула практически все литотипы и проявилась в выделении единичных кристаллов и в заполнении остаточных пустот ангидритом. В ербогаченском горизонте наблюдается преимущественно первичная, раннедиагенетическая сульфатизация, а в преображенском, усть-кутском и осинском горизонтах – вторичная, проявившаяся на этапе наложенного галокатагенеза.

Галитизация. Галитизация проявляется в выполнении пустотного пространства галитом. Существует несколько гипотез, объясняющих процесс галитизации. Наиболее распространенной среди исследователей является гипотеза галокатагенеза, по которой галит выпадает в емкостном пространстве в результате поступления в пластовые резервуары соленосной рапы из эвапоритовых формаций путем гравитационного просачивания, либо за счет отжима межкристальной рапы из соленосных толщ [8]. Процесс галитизации относится к последнему этапу наложенного катагенеза. Проведенные исследования на керновом материале рассматриваемой скважины подтверждают, что максимальное засоление, как правило, проявляется в относительно крупных пустотах, которые остались наиболее свободными после вторичного заполнения другими аутигенными минералами.



Рис. 10. Первичные кристаллы ангидрита в ангидрито-доломите. Глубина отбора – 2090,00 м (србогаченский горизонт). Николи скрещены

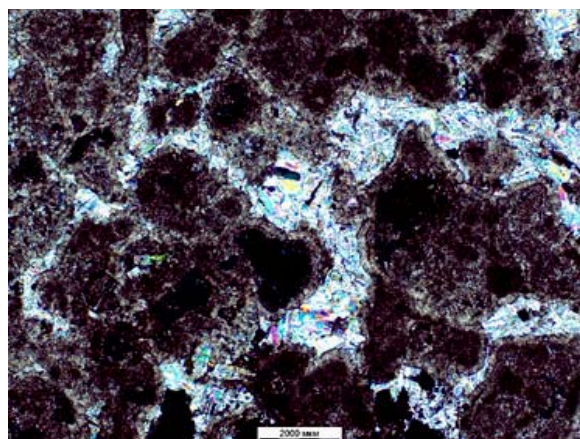


Рис. 11. Заполнение остаточных пустот кристаллами ангидрита в доломите комковато-сгустковом. Глубина отбора – 1773,77 м (осинский горизонт). Николи скрещены

В приподошвенной части осинского горизонта нами отмечены многочисленные пустоты правильной шарообразной формы, частично или полностью выполненные галитом. Их размер может достигать нескольких сантиметров. Предположительно такие «пузырьковые» пустоты могли возникнуть в результате жизнедеятельности цианобактериальных сообществ, которые продуцировали газ. Затем эти пузырьки газа в еще нелитифицированной породе поднимались вверх по породе, образуя каналы для поступления соленых растворов. Из этих соленых растворов хомогенным путем осаждался галит [3, 11].

Сложность изучения шлифов и образцов керна, в которых проявился данный процесс, определяется растворением галита при взаимодействии с буровыми растворами, а также при выпиливании стандартных образцов пород и изготовлении шлифов с использованием пресной воды. Однако по данным описания керна, результатам интерпретации геофизических исследований скважины и рентгеноструктурному анализу образцов из усть-кутского и осинского горизонтов обычно удается проследить неравномерное проявление галитизации. Иногда даже в керне отмечают поры, каверны и трещины, частично или полностью заполненные каменной солью, что заметно ухудшает фильтрационные и емкостные свойства карбонатных коллекторов (рис. 12). В целом галитизация, как и сульфатизация, привела к заметному ухудшению коллекторских свойств продуктивных горизонтов.

Таким образом, в породах-коллекторах проанализированной нами скважины широко проявились вторичные процессы, которые, изменяя первичные структуру и текстуру пород, оказали существенное воздействие на фильтрационно-емкостные свойства продуктивных горизонтов. Такие процессы, как перекристаллизация, доломитизация, выщелачивание, трещинообразование в целом их улучшают, образуя дополнительное пустотное пространство в породах. В результате выпадения новых минералов в пустотах пористость и проницаемость значительно снижается.



Рис. 12. Выполнение галитом трещин и пузырьковых пустот в доломите мелкокристаллическом.
Глубина отбора – 1862,4 м (усть-кутский горизонт)

Заключение

Рассмотрены особенности проявления вторичных процессов в венд-кембрийском карбонатном разрезе Непско-Ботубинской антеклизы и их влияние на емкостные и фильтрационные свойства пород перспективных в нефтегазоносном отношении горизонтах, основанные на детальном изучении материалов одной из пробуренных скважин и обобщении опубликованных по данному направлению работ.

Проведенные исследования позволили проанализировать все типы проявившихся здесь постседиментационных процессов, а также показать, что перекристаллизация, доломитизация и выщелачивание положительно влияли на фильтрационно-емкостные свойства карбонатных пород рассмотренных горизонтов. Данные процессы протекали практически во всех литотипах разреза. Однако наиболее интенсивно они проявились в доломитах разнокристаллических и доломитах разнокристаллических с реликтовой цианобактериальной структурой.

Негативно на коллекторские свойства повлияли процессы аутигенного минералообразования: кальцитизация, доломитообразование, окремнение, сульфатизация и галитизация. Наибольшее влияние на карбонатные породы данные процессы оказали в ербогаченском и преображенском горизонтах, практически уничтожив первично хорошие фильтрационно-емкостные свойства. Влияние процессов трещинообразования и стилолитизации на коллекторские свойства пород прослеживается менее однозначно. В целом стилолитовые швы и трещины являлись путями миграции флюидов, что приводило к улучшению коллекторских свойств. Аутигенное минералообразование наиболее интенсивно происходило преимущественно на стадии наложенного галокатагенеза. Это, прежде всего, касается заполнения пустотного

пространства вторичными ангидритом и галитом. Причем ясно прослеживается следующая последовательность вторичного минералообразования: сперва в пустотном пространстве выпадал кальцит, затем доломит, а после соли – ангидрит и галит.

Одинаковые литотипы в разных горизонтах разреза изучаемой скважины обладают разными коллекторскими свойствами. Одной из причин такого расхождения является неодинаковое проявление постседиментационных процессов в продуктивных горизонтах. Наилучшими коллекторскими свойствами обладают породы усть-кутского и осинского горизонтов, что связывается с более интенсивным протеканием процессов выщелачивания и доломитизации и менее активным проявлением процессов аутигенного минералообразования, а также с большей вертикальной однородностью пластов пород этих горизонтов. Вместе с тем для названных горизонтов в большей степени характерно засоление пород, которое достаточно уверенно прослеживается по промыслово-геофизическим данным.

Дальнейшее изучение особенностей проявления вторичных процессов в карбонатных породах венд-нижнекембрийского комплекса в различных участках Непско-Ботуобинской антеклизы будет способствовать установлению закономерностей формирования и распространения пород с повышенными емкостными и фильтрационными свойствами, а значит, повышению эффективности освоения нефтегазовых ресурсов рассматриваемого региона.

Литература

1. Губина, Е. А. Прогноз венд-нижнекембрийских карбонатных коллекторов нефти и газа центральной части Непско-Ботуобинской антеклизы на основе модели их формирования : дис. ... канд. геол.-минерал. наук : 25.00.12 / Е. А. Губина ; Всерос. нефтяной науч.-исслед. геологоразведоч. ин-т. – СПб., 2014. – 146 с.
2. Каламкар, Л. В. Нефтегазоносные провинции и области России и сопредельных стран / Л. В. Каламкар. – М. : Нефть и газ, 2005. – 570 с.
3. Китаева, И. А. Закономерности распределения и условия формирования пород-коллекторов в осинском горизонте в сводовой части Непско-Ботуобинской антеклизы (на примере Талаканского месторождения) / И. А. Китаева, А. С. Кузнецов // Осадочные бассейны, седиментационные и постседиментационные процессы в геологической истории : материалы VII Всерос. литол. совещ., Новосибирск, 28–31 окт. 2013 г. / Рос. акад. наук, Науч. совет по проблемам литологии и осадочных полезных ископаемых при ОНЗ. – Новосибирск, 2023. – Т. 2. – С. 10–13.
4. Китаева, И. А. Типы и генезис фильтрационно-емкостного пространства пород-коллекторов нижнекембрийских карбонатных отложений юго-западного склона Непско-Ботуобинской антеклизы : дис. ... канд. геол.-минерал. наук : 25.00.06 / И. А. Китаева ; Рос. гос. ун-т нефти и газа (нац. исслед. ун-т) им. И. М. Губкина. – М., 2020. – 179 с.
5. Коновальцева, Е. С. Условия формирования и закономерности распространения пород-коллекторов нижневендских нефтегазоносных отложений центральной части Непско-Ботуобинской антеклизы : дис. ... канд. геол.-минерал. наук : 25.00.06 / Е. С. Коновальцева ; Рос. гос. ун-т нефти и газа им. И. М. Губкина. – М., 2014. – 159 с.
6. Карбонатные толщи Восточной Сибири и их нефтегазоносность / В. Г. Кузнецов [и др.]. – М. : Научный мир, 2000. – 104 с.
7. Лемешко, М. Н. Литолого-геохимические критерии локализации карбонатных коллекторов усть-кутского нефтеносного горизонта центральных районов Не-

- пско-Ботуобинской антеклизы : дис. ... канд. геол.-минерал. наук : 25.00.16 / М. Н. Лемешко ; Нац. исслед. политехн. ун-т. – Томск, 2016. – 156 с.
8. Махнач, А. А. Постседиментационные изменения межсолевых девонских отложений Припятского прогиба / А. А. Махнач. – Минск : Наука и техника, 1980. – 198 с.
 9. Порошина, А. Д. Вторичные изменения карбонатных пород Непско-Ботуобинской антеклизы и их влияние на коллекторские свойства продуктивных горизонтов / А. Д. Порошина, О. В. Постникова // Современные проблемы машиноведения : сб. науч. тр. : в 2 ч. / М-во образования Респ. Беларусь, Гомел. гос. техн. ун-т им. П. О. Сухого, ПАО «ОАК» ОКБ Сухого, Таиз. ун-т ; под общ. ред. А. А. Бойко. – Гомель, 2023. – Ч. 2. – С. 179–182.
 10. Порошина, А. Д. Влияние постседиментационных процессов на коллекторские свойства венд-кембрийских пород Непско-Ботуобинской антеклизы / А. Д. Порошина // Новые технологии в газовой промышленности (газ, нефть, энергетика) : тез. докл. XIV Всерос. конф. молодых ученых, специалистов и студентов, Москва, 14–18 нояб. 2022 г. / Рос. гос. ун-т нефти и газа (нац. исслед. ун-т) им. И. М. Губкина ; сост.: А. Н. Комков, А. В. Закроец, К. Г. Бутырская ; отв. ред. В. Г. Мартынов. – М., 2022. – С. 38–39.
 11. Эволюция процессов минералообразования в терригенных породах раннего венда Непско-Ботуобинской антеклизы / А. В. Постников [и др.] // Литология и полезные ископаемые. – 2019. – № 1. – С. 31–43.
 12. Влияние вторичных преобразований на формирование коллекторских свойств осинского горизонта Непско-Ботуобинской антиклизы / О. В. Постникова [и др.] // Территория «Нефтегаз». – 2012. – № 11. – С. 24–27.
 13. Холодов, В. Н. Постседиментационные преобразования в элизионных бассейнах (на примере Восточного Предкавказья) / В. Н. Холодов. – М. : Наука, 1983. – 152 с.
 14. Япаскурт, О. В. Генетическая минералогия и стадийный анализ процессов осадочного породо- и рудообразования : учеб. пособие / О. В. Япаскурт. – М. : ЭСЛАН, 2008. – 356 с.

References

1. Gubina E. A. *Prognozvend-nizhekembriyski khkarbonatny khkollektorov nefti i gaza tsentral'noy chasti Nepsko-Botuobinskoy anteklizy na osnove modeli ikh formirovaniya*, Saint Petersburg, 2014. 146 p. (in Russian).
2. Kalamkarov L. V. *Oil and gas bearing provinces and regions of Russia and neighboring countries*. Moscow, Neft' i gaz Publ., 2005. 570 p. (in Russian).
3. Kitaeva I. A., Kuznetsov A. S. Laws of distribution and conditions of formation of reservoir rocks in the Osinsk horizon in the folded part of the Nepsko-Botuobinskaya anteklise (on the example of the Talakanskoye field). *Osadochnye basseiny, sedimentatsionnye i postsedimentatsionnye protsessy v geologicheskoi istorii: materialy VII Vserossiiskoe litologicheskoe soveshchanie, Novosibirsk, 28–31 okt. 2013 g.* [Sedimentary basins, sedimentation and post-sedimentation processes in geologic history: proceedings of the VII All-Russian lithologic meeting, Novosibirsk, October 28–31, 2013]. Novosibirsk, 2023, vol. 2, pp. 10–13 (in Russian).
4. Kitaeva I. A. *Types and genesis of filtration-capacity space of Lower Cambrian carbonate reservoir rocks of the southwestern slope of the Nepsko-Botuobinsky anteklise*. Moscow, 2020. 179 p. (in Russian).

5. Konoval'tseva E. S. *Formation conditions and distribution patterns of reservoir rocks of the Lower Vendian oil and gas bearing sediments of the central part of the Nepsko-Botuobinskaya anteklise*. Moscow, 2014. 159 p. (in Russian).
6. Kuznetsov V. G., Ilyukhin L. N., Bakina V. V. *Carbonate strata of Eastern Siberia and their oil and gas content*. Moscow, Nauchnyi mir Publ., 2000. 104 p. (in Russian).
7. Lemeshko M. N. *Lithological and geochemical criteria for localization of carbonate reservoirs of the Ust-Kutsk oil-bearing horizon in the central regions of the Nepsko-Botuobinskaya anteklise*. Tomsk, 2016. 156 p. (in Russian).
8. Makhnach A. A. *Post-sedimentation changes in inter-salt Devonian sediments of the Pripyat Trough*. Minsk, Nauka i tekhnika Publ., 1980. 198 p. (in Russian).
9. Poroshina A. D. Secondary changes in carbonate rocks of the Nepsko-Botuobinskaya anteklise and their influence on the reservoir properties of productive horizons. *Sovremennye problemy mashinovedeniya: sb. nauch. tr., part. 2*. Gomel', Sukhoi State Technical University of Gomel, 2023, pp. 179–182 (in Russian).
10. Poroshina A. D. Influence of post-sedimentation processes on the reservoir properties of Vendian-Cambrian rocks of the Nepsko-Botuobinsky anteklise. *Novye tekhnologii v gazovoi promyshlennosti (gaz, neft', energetika): tezisy dokladov XIV Vserossiiskoi konferentsii molodykh uchenykh, spetsialistov i studentov, Moskva, 14–18 noyabrya 2022 g.* – Moscow, Rossiiskii gosudarstvennyi universitet nefti i gaza im. I. M. Gubkina, 2022, pp. 38–39 (in Russian).
11. Postnikov A. V., Postnikova O. V., Iz'yurovai E. S. Evolution of mineral formation processes in terrigenous rocks of the Early Vendian of the Nepsko-Botuobinsky anteklise. *Litologiya i poleznye iskopaemye = Lithology and Mineral Resources*, 2019, no 1, pp. 31–43 (in Russian).
12. Postnikova O. V., Kitaeva I. A., Repina M. O., Omel'chenko O. V. Influence of secondary transformations on formation of reservoir properties of the Osinsk horizon of the Nepsko-Botuobinskaya anteklise. *Territoriya "Neftegaz" = Territorija "Neftegas"*, 2012, no. 11, pp. 24–27 (in Russian).
13. Kholodov V. N. *Post-sedimentation transformations in elision basins (on the example of the Eastern Precaucasus)*. Moscow, Nauka Publ., 1983. 152 p. (in Russian).
14. Yapaskurt O. V. *Genetic mineralogy and stadal analysis of sedimentary rock and ore formation processes*. Moscow, ESLAN Publ., 2008. 356 p. (in Russian).

Поступила 16.02.2024 г.

ПРАВИЛА ОФОРМЛЕНИЯ СТАТЕЙ ДЛЯ ЖУРНАЛА «Вестник Гомельского государственного технического университета имени П. О. Сухого»

Желающие опубликовать свои научные работы в журнале «Вестник Гомельского государственного технического университета имени П. О. Сухого» могут подать материалы в соответствии с требованиями, приведенными ниже, в редакцию журнала по адресу: пр. Октября, 48, 246746, г. Гомель, Республика Беларусь, тел./факс +375 232 214 373, e-mail: nich@gstu.by.

В ЖУРНАЛЕ ПРЕДУСМОТРЕНЫ СЛЕДУЮЩИЕ РУБРИКИ:

- Машиностроение и машиноведение
- Информатика, вычислительная техника и управление
- Материаловедение
- Энергетика
- Теоретическая физика
- Электротехника и электроника
- Физика высоких энергий
- Геология и разработка нефтяных и газовых месторождений
- Обработка конструкционных материалов
- Экономика и управление народным хозяйством
- Хроника научной жизни

I. Статья, направляемая в редакцию рецензируемого журнала, должна являться оригинальным материалом, неопубликованным ранее в других печатных изданиях, соответствовать профилю журнала. Статья должна иметь: 1) экспертное заключение; 2) сопроводительное письмо от организации; 3) сведения о каждом авторе (ученая степень, ученое звание, должность; полное и сокращенное наименование учреждений, где работают авторы; контактные данные; город, страна). E-mail/телефон достаточно привести для автора, являющегося контактным лицом.

II. Статья предоставляется в редакцию в двух экземплярах на белорусском, русском или английском языках. Электронный вариант статьи предоставляется на электронном носителе или присылается по электронной почте в редакцию журнала в формате текстового редактора *Word fo Windows*. Представленный электронный вариант статьи должен быть идентичен бумажному. В случае расхождений правильным считается бумажный вариант. Шрифт – *Times New Roman*, кегль – 12; выравнивание по ширине страницы; расстановка переносов *автоматическая* (расстановка переносов вручную недопустима); поля: верхнее, нижнее и правое – 25 мм, левое – 30 мм, междустрочный интервал – одинарный, абзацный отступ – 0,7 мм.

III. Статья должны иметь следующую структуру:

1. Индекс по Универсальной десятичной классификации (УДК);

- название статьи;
- инициалы и фамилии авторов;
- полное наименование учреждений, где работают авторы, с указанием города и страны.

2. Аннотация (авторское резюме) объемом 100–150 слов должна кратко представлять результаты работы и быть информативной, понятной, в том числе и в отрыве от основного текста статьи, хорошо структурированной.

3. Ключевые слова, отображающие базовую терминологию исследовательской работы; рекомендуемое количество ключевых слов/фраз – 5–10, количество слов внутри ключевой фразы – не более трех.

4. Метатекстовые данные (все то, что предшествует основному тексту статьи) приводятся также *на английском языке*, причем аннотация должна быть оригинальной (т. е. не являться дословным переводом русскоязычной (белорусскоязычной) аннотации). Если статья англоязычная – вышеуказанные данные приводятся на русском (белорусском) языке.

5. Основной текст статьи должен быть четко структурированным: введение, цели и задачи, методы, результаты, заключение (выводы).

Во *введении* должен быть дан краткий обзор литературы по изучаемому вопросу, сформулирована **цель работы** и, если необходимо, указана ее связь с важными научными и практическими направлениями.

Анализ источников, использованных при подготовке научной статьи, должен свидетельствовать о знании автором (авторами) статьи научных достижений в соответствующей области. В связи с этим обязательными являются ссылки на работы других авторов. При этом должны присутствовать ссылки на публикации последних лет, включая зарубежные публикации в данной области.

Основная часть статьи должна содержать описание методики, аппаратуры, объектов исследования и подробно освещать содержание исследований, проведенных автором (авторами). Полученные результаты должны быть обсуждены с точки зрения их научной новизны и сопоставлены с соответствующими известными данными. Основная часть статьи может делиться на подразделы (с разъяснительными заголовками).

В заключении должны быть в сжатом виде сформулированы основные полученные результаты с указанием их новизны, преимуществ и возможностей применения. При необходимости должны быть также указаны границы применимости полученных результатов.

6. Список использованных источников на русском (белорусском) языке оформляется в соответствии с требованиями Высшей аттестационной комиссии (ГОСТ 7.1–2003 «Библиографическая запись. Библиографическое описание. Общие требования и правила составления»). Цитированная литература приводится общим списком по мере упоминания, ссылки в тексте даются порядковым номером в квадратных списках (например, [1], [13–15]; ссылки на неопубликованные работы не допускаются).

7. Затем приводится список цитированных источников в романском алфавите («References») со следующей структурой: авторы (транслитерация); название статьи (транслитерация); [перевод названия статьи на английский язык в квадратных скобках]; название русскоязычного источника (транслитерация) – курсивом; [перевод названия источника на английский язык в квадратных скобках]; выходные данные с обозначениями на английском языке. Транслитерация русскоязычных названий выполняется согласно стандарту BSI (<https://translit.net/ru/bsi>). Англоязычные источники дублируются, но только с указанием фамилий всех авторов. Список литературы («References») приводится полностью отдельным блоком, повторяя список литературы к русскоязычной части, независимо от того, имеются ли в нем иностранные источники.

IV. Рисунки, вставленные в документ, должны быть хорошего качества, отсканированы с разрешением не менее 300 dpi в формате TIFF или JPG. Текст на рисунках должен быть набран гарнитурой «Times New Roman», причем начертание символов (греческое, латинское) должно соответствовать их начертанию в тексте. Латинские буквы необходимо набирать курсивом, греческие – прямо. Все обозначения на рисунках должны быть расшифрованы.

V. Таблицы располагаются непосредственно в тексте статьи. Каждая таблица должна иметь тематический заголовок. На все таблицы и рисунки следует давать ссылки в тексте.

VI. Формулы в тексте набираются с помощью встроенного в MS Word редактора формул Microsoft Equation 3.0, стиль *математический*, размер «по умолчанию». Буквы русского и греческого алфавита, числа, знаки математических формул набирают прямым шрифтом, латинские – курсивом. Например: n , S_m^2 , A_M^r , $R_{\min 2}$, \log , \max , \sin , const и т. п.

VII. Основным критерием целесообразности публикации является новизна и информативность статьи. Если по рекомендации рецензента статья возвращается автору на доработку, то переработанная рукопись вновь рассматривается редколлегией и датой поступления считается день получения редакцией окончательного ее варианта. Статьи, не соответствующие вышеперечисленным требованиям, к рассмотрению не принимаются и возвращаются авторам.