

УДК 622.245.1  
<http://doi.org/10.18799/29495407/2026/1/113>  
Шифр специальности ВАК: 2.5.2  
Научная статья



## Расчеты обсадных колонн в интервале распространения многолетнемерзлых пород и их модификация с помощью трехмерного моделирования

Л.Е. Кушнер<sup>1✉</sup>, М.С. Павлов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ООО «РН-Проектирование Добыча», Российская Федерация, г. Томск  
<sup>2</sup>Национальный исследовательский Томский политехнический университет,  
Российская Федерация, г. Томск

✉KushnerLE@rn-pd.rosneft.ru

**Аннотация.** Выполнен обзор научно-технических публикаций по вопросам построения математических моделей напряженно-деформированного состояния льдистых грунтов и водосодержащих сред, передающих избыточное давление на обсадные колонны. Проведены расчеты обсадных труб в интервале залегания многолетнемерзлых пород для типовой модельной скважины, расположенной в условиях вечной мерзлоты по «Методике выбора конструкции скважин в зоне мерзлых пород». Разработка уточненной методики расчета нагрузок, передаваемых на колонну, позволит обосновать снижение капитальных затрат при строительстве скважин за счет уменьшения металлоемкости скважинного оборудования до 8%.

**Ключевые слова:** многолетнемерзлые породы, обратное промерзание, крепление скважин, обсадные колонны, методика, моделирование, оптимизация

**Для цитирования:** Кушнер Л.Е., Павлов М.С. Расчеты обсадных колонн в интервале распространения многолетнемерзлых пород и их модификация с помощью трехмерного моделирования. *Известия Томского политехнического университета. Промышленная кибернетика*, 2026, Т. 4, № 1, С. 1–6. <http://doi.org/10.18799/29495407/2026/1/113>

**Конфликт интересов:** отсутствует.

UDC 622.245.1  
<http://doi.org/10.18799/29495407/2026/1/113>  
Scientific paper

## Casing strings calculations in the permafrost and their modification using three-dimensional modeling

L.E. Kushner<sup>1✉</sup>, M.S. Pavlov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>"RN-Upstream Design" Limited Liability Company, Tomsk, Russian Federation  
<sup>2</sup>National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation

✉KushnerLE@rn-pd.rosneft.ru

**Abstract.** The paper provides a review of scientific and technical publications on the construction of mathematical models of the stress-strain state of icy soils and water-containing media that transmit excessive pressure to the casing. Calculations of casing strings of permafrost for a typical model well located in permafrost conditions according to the "Methodology for selecting well designs in permafrost". The development of an updated methodology for calculating the loads transmitted to the casing strings and its stress-strain state will make it possible to justify a reduction in capital costs during well construction due the metal consumption of downhole equipment to 8%.

**Keywords:** permafrost, reverse freezing, well casing, casing strings, methodology, modeling, optimization

**For citation:** Kushner L.E., Pavlov M.S. Casing string calculations in the permafrost and their modification using three-dimensional modeling. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Industrial Cybernetics*, 2026, vol. 4, no. 1, pp. 1–6. <http://doi.org/10.18799/29495407/2026/1/113>

**Conflict of interest:** none.

## Введение

Существенная доля нефтегазовых активов (до 60 %) сосредоточена в регионах с многолетнемерзлыми грунтами. География их залегания в Северном полушарии отражена на рис. 1; карта построена с использованием данных моделирования за 2000–2016 гг. с детализацией 1 км<sup>2</sup> [1].

При проектировании эксплуатационных скважин в криолитозоне ключевое значение имеет выбор конструктивных и технологических решений, направленных на минимизацию рисков:

- деформации и смятия обсадных труб;
- разрушения грунта в приустьевой зоне (образование воронок и провалов);
- нарушения осевой устойчивости конструкции;
- вертикального смещения (просадки) колонн.

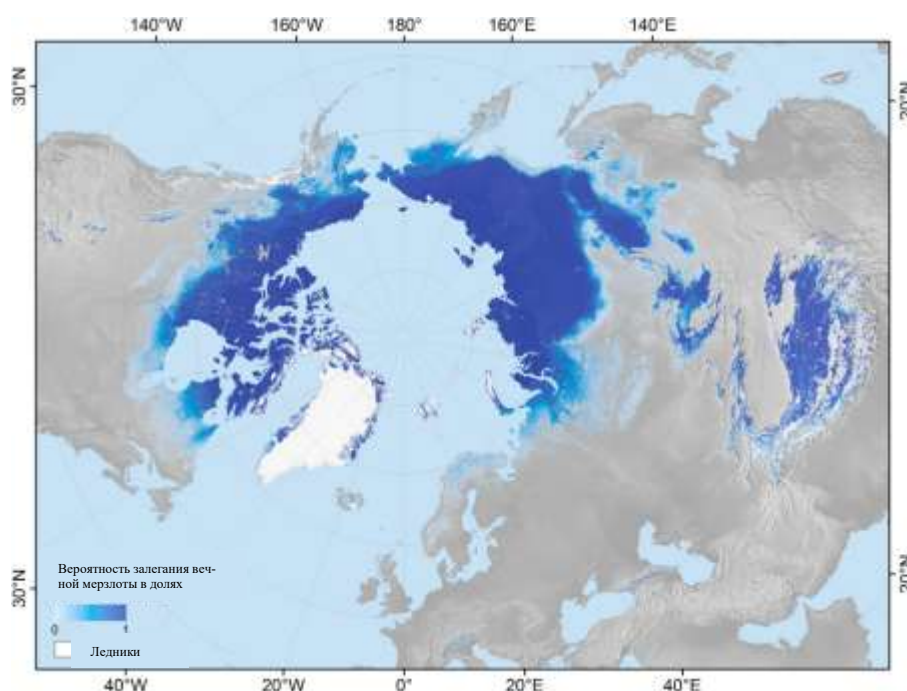
При расчете конструкции скважин в интервале распространения многолетнемерзлых пород (ММП) в качестве руководящего документа, как правило, применяется «Методика выбора конструкции скважин в зоне мёрзлых пород» [2]. При этом наблюдается низкая доля сходимости результатов: по давлению

расширяющейся жидкости и по расчету на обратное промерзание. Целью работы является формулировка предложений, направленных на решение данной проблемы с помощью унификации подхода при определении напряженно-деформированного состояния обсадных труб в зоне распространения многолетнемерзлых пород. Для выполнения цели поставлен ряд задач:

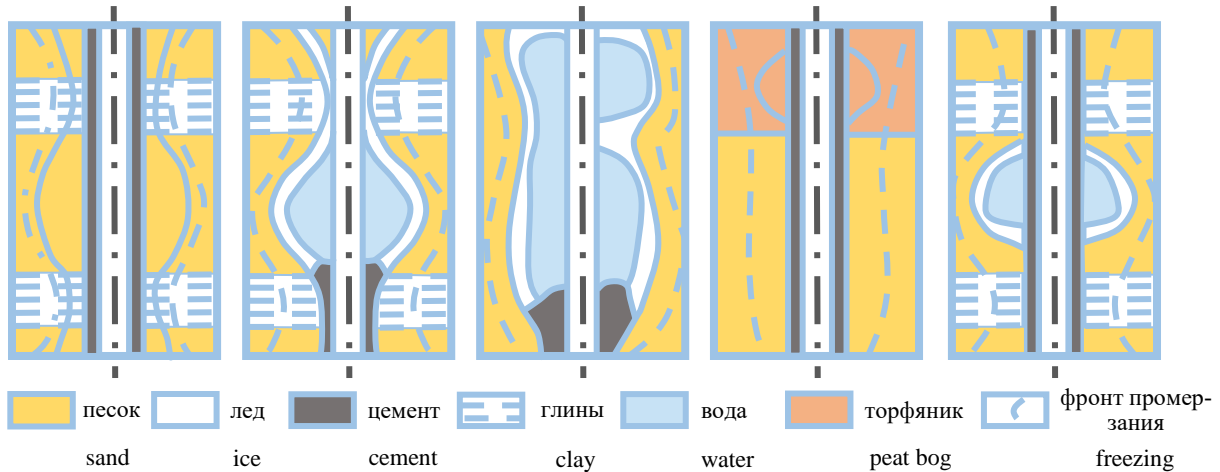
1. Выполнить обзор научно-технических публикаций по вопросам построения математических моделей напряженно-деформированного состояния льдистых грунтов и водосодержащих сред, передающих избыточное давление на обсадные колонны.

2. Произвести расчеты обсадных труб в интервале залегания многолетнемерзлых пород для типовой модельной скважины, расположенной в условиях вечной мерзлоты, по [2]. Провести анализ результатов.

3. Разработать уточненную методику определения наружных давлений на обсадные колонны, находящиеся в водосодержащих средах, а также льдистых грунтах, с помощью построения комплексной конечно-объемной модели.



**Рис. 1.** Вероятность распространения многолетнемерзлых пород со среднегодовой температурой грунтов ниже 0 °C  
**Fig. 1.** Permafrost probability calculated as the fraction of model runs with MAGT below 0°C



**Рис. 2.** Схемы моделей возникновения сминающего давления на обсадные трубы в криолитозоне  
**Fig. 2.** Diagrams of models of the occurrence of reverse freezing on casing strings in the permafrost

### Анализ публикаций

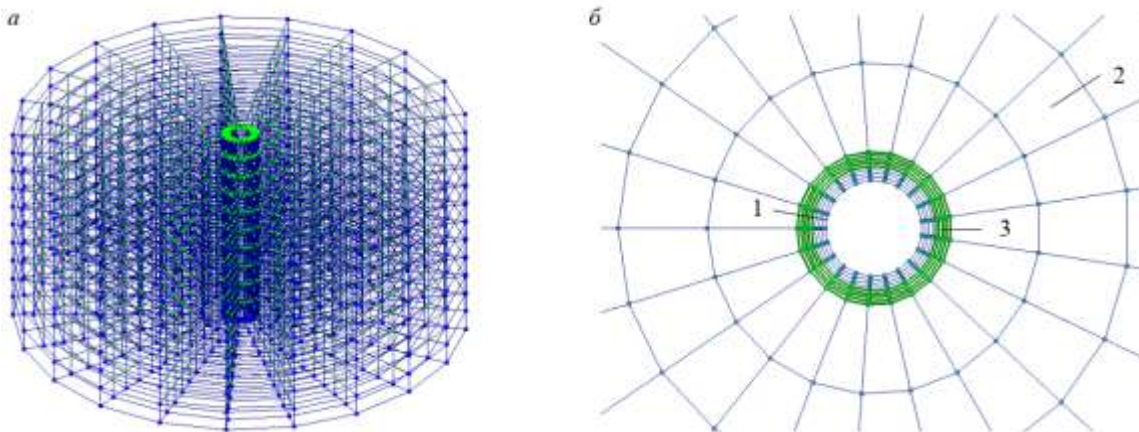
На рис. 2 представлены схемы моделей возникновения сминающего давления на обсадные трубы в зоне распространения ММП при условии остановки эксплуатационной или нагнетательной скважины и заморзания водосодержащих сред в заколонном пространстве [2].

В исследовании [3] представлен алгоритм расчета критических нагрузок в зависимости от физико-механических характеристик крепи. Авторами предложено теоретическое обоснование процесса деформации обсадных труб, вызванного осевыми напряжениями при оттаивании многолетнемерзлых пород. В качестве основного фактора возникновения таких нагрузок рассматривается природная неоднородность и слоистая структура мерзлого массива.

В 2004 г. были проведены исследования сложного напряженно-деформированного состояния крепи скважины [4]. При этом рассматривались два

расчетных случая: с учетом и без учета осевой растягивающей силы. Установлено, что осевая растягивающая сила может увеличивать эквивалентное напряжение на 15 %.

Для расчета полимерных обсадных колонн предложен алгоритм численного моделирования в среде ЛИРА-САПР (рис. 3). Использование конечно-объемных элементов позволяет детально описать структуру окружающего массива (породу и лед) и учесть его природную неоднородность. Специфика фазового перехода воды в заколонном пространстве учитывается через задание соответствующих величин объемного расширения. Модель базируется на допущении о равномерном (симметричном) заморзании воды, происходящем при достижении температурных показателей  $-1,5 \dots -2$  °С [5]. При этом вопрос определения оптимальной конструкции скважины из стальных обсадных труб с помощью трехмерного моделирования остался нерешенным.



**Рис. 3.** Расчетная схема: а) фрагмент трубы в массиве породы; б) поперечное сечение; 1 – труба из НПВХ; 2 – массив горной породы; 3 – лед

**Рис. 3.** Design model: а) fragment of a pipe in a rock; б) cross section; 1 – pipe made of UPVC; 2 – rock mass; 3 – ice

### Расчет обсадных колонн по актуальной методике

Расчет обсадных колонн эксплуатационных и нагнетательных скважин в интервале распространения ММП производится в два этапа:

В соответствии с «Инструкцией по расчету обсадных колонн для нефтяных и газовых скважин» [6, 7] определяются:

- наружные избыточные давления;
- внутренние избыточные давления;
- растягивающие нагрузки по телу трубы и резьбовому соединению;
- коэффициенты запаса прочности для каждого вида нагрузки.

Расчет в соответствии с [2].

Для выполнения расчета воспользуемся типовыми проектными решениями для эксплуатационной скважины. Конструкция скважины состоит из трех колонн: кондуктора, эксплуатационной

колонны и хвостовика (без учёта термокейса). В разрезе присутствуют многолетнемерзлые породы (0–400 м верт.).

Произведем расчет в соответствии с [2]: по давлению расширяющейся жидкости (по Клапейрону–Клаузиусу), по расчету на обратное промерзание (для нормальных условий и для условий АВПД).

Расчетная масса металла (таблица) различается на 8 % для различных методик. Анализ средней стоимости обсадных труб показал максимальную расходимость в стоимости на 11 % между подходом по давлению расширяющейся жидкости и по расчету на обратное промерзание [2]. Данная разница очень существенна при масштабировании выбранных обсадных труб на большинство отечественных проектов. Подбор оптимальных параметров при определении обратного промерзания может существенно снизить металлоёмкость скважин и капиталовложения при их строительстве.

**Таблица.** Анализ обсадных колонн в условиях распространения многолетнемерзлых пород для типовой скважины  
**Table.** Analysis of casing strings in permafrost conditions for a typical well

Метод Method [2]	Название колонны Casing string name	Диаметр, мм Diameter, mm	Тип соединения Connection type	Группа прочности Strength group	Толщина стенки, мм Wall thickness, mm	Длина, м Length, m	Масса, т Weight, t	Масса суммарная, т Total weight, t
По давлению расширяющейся жидкости By the pressure of the expanding liquid	Термокейс Thermocase	630,0	Фланцевое Flanged	-	-	22,5	4,04	151,10
	Кондуктор Surface casing	244,5	ОТТМ Buttress connection	Д/К55	7,9	742	35,22	
	Эксплуатационная Production casing	177,8			6,9	1441	99,23	
	Хвостовик Liner string	114,3			5,2	735	12,60	
По расчету на обратное промерзание (н.у.) Calculation for reverse freezing (standard conditions)	Термокейс Thermocase	630,0	Фланцевое Flanged	-	-	22,5	4,04	164,05
	Кондуктор Surface casing	244,5	ОТТМ Buttress connection	Д/К55	7,9	742	35,22	
	Эксплуатационная Production casing	177,8		Е/Н80	9,2	1441	112,19	
	Хвостовик Liner string	114,3		Д/К55	5,2	735	12,60	
По расчету на обратное промерзание (АВПД) Calculation for reverse freezing (abnormally high reservoir pressures)	Термокейс Thermocase	630,0	Фланцевое Flanged	-	-	22,5	4,04	164,05
	Кондуктор Surface casing	244,5	ОТТМ Buttress connection	Д/К55	7,9	742	35,22	
	Эксплуатационная Production casing	177,8			9,2	1441	112,18	
	Хвостовик Liner string	114,3			5,2	735	12,60	

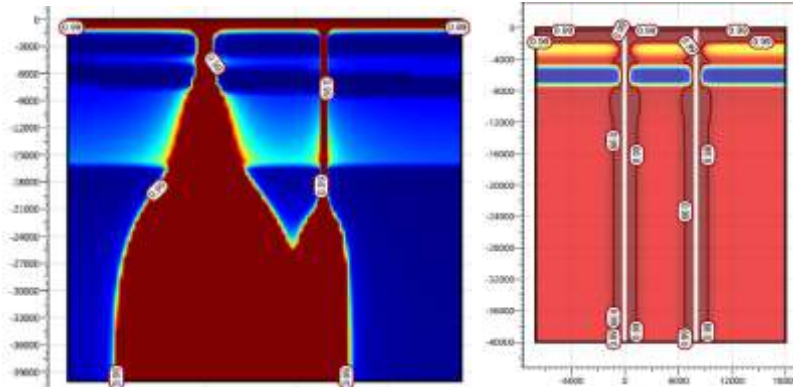


Рис. 4. Фронт растепления многолетнемерзлых пород между двумя скважинами  
Fig. 4. Freezing front of permafrost between two wells

### Разработка уточненной методики определения наружных давлений на обсадные колонны

Существует практика определения фронта растепления ММП и прогнозирования радиуса растепления одной или нескольких скважин, находящихся в непосредственной близости друг от друга (рис. 4) с помощью специализированного ПО «Frost-3D Universal» [8]. Результаты работ по прогнозированию фронта растепления использованы в качестве исходных данных для моделирования типовой модельной скважины

Для выбора наиболее подходящего метода и уточнения определения избыточного давления в заколонном пространстве, возникающего в водосодержащих средах (при замерзании горных пород, цемента, буферных жидкостей), предложено построить комплексную модель напряженно-деформированного состояния скважин при обратном промерзании в зоне ММП и выполнить анализ напряженно-деформированного состояния с использованием специализированного ПО Ansys Workbench [9].

Предложено учесть фронт обратного промерзания и растепления ММП (рис. 4) и смоделировать объемное увеличение льдистых грунтов, а также водосодержащих сред в межколонном пространстве. При построении данной модели должны быть учтены:

- геокриологические условия района работ;
- инженерно-геологические условия;
- конструкция скважин и теплофизические свойства материалов;
- объемная деформация льдистых грунтов при замерзании и растеплении.

### Заключение

В рамках выполнения работы проанализирована конструкция скважины, находящейся в условиях распространения ММП. Анализ показал максимальную расходимость в металлоемкости на 8 % для [2] по давлению расширяющейся жидкости и по расчету на обратное промерзание.

Проанализированы основные способы построения математических моделей напряженно-деформированного состояния для определения наружных избыточных давлений. Наиболее перспективной для дальнейших исследований является модель В.А. Стетюхи [5], учитывающая неоднородность льдистых грунтов и их объемные деформации.

Предложен собственный метод построения комплексной модели напряженно-деформированного состояния скважин, основанный на построении расчетной схемы расположения горных пород вокруг заданной конструкции скважины, способных объемно деформироваться и сминать обсадные трубы.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Northern hemisphere permafrost map based on TTOP modelling for 2000–2016 at 1 km<sup>2</sup> scale. J. Obu, S. Westermann, A. Bartsch, N. Berdnikov, H. Christiansen, A. Dashtseren, R. Delaloye, B. Elberling, B. Etzelmüller, A. Kholodov, A. Khomutov, A. Kääh, M. Leibman, A. Lewkowicz, S. Panda, V. Romanovsky, R. Way, A. Westergaard-Nielsen, T. Wu, J. Yamkhin, D. Zou. *Earth-Science Reviews*, 2019, Vol. 193, pp. 299–316. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2019.04.023> EDN: KISYKI
2. РД 00158758-207-99. Методика выбора конструкции скважин в зоне мерзлых пород. Тюмень: ООО «ТюменНИИгипрогаз», 1999. 30 с.
3. Солдатов П.В. *Словное воздействие оттаивающих пород на крепь скважин в Арктических регионах*: дис. ... канд. техн. наук. Якутск, 2013. 150 с.
4. Кузнецов В.Г. *Техника и технология повышения долговечности крепи скважин в криолитозоне (проблемы и решения)*: дис. ... д-ра техн. наук. Тюмень, 2024. 329 с.
5. Стетюха В.А., Железняк И.И. Методика расчета на устойчивость эксплуатационной колонны из полимерного материала в многолетнемерзлых породах. *Записки Горного института*, 2020, Т. 241, С. 22–28. DOI: 10.31897/PMI.2020.1.22 EDN: RKVPZB

6. РД 39-00147001-767-2000 *Инструкция по расчету обсадных колонн для нефтяных и газовых скважин*. М.: Всесоюзный научно-исследовательский институт буровой техники (ВНИИБТ), 1997. 99 с.
7. ГОСТ 632-80. *Трубы обсадные и муфты к ним. Технические условия*. М.: Стандартиформ, 2010. 75 с.
8. *Frost 3D. Пакет программ для прогнозных расчетов при проектировании на многолетнемерзлых грунтах и создания цифровых двойников*. URL: [www.frost3d.ru](http://www.frost3d.ru) (дата обращения: 30.11.2025).
9. *Ansys Workbench (Academic version 2020)*. URL: [www.ansys.com](http://www.ansys.com) (дата обращения: 30.11.2025).

### Информация об авторах

**Лев Евгеньевич Кушнер**, инженер 2 категории, ООО «РН-Проектирование Добыча», Российская Федерация, 634057, г. Томск, пр. Мира, 70а; [KushnerLE@rn-pd.rosneft.ru](mailto:KushnerLE@rn-pd.rosneft.ru), <https://orcid.org/0000-0001-8202-0926>  
**Михаил Сергеевич Павлов**, кандидат физико-математических наук, доцент отделения нефтегазового дела, Инженерная школа природных ресурсов, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Российская Федерация, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. [mspavlov@tpu.ru](mailto:mspavlov@tpu.ru); <https://orcid.org/0000-0001-6526-5892>

Поступила в редакцию: 28.01.2026

Поступила после рецензирования: 20.02.2026

Принята к публикации: 28.03.2026

### REFERENCES

1. Obu J., Westermann S., Bartsch A., Berdnikov N., Christiansen H., Dashtseren A., Delaloye R., Elberling B., Etzelmüller B., Kholodov A., Khomutov A., Käab A., Leibman M., Lewkowicz A., Panda S., Romanovsky V., Way R., Westergaard-Nielsen A., Wu T., Yamkhin J., Zou D. Northern Hemisphere permafrost map based on TTOP modelling for 2000–2016 at 1 km<sup>2</sup> scale. *Earth Science Reviews*, 2019, vol. 193, pp. 299–316. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2019.04.023> EDN: KISYKI.
2. *RD 00158758-207-99. Methodology for selecting well design in permafrost zones*. Tyumen, TyumenNIIgiprogaz Publ., 1999. 30 p. (In Russ.)
3. Soldatov P.V. *Force impact of thawing rocks on well lining in Arctic regions*. Cand. Diss. Yakutsk, 2013. 150 p. (In Russ.)
4. Kuznetsov V.G. *Technique and technology for increasing the durability of well lining in the cryolithozone (problems and solutions)*. Dr. Diss. Tyumen, 2024. 329 p. (In Russ.)
5. Stetjuha V.A., Zheleznyak I.I. Methodology for calculating the stability of the polymer operating string in permafrost. *Journal of Mining Institute*, 2020, vol. 241, pp. 22–28. DOI: 10.31897/PMI.2020.1.22 EDN: RKVPZB
6. *RD 39-00147001-767-2000. Instructions for calculating casing strings for oil and gas wells*. Moscow, All-Union Research Institute of Drilling Equipment (VNIIBT) Publ., 1997. 99 p. (In Russ.)
7. SS 632-80. *Casing pipes and couplings therefor. Specifications*. Moscow, Standartinform Publ., 2010. 75 p. (In Russ.)
8. *Frost 3D. Software package for predictive calculations in permafrost design and creation of digital twins*. Available at: [www.frost3d.ru](http://www.frost3d.ru) (accessed 30 November 2025).
9. *Ansys Workbench (Academic version 2020)*. Available at: [www.ansys.com](http://www.ansys.com) (accessed 30 November 2025).

### Information about the authors

**Lev E. Kushner**, 2<sup>nd</sup> Category Engineer, "Rn-Upstream Design" Limited Liability Company, 70a, Mira avenue, Tomsk, 634027, Russian Federation; [KushnerLE@rn-pd.rosneft.ru](mailto:KushnerLE@rn-pd.rosneft.ru), <https://orcid.org/0000-0001-8202-0926>  
**Mikhail S. Pavlov**, Cand. Sci. (Phys.-Math.), Associate Professor, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation; [mspavlov@tpu.ru](mailto:mspavlov@tpu.ru); <https://orcid.org/0000-0001-6526-5892>

Received: 28.01.2026

Revised: 20.02.2026

Accepted: 28.03.2026