

## СТАТЬЯ

УДК 624.139

DOI 10.17513/use.38382

**ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ТЕПЛОИЗОЛИРУЮЩЕГО СЛОЯ НЕФТЕПРОВОДА, ПРОЛОЖЕННОГО В УСЛОВИЯХ ВЕЧНОЙ МЕРЗЛОТЫ****<sup>1</sup>Колосова Н.Б., <sup>2</sup>Ринейская А.А., <sup>1</sup>Колосов Е.С., <sup>1</sup>Панфилов А.А.**

<sup>1</sup>ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», Санкт-Петербург, e-mail: nb.kolosova@yandex.ru, eskoll1978@yandex.ru, apanfilov@spbstu.ru;  
<sup>2</sup>ООО «Энигма-С», Санкт-Петербург, e-mail: aarin@mail.ru

Цель работы – автоматизация подбора оптимальных параметров теплоизолирующего слоя, подстилающего нефтепровод, проложенного наземным способом на многолетнемерзлых грунтах. При прокладке нефтепровода в условиях вечной мерзлоты возникает зона оттаивания грунта, которая впоследствии в период эксплуатации может привести к негативным явлениям, возникающим в грунте, и, как следствие, возникновению деформаций в нефтепроводе. Для уменьшения ореола оттаивания используется теплоизолирующий слой, подстилающий нефтепровод. В данной статье описывается способ определения оптимальных размеров теплоизолирующего слоя, подстилающего нефтепровод и позволяющего свести зону оттаивания мерзлого грунта вокруг трубопровода к минимуму. В качестве модели использовался стальной нефтепровод по аналогу с трубопроводом Заполярье – Пурпе. Для расчетов использовались характеристики грунтов Республики Саха. Материал теплоизолирующего слоя представляет собой пенополиуретан. Исследование проводилось в программном комплексе PLAXIS 2D. В результате исследования разработан алгоритм определения оптимальных размеров теплоизолирующего слоя, подстилающего нефтепровод. Полученный алгоритм позволяет автоматизировать поиск оптимальных параметров теплоизолирующего слоя путем минимизации не только зоны оттаивания грунта, но и затрат на теплоизоляцию. Разработанный алгоритм является универсальным и может быть реализован в любом программном обеспечении (общем или специальном) с любой степенью дискретизации шага расчета.

**Ключевые слова:** нефтепровод, теплоизолирующий слой, параметры, многолетнемерзлый грунт, глубина оттаивания, оптимизация параметров, алгоритм

**OPTIMIZATION THERMAL INSULATION LAYER PARAMETERS OF OIL PIPELINE LAID IN PERMAFROST CONDITIONS****<sup>1</sup>Kolosova N.B., <sup>2</sup>Rineyskaya A.A., <sup>1</sup>Kolosov E.S., <sup>1</sup>Panfilov A.A.**

<sup>1</sup>Peter the Great Saint Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg, e-mail: nb.kolosova@yandex.ru, eskoll1978@yandex.ru, apanfilov@spbstu.ru;  
<sup>2</sup>Enigma-S Ltd, Saint Petersburg, e-mail: aarin@mail.ru

The purpose of this work is to automate the search for optimal parameters of the insulating layer underlying the oil pipeline laid by land method on permafrost soils. When laying an oil pipeline in permafrost conditions, a soil thawing zone occurs, which can subsequently lead to negative phenomena occurring in the soil during operation and, as a result, deformations in the pipeline. To reduce the halo of thawing, a heat-insulating layer underlying the oil pipeline is used. This article describes a method for determining the optimal size of the insulating layer underlying an oil pipeline and reducing the thawing zone of frozen soil around the pipeline to a minimum. A steel oil pipeline similar to the Zapolyarye – Purpe pipeline was used as a model. The soil characteristics of the Sakha Republic were used for calculations. Polyurethane foam is the material of the insulating layer. The study was conducted in the PLAXIS 2D software package. As a result of the research, the algorithm has been developed for determining the optimal size of the insulating layer underlying the oil pipeline. The obtained algorithm makes it possible to automate the search for optimal parameters of the insulating layer by minimizing not only the thawing zone of the soil, but also the costs of thermal insulation. The developed algorithm is universal and can be implemented in any software (general or special) with any degree of discretization of the calculation step.

**Keywords:** oil pipeline, thermal insulation layer, parameters, permafrost, optimization of parameters, algorithm, depth of thawing,

**Введение**

Интенсивное освоение месторождений в районах с многолетнемерзлыми грунтами привело к значительному увеличению строительства нефте- и газопроводов, обеспечивающих транспортировку энергоресурсов. Это обстоятельство требует особого подхода как на стадии проектирования, так и на стадии строительства и эксплуатации

транспортирующих трубопроводов [1]. Известно, что в мировом опыте при их строительстве в условиях вечной мерзлоты используются три способа прокладки: подземный, наземный и надземный [2, 3]. Следует отметить, что наземный способ прокладки, по сравнению с надземным и подземным, обладает конструктивной простотой; не требует дополнительных разработок много-

летнемерзлого грунта; установки сложного оборудования, контролирующего температурные изменения, и, как следствие, имеет экономическое преимущество по сравнению с другими способами. Кроме того, следует отметить, что наземные трубопроводы демонстрируют наименьшую глубину оттаивания грунтов, напрямую влияющую на процессы морозного пучения [4, 5].

С другой стороны, перед проектировщиками и строителями стоит задача получения максимального срока эксплуатации трубопровода в условиях вечной мерзлоты. Одним из способов увеличения срока эксплуатации трубопровода, по мнению авторов, является поиск эффективных конструктивных и технологических решений при наземной укладке трубопроводов.

При анализе научной литературы выяснилось, что ряд работ носит экспериментальный характер и не отражает связь между конструктивно-технологическими параметрами трубопроводов и их влиянием на температурный режим многолетнемерзлых грунтов [4]. С другой стороны, авторы других работ описывают взаимосвязь между различными физико-механическими свойствами мерзлого грунта и негативными явлениями, возникающими в массиве многолетнемерзлых грунтов (морозное пучение, трещинообразование в грунте и др.) [5, 6]. Однако в этих работах также не отражается влияние конструктивных решений (в частности, параметров теплоизоляции) на температурный процесс многолетнемерзлого грунта.

Таким образом, анализ научной литературы показал отсутствие решения проблемы взаимосвязи параметров теплоизоляции трубопровода с термическими параметрами многолетнемерзлых грунтов.

**Целью исследования** является нахождение оптимальной ширины, подстилающей нефтепровод теплоизоляции, которая позволит (по мнению авторов) максимально снизить негативное влияние на мерзлый грунт основания, тем самым сохраняя его природ-

ную устойчивость и сокращая риск возникновения процессов морозного пучения.

Задачей исследования являлось определение изменения термических показателей системы трубопровод – грунт. В процессе моделирования было получено распространение этих показателей в системе труба – грунт для нефтепровода, установленного наземным способом на многолетнемерзлых грунтах: песке, супеси, суглинке и глине.

### Материалы и методы исследования

При определении конструкции исследуемой модели авторы опирались на проведенные исследования в области взаимодействия системы трубопровод – мерзлый грунт [5–7]. Расчетное исследование проводилось в программном комплексе (ПК) PLAXIS 2D. Исследовался слой теплоизоляции, подстилающий нефтепровод, из пенополиуретана компании ТЕХНОНИКОЛЬ с характеристиками, представленными в табл. 1.

В качестве исследуемого грунта рассматривались поочередно песок, супесь, суглинок и глина – наиболее часто встречающиеся в условиях вечной мерзлоты типы грунта. Характеристики последних представлены в табл. 2.

Для максимального приближения к реальным условиям расчетной модели в ПК PLAXIS 2D были приняты помесечные значения атмосферной температуры г. Усть-Мома Республики Саха, которые варьировались от 14,8 °С (июль) до -44,9 °С (январь).

Несмотря на многочисленность имеющихся факторов, влияющих на термическое состояние системы нефтепровод – грунт, в качестве исследуемых факторов были приняты глубина оттаивания и ширина ореола оттаивания. Именно эти показатели (по мнению авторов) могут вызвать негативные опасные природные явления (морозное пучение, растрескивание грунтов и др.) и привести к потере несущей способности мерзлых грунтов и, как следствие, к потере устойчивости непосредственно нефтепровода.

Таблица 1

Основные характеристики теплоизоляционного слоя

№	Наименование характеристики	Величина
1	Плотность, г	27
2	Модуль упругости, $E_p$ , МПа	17
3	Удельная теплоемкость, $c$ , кДж/кг·°С	1,45
4	Коэффициент теплопроводности, $\lambda$ , Вт/м·°С	0,034

Источник: составлено авторами.

Основные характеристики мерзлых грунтов

№	Наименование характеристики, обозначение, размерность	Тип грунта			
		Песок средней крупности	Супесь пластичная	Суглинок мягко-пластичный	Глина легкая песчаная пластично-мерзлая
1	Плотность грунта, $\rho$	1,78	1,82	1,82	1,67
2	Плотность частиц грунта, $\rho$	2,66	2,7	2,71	2,73
3	Коэффициент Пуассона, $\mu_0$	0,22	0,3	0,34	0,35
4	Удельный вес, $\gamma_p$ , кг/м <sup>3</sup>	1780	1820	1820	1670
5	Угол внутреннего трения, $\varphi_n$ , град	35	18	15	14
6	Суммарная влажность, $W_{tot}$ , %	25	23	26	30,6
7	Коэффициент пористости, $e_f$	0,87	0,82	0,88	1,128
8	Число пластичности, $I_p$	-	0,06	0,09	0,208
9	Модуль деформации, $E$ , МПа	30	8	7	3,19
10	Удельное сцепление, $C_n$ , кПа	1	9	15	36
11	Суммарная льдистость, $i_{tot}$ , %	39	34	39	2,7
12	Температура начала замерзания, $T_{вр}$ , °С	-0,13	-0,67	-0,68	-0,25
13	Среднегодовая температура на глубине 10 м, °С	-7	-7	-7	-7
14	Удельная теплоемкость, $c$ , Дж/кг·°С	750	850	950	950
15	Объемная теплоемкость мерзлого грунта, $C_p$ , ккал/м <sup>3</sup> ·°С	435	487	535	667
16	Коэффициент теплопроводности талого/мерзлого грунта, $\lambda_{th/f}$ , ккал/м·ч·°С	1,91/2,48	1,69/1,92	1,45/1,65	1,14/1,36

Источник: составлено авторами.

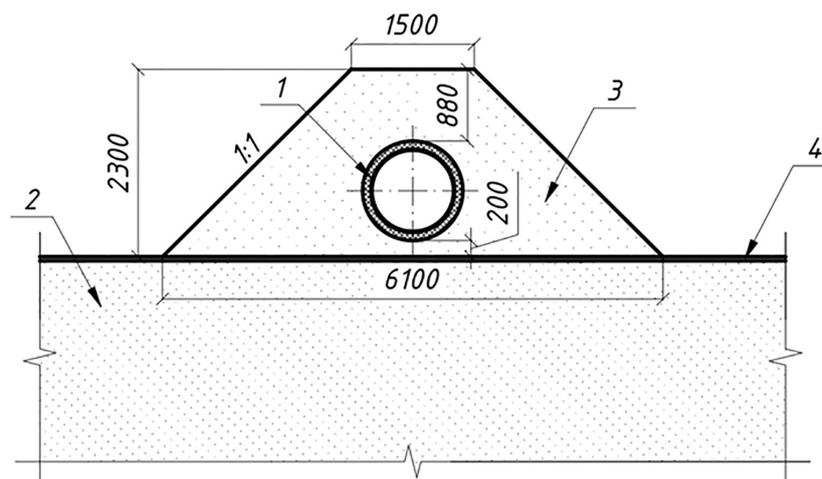


Рис. 1. Расчетная модель наземного нефтепровода: 1 – нефтепровод, диаметром 1200 мм, 2 – мерзлый грунт, 3 – насыпной грунт (песок), 4 – моховой слой  
Источник: составлено авторами

Учитывая, что область оттаивания наземных магистральных трубопроводов располагается непосредственно под трубопроводом, исследование проводилось для

теплоизолирующего слоя, подстилающего трубопровод. Для нахождения оптимальных параметров данного слоя определялась зона оттаивания грунта. За оптималь-

ные параметры теплоизолирующего слоя были приняты параметры, при которых глубина оттаивания не достигала поверхности многолетнемерзлого грунта.

Первоначально подбор геометрических параметров подстилающего нефтепровод теплоизолирующего слоя производился на основе модели, представленной на рис. 1.

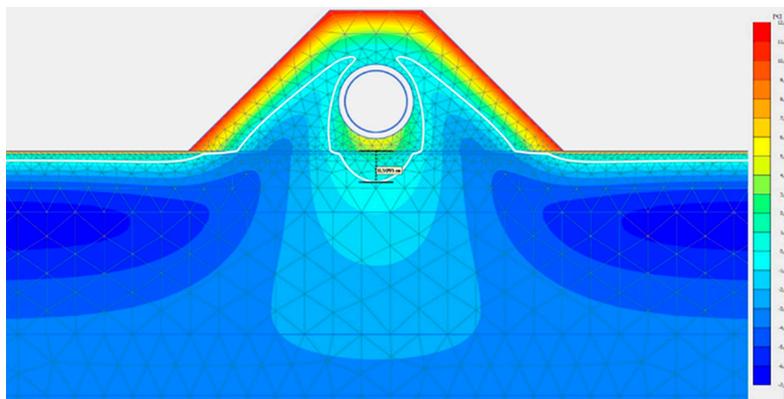


Рис. 2. Температурные поля нефтепровода без подстилающего теплоизолирующего слоя в условиях мерзлого песка  
Источник: составлено авторами

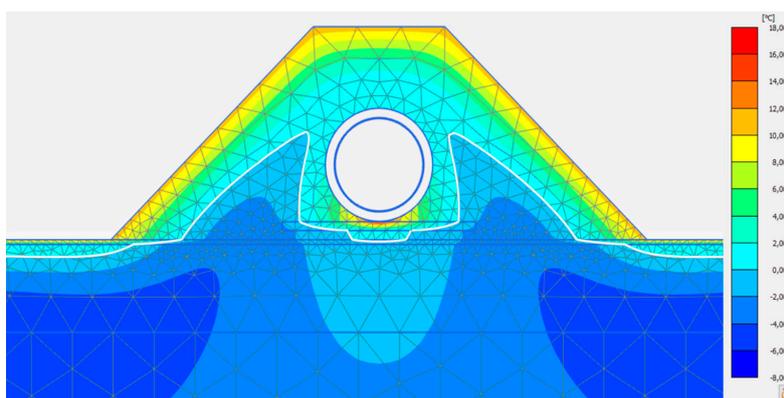


Рис. 3. Температурные поля наземного нефтепровода с подстилающим теплоизолирующим слоем шириной 2200 мм и толщиной 100 мм, в условиях мерзлого песка  
Источник: составлено авторами

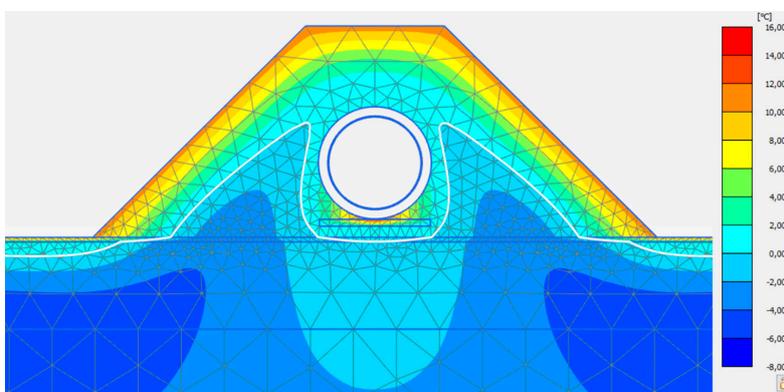


Рис. 4. Температурные поля наземного нефтепровода в условиях мерзлого песка с подстилающим теплоизолирующим слоем шириной 1200 мм и толщиной 80 мм  
Источник: составлено авторами

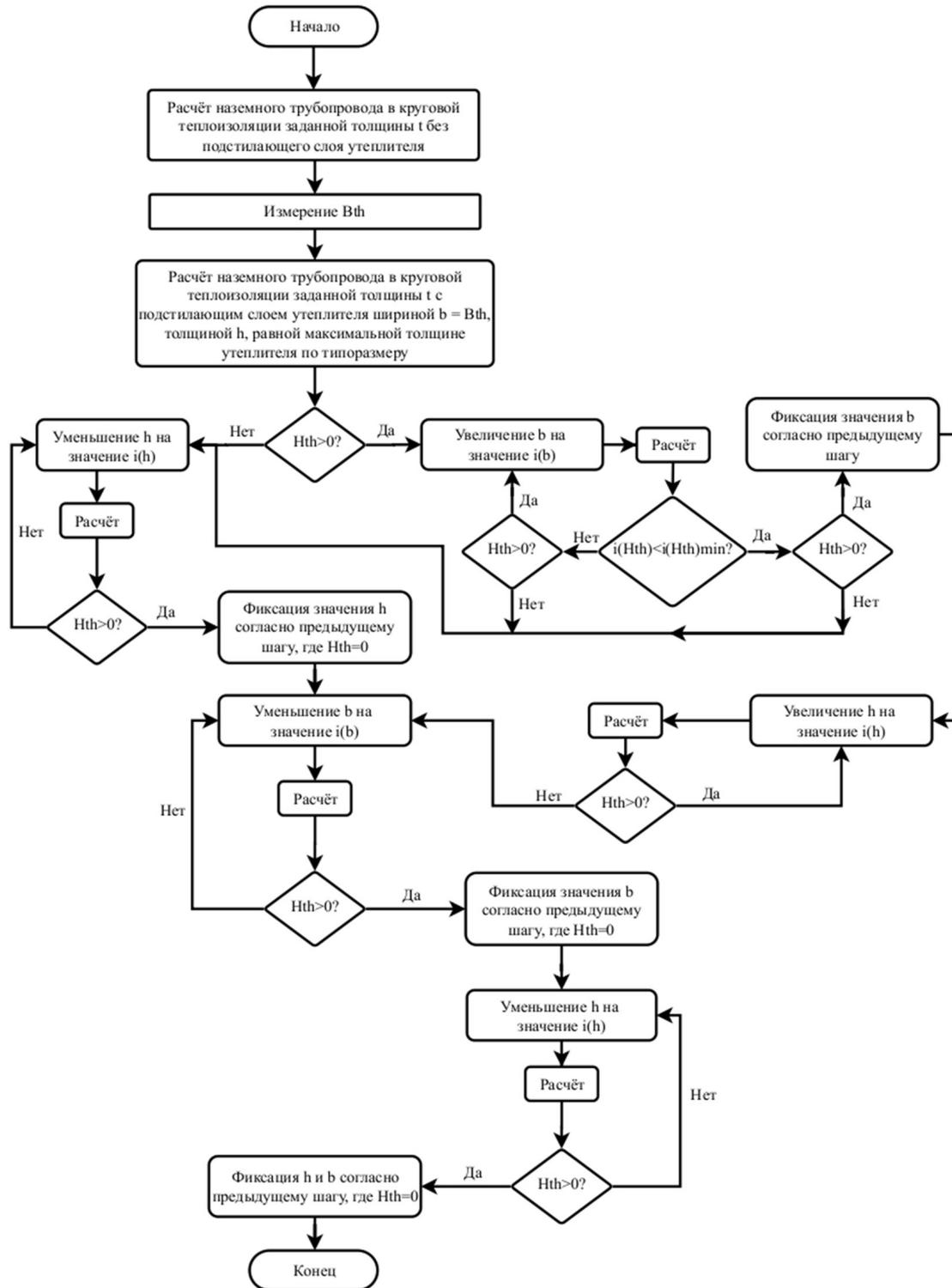


Рис. 5. Алгоритм подбора оптимальных параметров подстилающего нефтепровод теплоизоляционного слоя. Условные обозначения:  $t$  – толщина круговой теплоизоляции;  $V_{th}$  – ширина ореола оттаивания непосредственно под трубопроводом;  $N_{th}$  – глубина оттаивания мерзлого грунта;  $b$  – ширина подстилающего слоя теплоизолирующего слоя;  $h$  – толщина подстилающего слоя теплоизолирующего слоя;  $i(b)$  – величина изменения  $b$ , принимаемая на усмотрение лица, осуществляющего расчет;  $i(h)$  – величина изменения  $h$ , принимаемая согласно имеющимся типоразмерам плит теплоизолирующего слоя;  $i(H_{th})$  – изменение глубины оттаивания мерзлого грунта по сравнению с предыдущим шагом;  $i(H_{th})_{min}$  – минимальное изменение глубины оттаивания мерзлого грунта по сравнению с предыдущим шагом, принимаемое на усмотрение лица, осуществляющего расчет  
Источник: составлено авторами

Исследование (на примере мерзлого песка) проводилось в следующей последовательности:

1. Определялась зона оттаивания при отсутствии подстилающего нефтепровод теплоизолирующего слоя. Пример температурных полей, полученных авторами в результате исследования наземного нефтепровода, представлен на рис. 2 (белой линией обозначена граница зоны оттаивания при нулевой температуре).

2. Определялась ширина ореола оттаивания непосредственно под телом трубы (2,164 м).

3. Полученное значение ширины зоны оттаивания округлялось в большую сторону до 2,2 м и принималось в качестве начальной ширины теплоизолирующего подстилающего слоя.

4. Начальная толщина теплоизолирующего слоя была принята равной половине расстояния между нижней границей трубопровода и поверхностью мохового слоя: 100 мм (в дальнейшем толщина уменьшалась с шагом 20 мм).

5. Для дальнейших итераций определялись температурные поля наземного нефтепровода при наличии подстилающего теплоизоляционного слоя.

Как показали полученные результаты исследования, отраженные на рис. 3, граница зоны оттаивания при начальных размерах параметров теплоизолирующего слоя (толщины и ширины) не достигала поверхности мерзлого грунта, следовательно, была возможность дальнейшего уменьшения параметров теплоизолирующего слоя. В ходе исследования авторами применялся метод уменьшения параметров теплоизолирующего слоя (толщина уменьшалась с шагом 20 мм, ширина – с шагом 0,1 м).

6. Определялась толщина теплоизолирующего слоя, при котором появлялось протаивание мерзлого грунта (в случае мерзлого песка это значение составило 60 мм).

7. По полученным авторами в ходе исследования температурным полям нефтепровода устанавливалось оптимальное (предыдущее) значение толщины теплоизолирующего слоя (в случае мерзлого песка – 80 мм).

После определения оптимального значения толщины теплоизолирующего слоя, тем же способом определялось оптимальное значение его ширины, которое составило 1,2 м (температурные поля данной итерации представлены на рис. 4). При дальнейшем уменьшении ширины теплоизо-

лирующего слоя наблюдалось протаивание мерзлого грунта.

### Результаты исследования и их обсуждение

На основе описанной выше последовательности действий авторами впервые разработан алгоритм подбора оптимальных геометрических параметров подстилающего нефтепровода теплоизолирующего слоя. Алгоритм представлен на рис. 5.

Из алгоритма видно, что процесс оптимизации параметров подстилающего нефтепровода теплоизоляционного слоя носит итерационный и циклический характер с заданной степенью дискретизации основных параметров: ширина подстилающего слоя теплоизолирующего слоя; изменение глубины оттаивания мерзлого грунта по сравнению с предыдущим шагом итерации; минимальное изменение глубины оттаивания мерзлого грунта по сравнению с предыдущим шагом. Величину шага дискретизации принимает исследователь, осуществляющий оптимизационный расчет.

Ранее, в исследованиях других авторов, рассматривались различные подходы по оптимизации параметров и характеристик трубопроводов в условиях вечной мерзлоты (выбор способа укладки трубопровода [2], исследование перемещений [4], определение неравномерности и неоднородности промерзания [6, 7]). Однако, по мнению авторов, данный предложенный алгоритм позволит более точно определить минимальный слой теплоизоляции при минимальных затратах по материалу с заданным исследователем шагом дискретизации.

Полученный алгоритм был применен авторами для определения оптимальных параметров подстилающего нефтепровода теплоизолирующего слоя, уложенного в других грунтах. Так, в условиях мерзлой супеси его параметры составили следующие значения: ширина 2200 мм, толщина 120 мм; в условиях мерзлого суглинка – ширина 2400 мм, толщина 160 мм; в условиях мерзлой глины – ширина 2300 мм, толщина 20 мм.

### Заключение

Проведено актуальное расчетное исследование. Предложен инновационный алгоритм подбора параметров теплоизоляционного слоя при прокладке трубопроводов наземным способом в условиях многолетнемерзлых грунтов. Приведено детальное обоснование предлагаемого алгоритма

и проведено компьютерное моделирование в программном комплексе PLAXIS 2D.

Разработанный алгоритм, по мнению авторов, предполагает практическую значимость его применения. Автоматизация процесса оптимизации параметров теплоизолирующего слоя позволит перевести в цифровой формат минимизацию затрат на укладку теплоизоляции, подстилающей нефтепровод наземного исполнения в многолетнемерзлых грунтах, и существенно сократить сроки его проектирования и строительства. По мнению авторов, алгоритм является универсальным и при проектировании трубопровода в условиях вечной мерзлоты, может быть реализован в любом программном обеспечении (общем или специальном) с любой степенью дискретизации шага расчета.

#### Список литературы

1. Тарасенко А.А., Грученкова А.А., Чепур П.В., Юревич А.В. Оценка эффективности работы анкерных противопучинных свай в условиях многолетнемерзлых грунтов // Успехи современного естествознания. 2016. № 11–2. С. 411–416. URL: <https://natural-sciences.ru/ru/article/view?id=36247> (дата обращения: 03.02.2025).
2. Семенова Д.П. Прокладка трубопроводов в условиях вечной мерзлоты // Актуальные исследования. 2020. № 6 (9). С. 16–20. URL: <https://apni.ru/article/544-prokladka-truboprovodov-v-usloviyakh-vech-merz3> (дата обращения: 03.02.2025).
3. Муталова Л.М., Мустафин Ф.М. Совершенствование способа прокладки нефтепроводов в районах распространения мерзлых грунтов // Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. 2021. № 4. С. 56–59. DOI: 10.24412/0131-4270-2021-4-56-59.
4. Султанмагомедов Т.С., Бахтизин Р.Н., Султанмагомедов С.М., Урманова А.Р. Моделирование продольных перемещений трубопровода в многолетнемерзлых грунтах // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2021. Т. 332, № 4. С. 87–96. DOI: 10.18799/2413-1830-2021-4-87-96.
5. Розенберг В.В., Гунар А.Ю. Проблемы прокладки трубопроводов в области распространения сплошной мерзлоты // Успехи современного естествознания. 2024. № 9. С. 51–56. URL: <https://natural-sciences.ru/ru/article/view?id=38310> (дата обращения: 03.02.2025).
6. Суриков В.И., Ибрагимов Э.Р., Гунар А.Ю. Методика выбора трассы и технических решений при прокладке магистральных трубопроводов в районах распространения многолетнемерзлых грунтов // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. 2018. № 3 (8). С. 254–263. DOI: 10.28999/2541-9595-2018-8-3-254-263.
7. Шамилов Х.Ш., Каримов Р.М., Гумеров А.К., Валиев А.Р., Ташбулатов Р.Р. Оптимизация проектных решений при прокладке магистральных трубопроводов в условиях островной и прерывистой мерзлоты // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. 2021. № 2 (11). С. 136–144. DOI: 10.28999/2541-9595-2021-11-2-136-144.