

## АНАЛИЗ ТИПОВЫХ МЕТОДИК РАСЧЕТА ГЛУБИНЫ ПРОТАИВАНИЯ ВЕЧНОМЕРЗЛЫХ ГРУНТОВ ПОД ТРУБОПРОВОДАМИ

<sup>1</sup>Марков Е.В., <sup>1</sup>Пульников С.А., <sup>1</sup>Сысоев Ю.С.

<sup>1</sup>ФГБОУ ВПО «Тюменский государственный нефтегазовый университет», Тюмень, Россия (625000, г. Тюмень, ул. Володарского, 38), e-mail: markov.ev@mail.ru, spulnikov@mail.ru

Выполнен анализ типовых методик расчета глубин протаивания под трубопроводами. Сопоставление границ применимости анализируемых методик показало, что только методика, основанная на прямом решении дифференциального уравнения теплопроводности численными методами, обладает наибольшей универсальностью и практически не имеет ограничений в применении. Проведен тестовый расчет глубин протаивания многолетнемерзлого грунта под трубопроводом. Показана значительная разница в результатах расчетов по различным методикам. На основании результатов расчетов было обосновано, что каждый из климатических факторов вносит значимый вклад в расчетную схему. Сделан вывод о необходимости учета всей совокупности климатических факторов при расчетах глубин протаивания под трубопроводами и связанной с этим необходимости решения дифференциального уравнения теплопроводности исключительно методами конечных элементов или конечных разностей.

Ключевые слова: трубопровод, многолетнемерзлый грунт, ореол оттаивания, метод источников и стоков, метод конечных элементов, метод конечных разностей, солнечная радиация, теплообмен излучением, снежный покров, излучение в инфракрасной области спектра.

## ANALYSIS OF TYPICAL METHODOLOGIES FOR CALCULATING DEPTH OF THAWING PERMAFROST UNDER THE PIPELINE

<sup>1</sup>Markov E.V., <sup>1</sup>Pulnikov S.A., <sup>1</sup>Sysoev Y.S.

<sup>1</sup>Tyumen State Oil and Gas University, Tyumen, Russia (625000, Tyumen, Volodarskogo st., 38), e-mail: markov.ev@mail.ru, spulnikov@mail.ru

In this scientific article analyzed scientific literature and technical standards of the Russian Federation for typical calculation methods the depth of thawing under pipelines. The authors have wondered to find the most universal method for calculating the depth of thawing, taking into account the structural features of facilities and the impact of major climatic factors. A comparison of the limits of applicability of the analyzed methods showed that only technique based on direct solution of differential equation of thermal conductivity by numerical methods, has the greatest versatility and has virtually no restrictions in use. The test calculations are depth of thawing permafrost under the pipeline. Detected a significant difference in the results of calculations using different methods. Based on the results of calculations has been proved that each of climatic factors makes a significant contribution to the calculation scheme. The authors concluded that the need to consider the totality of climatic factors in the calculation of the depth of thawing under pipelines and related need for solving the differential equation of heat conduction only method of finite elements or finite differences.

Keywords: pipeline, permafrost, aureole thawing, method of sources and sinks, finite elements method, finite difference method, solar radiation, heat transfer by radiation, snow cover, radiation in the infrared region of the spectrum.

Строительство и эксплуатация магистральных трубопроводов в условиях Крайнего Севера осложняются криогенной структурой их оснований, обуславливающей необходимость учета тепловых процессов в геотехнической системе. Вечномерзлые грунтовые основания при оттаивании теряют свою структурную устойчивость под техногенными силовыми и тепловыми нагрузками, что приводит к значительной местной просадке, появлению прогибов и потере общей устойчивости трубопроводов [4, 8-10].

Одним из принципов использования вечномерзлых грунтов в качестве среды функционирования трубопровода является допущение их возможного незначительного протаивания, не приводящего к возникновению недопустимых напряжений и деформаций в

стенке трубы. Достоверный прогноз максимальной глубины протаивания за весь период эксплуатации трубопровода требует учета в расчетных методиках значимых факторов, влияющих на протекающие процессы в системе. Анализ существующих методик, оценка их преимуществ и недостатков необходима для выбора наилучшей методики применительно к исследуемому способу прокладки трубопровода.

**Цель работы:** обосновать выбор наиболее универсальной и достоверной методики расчета глубины протаивания мерзлого грунта под трубопроводом, позволяющей учитывать конструктивные особенности сооружения и воздействие основных факторов климатического происхождения.

**Задачи:**

1) провести анализ научной литературы, нормативно-технической документации Российской Федерации и обобщить сведения о типовых методиках расчета глубины протаивания вечномерзлых грунтов под трубопроводами;

2) оценить разницу в величинах глубины протаивания, рассчитанной по различным методикам для рассматриваемого способа прокладки;

3) выявить основные причины расхождения в результатах, сильные и слабые стороны анализируемых методик.

Задача о движении границы оттаивания грунта относится к весьма важному классу задач о фазовых переходах первого рода. Основной сложностью при их решении является необходимость учета скрытой теплоты при переходе из одной фазы в другую. Это приводит дифференциальное уравнение теплопроводности (1) к нелинейному виду, так как основные характеристики вещества (плотность, теплоемкость, теплопроводность) зависят от температуры:

$$\rho(T)c_p(T)\frac{\partial T}{\partial t} = K(T)\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}\right) + \frac{\partial K(T)}{\partial T}\left(\left(\frac{\partial T}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial z}\right)^2\right). \quad (1)$$

Одной из первых публикаций по данному вопросу была работа Йозефа Стефана [12]. В ней была решена одномерная задача об изменении толщины полярного льда. Для исследуемого способа прокладки подземного трубопровода задачу можно условно считать двухмерной, расчетная схема которой приведена на рисунке 1.

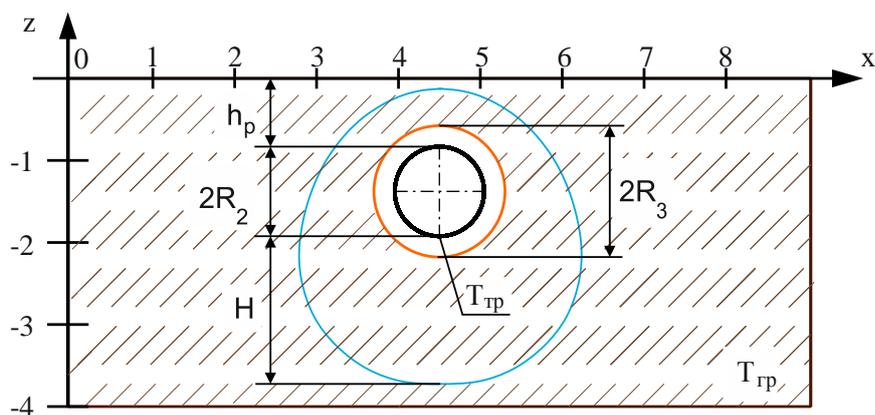


Рис. 1. Схема к определению глубины протаивания грунта под трубопроводом:

$H$  – глубина протаивания;  $R_2$  – наружный радиус трубопровода;

$R_3$  – наружный радиус теплоизоляции;  $h_p$  – глубина заложения трубопровода;

$T_{гр}$  – температура грунта;  $T_{гр}$  – температура перекачиваемого продукта

Точного решения для данной задачи до сих пор не найдено. Однако важное приближенное решение (далее по тексту – методика I) существует для осесимметричного случая и условно стационарного распределения температур. Соответственно, решение данной задачи справедливо только для случая, когда скрытая теплота плавления льда в грунте много больше его теплоемкости, а глубина заложения трубопровода такова, что можно пренебречь теплообменом с атмосферой [5]. Уравнение методики I является трансцендентным относительно  $H$  и решается численно.

Для описания стационарной зоны оттаявшего грунта под нижней образующей трубопровода может использоваться формула Форхгеймера—Гребера [1, 5-7]. Данная формула (далее — методика II) получена путем точного решения уравнения теплопроводности методом источников и стоков. Функция источника имитирует подземный трубопровод на глубине  $h_p$ , а функция стока располагается симметрично относительно прямой  $z=0$ . Таким способом становится возможным удовлетворить постоянной температуре на поверхности грунта. Методика II применима в случае, если коэффициент конвективной теплоотдачи на поверхности Земли принимает очень большие значения или глубина заложения такова, что можно пренебречь повышением температуры поверхности Земли непосредственно над трубопроводом. Формула Форхгеймера—Гребера имеет большое прикладное значение, поскольку позволяет рассчитывать изменение температуры продукта по длине трубопровода, а, следовательно, и изменение величины ореола оттаивания по длине трубопровода [1, 11].

Дальнейшим развитием метода источников и стоков явилась формула, позволяющая рассчитывать ореол оттаивания под многониточными коридорами трубопроводов [3]. Основным ее недостатком является отсутствие возможности удовлетворить граничным

условиям на всей поверхности трубопровода. Поэтому в дальнейшем Даниэляном Ю.С. была получена зависимость, которая позволяет задавать температуру поверхности трубопровода в нескольких точках [2]. Устремляя количество точек к бесконечности, можно полностью удовлетворить граничным условиям на поверхности трубопровода.

В работе Быкова Л.И. и Мустафина Ф.М. приводится выражение (далее — методика III), позволяющее рассчитать глубину протаивания под нижней образующей трубопровода в динамике при использовании кольцевого теплоизоляционного экрана с различными углами охвата наружной поверхности трубопровода [1]. Уравнение методики III является трансцендентным относительно  $H$  и решается численно.

В РД 39-0147323-604-86 «Инструкция по теплотехническим расчетам при проектировании нефтяных промыслов» для выполнения теплотехнических расчетов при проектировании нефтяных промыслов приводится выражение (далее – методика IV), позволяющее оценить динамику глубины протаивания грунта под подземными трубопроводами без теплоизоляции.

Среди способов решения задачи о расчете глубины протаивания особое место занимает стремительно развивающаяся методика прямого решения нелинейного дифференциального уравнения теплопроводности (1) при граничных условиях (2) методами конечных элементов или конечных разностей (далее по тексту – методика V):

$$\begin{cases} K_{\text{тр}} \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{(r=R_1)} = \alpha(T_{\text{пр}} - T); \\ K(T) \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{(z=0)} = Q + \beta(T_{\text{возд}} - T) + \varepsilon \sigma_0 (T_{\text{возд}}^4 - T^4). \end{cases} \quad (2)$$

Основным преимуществом методики V является возможность учитывать при расчетах влияние таких факторов климатического происхождения, как: солнечная радиация, температура воздуха, скорость ветра, толщина снежного покрова, излучение атмосферы и подстилающей поверхности грунта в инфракрасной области спектра.

Основные отличия методик I – V, их преимущества и недостатки сведены в таблице 1.

Из таблицы 1 становится видно, что методика V имеет лишь один недостаток — потребность в больших вычислительных ресурсах. В настоящее время эта проблема уже не стоит так остро в связи со значительным прогрессом в области увеличения производительности электронно-вычислительных машин. В то же время эта методика обладает достаточной универсальностью для проведения сложных расчетов теплового взаимодействия горячих трубопроводов с многолетнемерзлыми грунтами и прилегающими сооружениями.

Таблица 1

## Основные параметры сравнения методик I-V

Методика / Параметр сравнения	Методика I	Методика II	Методика III	Методика IV	Методика V
Граница ореола оттаивания	Нестационарная, известна только под нижней образующей трубопровода	Стационарная, известна только под нижней образующей трубопровода	Нестационарная, известна только под нижней образующей трубопровода	Нестационарная, известна только под нижней образующей трубопровода	Нестационарная, известна в любом направлении от трубопровода
Возможность учета толщины теплоизоляционного покрытия	да	да	да	нет	да
Учет теплообмена с атмосферой	нет	да	нет	да	Учитывает конвективный и радиационный теплообмен
Учет влияния толщины снежного покрова	нет	да	нет	нет	да
Учет сезонного колебания температур	нет	нет	нет	нет	да
Учет естественного температурного поля грунта	нет	нет	нет	нет	да
Преимущества	Относительная простота при использовании в оценочных инженерных расчетах				Возможность расчета сложных конструкций и учета большого числа климатических факторов
Недостатки	Невозможно провести расчет для сложных конструкций и учесть влияние факторов климатического происхождения				Потребность в мощных вычислительных ресурсах

**Обсуждение результатов тестовых расчетов.** Поскольку приведенные выше методики имеют близкие границы применимости, было проведено 3 тестовых расчета глубины протаивания грунта под трубопроводом с различной толщиной и конструкцией теплоизоляционного покрытия и следующими основными характеристиками:  $R_2 = 510$  мм,  $R_1 = 498$  мм,  $h_D = 1,1$  м,  $T_{пр} = 15$  °С. Результаты расчетов приведены на рисунках 2–4.

Методика III, вероятно, содержит ошибку, о чем свидетельствует зависимость на рисунке 4: при  $\alpha=0$  град. глубина протаивания должна в точности совпадать с глубиной протаивания для нетеплоизолированного трубопровода. Однако вместо этого мы получаем стационарную глубину протаивания, которая к тому же значительно меньше, чем у теплоизолированного трубопровода.

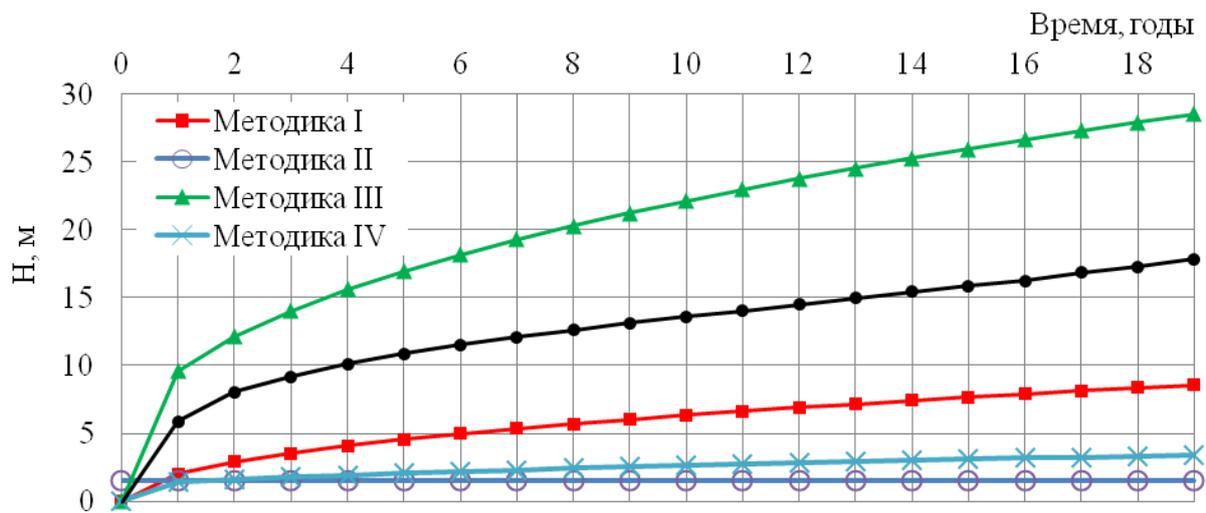


Рис. 2. Расчетная глубина протаивания под нетеплоизолированным трубопроводом

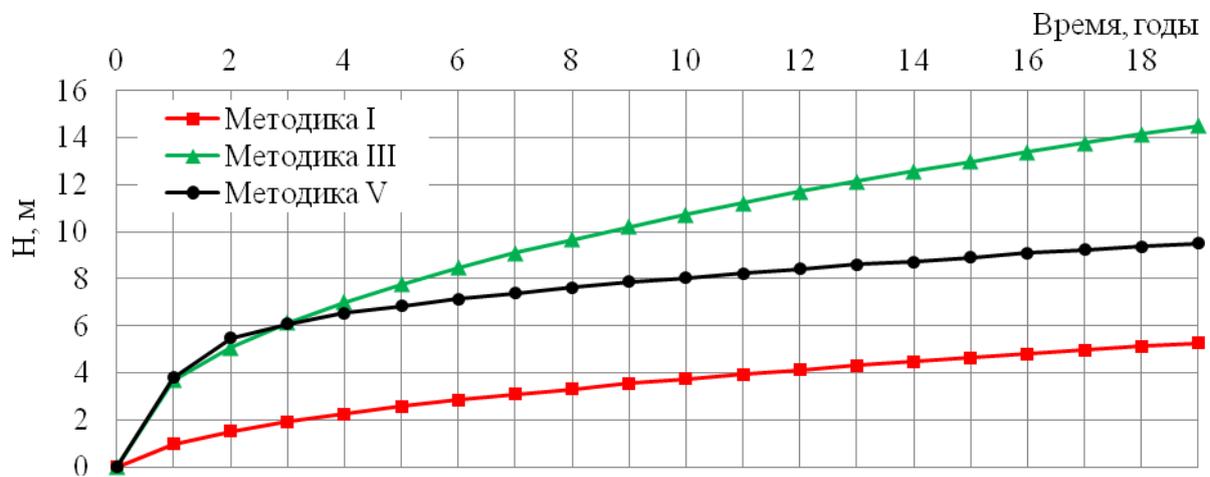


Рис. 3. Расчетная глубина протаивания под трубопроводом с кольцевой теплоизоляцией из вспененного полистирола толщиной 50 мм

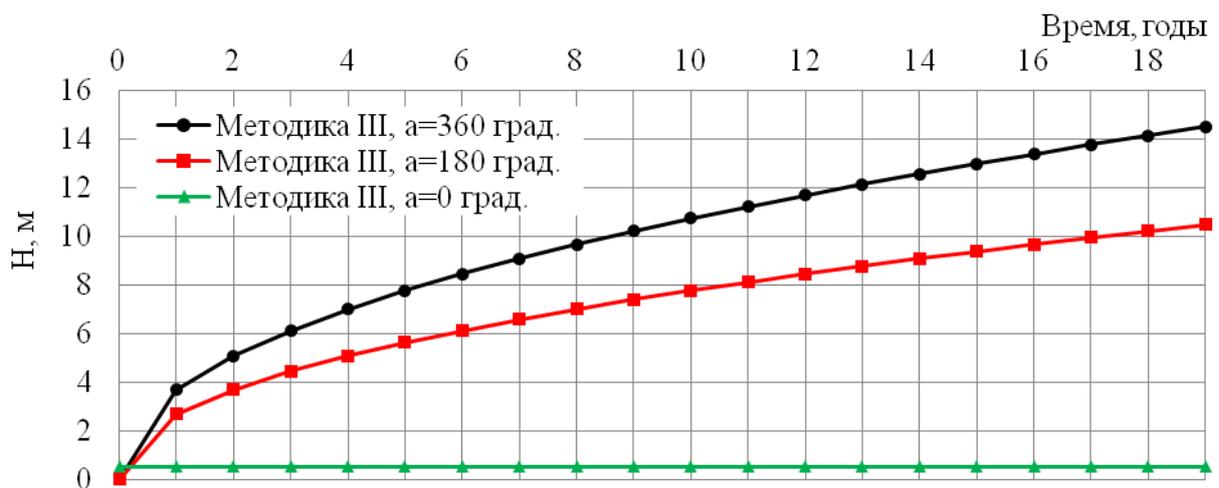


Рис. 4. Расчетная глубина протаивания под трубопроводом с теплоизоляционным экраном из вспененного полистирола толщиной 50 мм и различными углами охвата:  $a$  – угол охвата трубопровода теплоизоляцией [1]

Из рисунков 2 и 3 видно, что глубины протаивания, рассчитанные по различным методикам, различаются в несколько раз. В первую очередь это связано с различным подходом к решению уравнения (1). Немаловажную роль играет и тот факт, что каждая из методик учитывает лишь какой-то отдельно взятый климатический фактор, и лишь методика V учитывает всю их совокупность. Каждый из внешних факторов вносит в расчетную схему вклад, которым нельзя пренебрегать. Для обеспечения наибольшей точности глубину протаивания следует определять путем решения уравнения (1) методами конечных элементов или конечных разностей. Остальные методики можно использовать лишь для оценочных расчетов.

### **Выводы**

Выполнен анализ типовых методик расчета глубин протаивания мерзлого грунта под трубопроводом. Сопоставление границ применимости анализируемых методик показало, что только методика, основанная на прямом решении дифференциального уравнения теплопроводности численными методами, обладает наибольшей универсальностью и практически не имеет ограничений в применении. Проведен тестовый расчет глубин протаивания многолетнемерзлого грунта под трубопроводом. Показана значительная разница в результатах расчетов по анализируемым методикам. На основании результатов тестовых расчетов было обосновано, что каждый из климатических факторов вносит значимый вклад в расчетную схему. Сделан вывод о необходимости учета всей совокупности климатических факторов при расчетах глубин протаивания под трубопроводами и связанной с этим необходимости решения дифференциального уравнения теплопроводности исключительно методами конечных элементов или конечных разностей.

### **Список литературы**

1. Быков Л.И., Мустафин Ф.М., Рафиков С.К., Нечваль А.М. Типовые расчеты при сооружении и ремонте газонефтепроводов: Учеб. пособие. СПб.: Недра, 2006. — 824 с.
2. Даниэлян Ю.С., Примаков С.С. К расчету теплотерь от группы параллельных подземных трубопроводов // Материалы международной конференции «Город и геологические опасности». Т. 2. СПб., 2006. С. 29–33.
3. Даниэлян Ю.С., Яницкий П.А. Температурный режим нефтегазопроводов при их совместной прокладке в мерзлых грунтах // Энергетика и транспорт. 1987. № 1. С. 95–100.
4. Иванов И.А. и др. Геотехнические проблемы трубопроводного транспорта: Учебное пособие / И.А. Иванов, С.Я. Кушнир, С.А. Пульников. Тюмень: ТюмГНГУ, 2011. 208 с.
5. Карслоу Г., Егер Д. Теплопроводность твердых тел. Наука, 1964.

6. Конев В.В., Закирзаков Г.Г., Райшев Д.В., Мерданов М.Ш., Саудаханов Р.И. Математическое моделирование теплового состояния строительного-дорожного машин // Современные проблемы науки и образования. 2014. № 6. С. 320.
7. Кутателадзе С.С. Основы теории массообмена. М.: Атомиздат, 1979, 416 с.
8. Кушнир С.Я., Карнаухов М.Ю., Пульников С.А., Сысоев Ю.С. Анализ пространственных перемещений магистральных газопроводов с определением граничных зон // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. 2011. № 5. С. 72–75.
9. Кушнир С.Я., Пульников С.А., Сысоев Ю.С. Пространственная устойчивость подземного магистрального газопровода на обводненных участках трассы // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. 2012. № 1. С. 72–76.
10. Кушнир С.Я., Пульников С.А., Сысоев Ю.С., Карнаухов М.Ю. Аналитическая задача определения удлинения газопровода в области аркообразования // Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. 2011. № 4. С. 74–80.
11. Тугунов П.И., Новосёлов В.Ф., Коршак А.А., Шаммазов А.М. Типовые расчеты при проектировании и эксплуатации нефтебаз и нефтепроводов. Учебное пособие для вузов. – Уфа: ООО «ДизайнПолиграфСервис», 2002. – 658 с.
12. Stefan, Ann. Phys. u. Chem. (Wiedemann) (N.F.) 42, 269-286 (1891).

**Рецензенты:**

Мерданов Ш.М., д.т.н., заведующий кафедрой «ТТС», ФГБОУ ВПО «Тюменский государственный нефтегазовый университет», г. Тюмень;  
Тарасенко А.А., д.т.н., профессор кафедры «ТУР», ФГБОУ ВПО «Тюменский государственный нефтегазовый университет», г. Тюмень.