

УДК 621.644.07

ПРОБЛЕМЫ ЗАДАНИЯ ГРАНИЧНЫХ УСЛОВИЙ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ТЕПЛОВОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ «ГОРЯЧИХ» ТРУБОПРОВОДОВ С МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫМИ ГРУНТАМИ

¹Марков Е.В., ¹Пульников С.А., ²Гербер А.Д.¹ФГБОУ ВПО «Тюменский государственный нефтегазовый университет»,
Тюмень, e-mail: markov.ev@mail.ru, spulnikov@mail.ru;²ООО НИЦ «Геотехэкспертиза», Тюмень, e-mail: gerber_a@mail.ru

Проведен анализ существующей методики оценки теплового взаимодействия «горячих» трубопроводов с многолетнемерзлыми грунтами с помощью численных методов. Установлена возможность управления температурой на глубине нулевых годовых амплитуд при калибровке моделей грунта путем изменения коэффициента конвективной теплоотдачи от дневной поверхности грунта и теплопроводности снежного покрова. Обоснована необходимость учета в теплотехнических расчетах теплообмена грунта с атмосферой посредством инфракрасного излучения и предложен способ совершенствования прогнозных расчетов. Тестовый расчет тепловых полей в многолетнемерзлом грунте в естественном состоянии по предложенной методике показал удовлетворительную сходимость результатов с данными непосредственных термометрических измерений. По существующей и усовершенствованной методикам выполнено сравнение глубин протаивания под трубопроводом в динамике, показавшее значимую разницу конечных результатов. Калибровка модели грунта путем изменения коэффициента теплопроводности снега приводит к значительному снижению расчетной величины ореола растепления под трубопроводами.

Ключевые слова: трубопровод, многолетнемерзлый грунт, надежность трубопровода, ореол растепления, теплопроводность, тепловой поток, теплообмен излучением, коэффициент конвективной теплоотдачи, эквивалентное термическое сопротивление снежного покрова

PROBLEMS OF DEFINING BOUNDARY CONDITION FOR MODELING THE THERMAL INTERACTION OF «HOT» PIPELINES WITH PERMAFROST SOIL

¹Markov E.V., ¹Pulnikov S.A., ²Gerber A.D.¹Tyumen State Oil and Gas University, Tyumen, e-mail: markov.ev@mail.ru, spulnikov@mail.ru;¹SRC Geotechexpertiza ltd., Tyumen, e-mail: gerber_a@mail.ru

With the help of numerical methods carried out analysis of the existing methodology for assessing the thermal interaction between «hot» pipelines with permafrost. When calibrating models of the soil, founded the possibility of temperature control at a depth of zero annual amplitude by changing the coefficient of convective heat transfer from the surface of the soil and the thermal conductivity of snow. Substantiated the necessity of taking into account infrared radiation in the calculation of thermal exchange the soil to the atmosphere. Provided a method of to improve the existing method. Test calculations of thermal fields in the permafrost in the natural state of the proposed method showed satisfactory convergence of the results with the data of direct thermometric measurements. For the existing and improved methods realized comparison thawing depth below the pipeline in the dynamic process, showed a significant difference outcomes. Calibrating the soil model by changing the thermal conductivity of snow leads to a significant reduction in the calculated value of the aureole thawing under pipelines.

Keywords: pipeline, permafrost, reliable pipeline, aureole thawing, thermal conductivity, heat flow, heat transfer by radiation, coefficient of convective heat transfer, thermal resistance snow

Надежность трубопроводов, прокладываемых в многолетнемерзлых грунтах (ММГ), во многом зависит от динамики процесса формирования ореола растепления, обуславливающего дальнейшую просадку и недопустимый прогиб локальных участков [1–7].

Способом уменьшения величины ореола растепления вокруг «горячего» трубопровода служит устройство теплоизоляционного покрытия. Выбор параметров теплоизоляции зависит от результатов теплотехнического расчета, повышение достоверности которого является актуальной проблемой проектирования трубопроводов в условиях криолитозоны.

Цель исследования – совершенствование методики расчета ореола растепления вокруг «горячего» трубопровода, проложенного в ММГ.

Задачи:

– выполнить анализ методики составления прогноза теплового режима грунтов, регламентируемой нормативно-технической документацией (НТД) РФ [10];

– оценить величину теплового потока, переносимого посредством излучения в инфракрасной (ИК) области спектра;

– разработать методику расчета теплового режима ММГ, учитывающую теплообмен поверхности грунта с атмосферой, посредством ИК излучения;

– сопоставить результаты моделирования с данными натурных термометрических наблюдений ММГ в естественном состоянии;

– оценить изменения расчетных глубин протаивания ММГ под трубопроводом в динамике по существующей и предложенной методикам.

При инженерно-геологическом обосновании строительства и реконструкции магистральных трубопроводов для составления прогноза теплового режима грунтов применяется инженерная методика нормативного документа [10] (далее по тексту – методика I). Она содержит основные алгоритмы решения дифференциального уравнения теплопроводности методом конечных разностей при граничных условиях третьего рода.

Методика I реализована в различных программных продуктах (TermoStab Universal, Frost 3D Universal) и находит применение в инженерных расчетах благодаря своей гибкости и универсальности. Моделирование по методике I проводится в три этапа:

Этап I – ввод исходных данных. Создание геометрической модели грунта и зада-

ние граничных условий (рис. 1). Для задания граничных условий и свойств ММГ непосредственно из материалов инженерных изысканий в модель вводятся следующие данные: теплофизические характеристики грунтов (теплоемкость, теплопроводность, плотность); среднемесячная температура атмосферного воздуха; величина суммарной солнечной радиации и альбедо деятельной поверхности при средних условиях облачности; среднедекадная толщина и плотность снежного покрова.

Такие величины, как коэффициент конвективной теплоотдачи и теплопроводность снежного покрова, не входят в материалы инженерных изысканий и выбираются по справочным таблицам различных авторов [9].

Этап II – калибровка модели грунта. Конечной целью второго этапа является корректировка модели грунта таким образом, чтобы расчетная и измеренная температуры на глубине нулевых годовых амплитуд совпадали. Варьирование осуществляется изменением значений коэффициента конвективной теплоотдачи и теплопроводности снежного покрова.

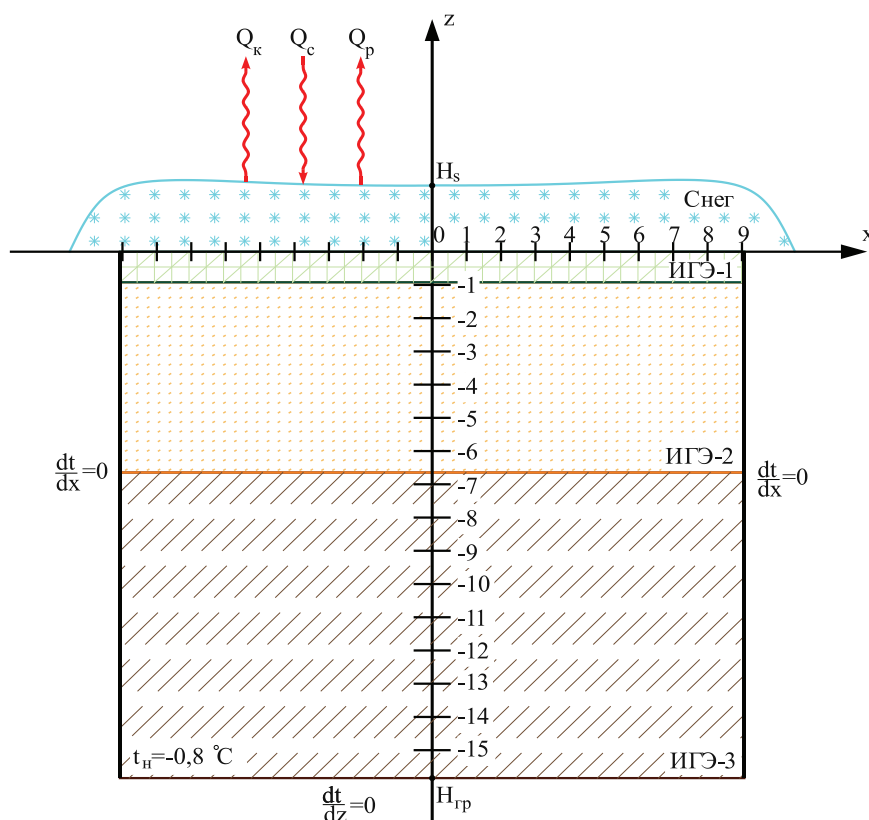


Рис. 1. Схема теплового режима ММГ и основные граничные условия:

Q_k – конвективный тепловой поток; Q_c – поток тепла от солнечной радиации;
 Q_p – радиационный поток тепла в ИК области спектра; H_c – высота снежного покрова;
 $H_{гр}$ – глубина моделируемого грунтового основания, соответствующая границе нулевой годовой амплитуде температуры; t_n – начальная температура грунта на глубине нулевых годовых амплитуд; ИГЭ-1, 2, 3 – инженерно-геологические элементы

Этап III – расчет ореола растепления. В откалиброванную модель грунта вводятся проектируемый трубопровод с заданным диаметром, толщиной стенки, параметры теплоизоляционного покрытия и температура перекачиваемого продукта.

Для установления возможности управления расчетной температурой на глубине нулевых годовых амплитуд при помощи изменения параметров, приведенных во втором этапе, обратимся к формуле, задающей граничные условия третьего рода на поверхности калибруемой модели грунта [8]:

$$Q_i = -(T_{в,i} - T_{гр,i}) \left/ \left(\frac{1}{a_i} + \frac{\delta_i}{\lambda_i} \right) \right. - q_i \left/ \left(1 + \frac{\delta_i a_i}{\lambda_i} \right) \right. \quad (1)$$

где Q – тепловой поток от грунта в атмосферу; a – коэффициент конвективной теплоотдачи, зависящий от скорости ветра и шероховатости подстилающей поверхности грунта; λ – коэффициент теплопроводности снега, зависящий от его плотности и влажности; δ – толщина снежного покрова; $T_{в}$ и $T_{гр}$ – соответственно температура атмосферного воздуха и температура поверхности грунта; q – поток тепла от солнечной радиации, индекс i относится к i -му месяцу в году.

Очевидно, что изменение коэффициента конвективной теплоотдачи a или теплопроводности снега λ в большую сторону в процессе калибровки повышает тепловой поток от грунта в атмосферу Q в зимний период, что приводит к искусственному переохлаждению и снижению температуры на глубине нулевых годовых амплитуд. Искусственное завышение потока тепла Q от грунта в атмосферу в зимний период может приводить к значительному снижению расчетной величины ореола оттаивания под малозаглубленными трубопроводами.

Обоснование необходимости учета теплообмена посредством ИК излучения

Во избежание снижения точности расчетов авторы предлагают усовершенствовать методику I введением в граничные условия (1) поправки на теплообмен посредством ИК излучения по закону Стефана – Больцмана (методика II). В таком случае граничные условия на поверхности калибруемой модели грунта примут следующий вид:

$$Q_i = a_i (T_{пов,i} - T_{в,i}) - q_i + \varepsilon_i \sigma_0 (T_{пов,i}^4 - b_i T_{в,i}^4), \quad (2)$$

где $T_{пов,i}$ – температура поверхности грунта или снега; σ_0 – постоянная Стефана – Больцмана; b – коэффициент излучения атмосферы, зависящий от балла облачности, состава атмосферного воздуха, времени суток и изменяющийся в пределах от 0,69 до 0,89 [10]; ε – степень черноты подстилающей поверхности грунта, зависящая от типа поверхности, изменяющаяся в пределах от 0,89 до 0,99 [8].

Результаты оценки слагаемых, входящих в зависимость (2), для начальных условий: строительная площадка находится за полярным кругом; период года с минимальной продолжительностью светового дня; разница температуры поверхности снега и воздуха 2 К; температура воздуха 248 К; скорость ветра 3 м/с, приведены в табл. 1.

Таким образом, в граничных условиях методики I остается неучтенной от 24,4% до 52,4% тепловой энергии, передаваемой грунтом в атмосферу посредством ИК излучения.

Оценка значимости вклада ИК излучения в тепловой баланс грунтовых оснований криолитозоны и сравнение методик производились на базе 96 инженерно-геологических разведывательных скважин в ММГ с известными термометрическими данными (Пуровский район, ЯНАО, РФ). Основные отличия в процессе моделирования и его последовательность сведены в табл. 2.

Таблица 1
Оценочный расчет слагаемых конвективного и радиационного теплообмена

Последовательность расчета \ Основные виды теплообмена	Конвективный тепловой поток $a_i (T_{пов,i} - T_{в,i})$	Поток тепла от солнечной радиации q_i	Тепловой поток ИК излучения $\varepsilon_i \sigma_0 (T_{пов,i}^4 - T_{в,i}^4)$
Исходные данные	$a_i = 30 \text{ Вт/(К} \cdot \text{м}^2)$ $(T_{пов,i} - T_{в,i}) = 2 \text{ К}$	$q_i = 0 \text{ Вт/м}^2$ (полярная ночь)	$\varepsilon_i = 0,9$ (для снега) $\sigma_0 = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт/(м}^2 \text{ К}^4)$ $T_{в,i} = 248 \text{ К}$ $T_{пов,i} = 250 \text{ К}$ $i = 0,69 \dots 0,89$
Величина теплового потока, Вт/м ²	60	0	66,14...27,53
Вклад в суммарный тепловой поток, %	47,6...75,6	0	52,4...24,4

Таблица 2

Последовательность применения методик и их отличия

Наименование	Методика I	Методика II
Этап I. Ввод исходных данных		
Исходные данные	$a; \lambda; \delta; q$	$a; \lambda; \delta; q; \varepsilon; b$
Этап II. Калибровка		
Калибруемый параметр	$a; \lambda$	b
Основание для выбора параметра	Регламент отсутствует	
Условие окончания калибровки	Расчетная температура на глубине нулевых годовых амплитуд совпадает с результатами измерений в термометрических скважинах	
Этап III. Расчет ореола растепления		
Выполняемое действие	1. Ввод стального газопровода в расчетную схему: $D_{\text{н}} = 219 \text{ мм}; h_{\text{ст}} = 6 \text{ мм};$ глубина заложения – 0,8 м; теплоизоляция – вспененный полистирол, 50 мм; $t_{\text{газа}} = +17,5^{\circ}\text{C}.$ 2. Расчет ореола растепления в динамике	

Анализ результатов показал, что обе методики дают удовлетворительную сходимость с реальным распределением температур в грунте. Среднеквадратичные отклонения для методик I и II составляют соответственно 1,54 и 1,07 (рис. 2). Однако добиться таких результатов по методике I удастся лишь путем калибровки коэффициента теплопроводности снега на величины, выходящие за рамки рекомендуемых почти на 100% [9]. В то же время калибровка по методике II работает в пределах варьируемого параметра b от 0,7 до 0,85 в соответствии с рекомендациями [4].

Столь значительное изменение теплопроводности снега может привести к существенным отклонениям в результатах расчетов ореолов растепления во времени. На рис. 3 изображен график зависимости величины χ от времени:

$$\chi = \frac{h_2 - h_1}{h_1}, \quad (3)$$

где h_1 и h_2 – расчетные величины протавивания ММГ под нижней образующей трубопровода, рассчитанные по методикам I и II соответственно.

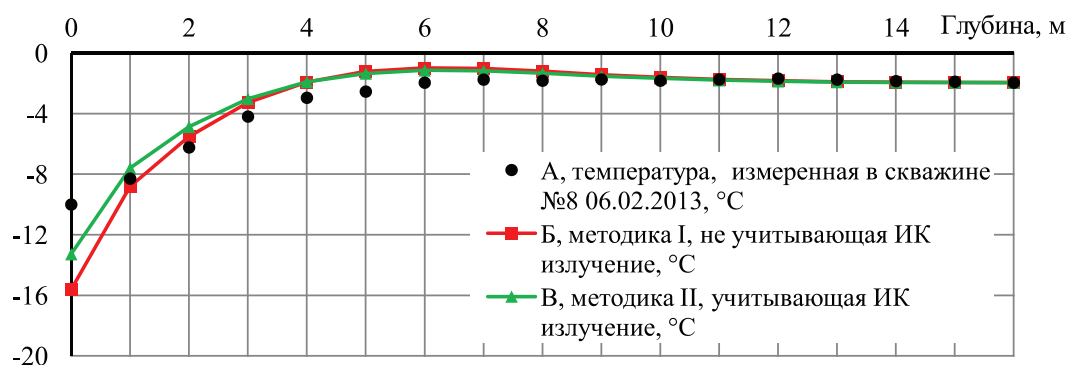


Рис. 2. Результаты аппроксимации натурных данных сравниваемыми методиками

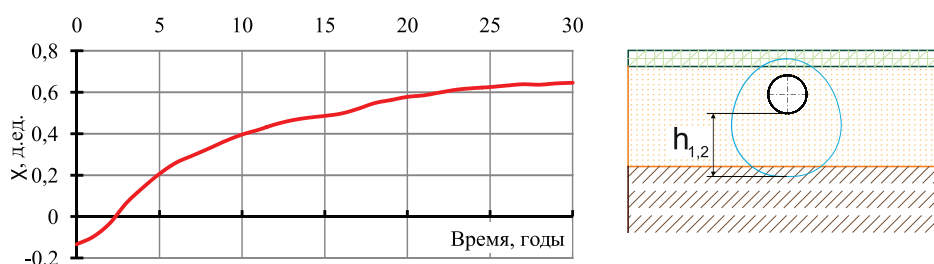


Рис. 3. Относительная разница ореолов растепления под трубопроводом в динамике

Значение σ показывает относительную разницу в величинах протаивания ММГ в динамике, рассчитанных по двум моделям. Неучтенный методикой I тепловой поток, переносимый ИК излучением по закону Стефана – Больцмана привел к недооценке протаявшей зоны на 64% за 30-летний период, а за 15-летний – на 50%. Такая значительная недооценка однозначно приведет к развитию непредсказуемой просадки трубопровода в период его эксплуатации.

Выводы

С помощью численных методов проведен анализ существующей методики оценки теплового взаимодействия «горячих» трубопроводов с ММГ, положенной в основу действующей НТД. Обоснована необходимость в теплотехнических расчетах производить учет теплообмена грунта с атмосферой посредством ИК излучения. Выполнен сравнительный расчет тепловых полей в ММГ с применением усовершенствованной методики, показавший наличие весомых преимуществ предложенного подхода. Выполнено сравнение глубин протаивания под трубопроводом в динамике, показавшее значимую разницу конечных результатов. Калибровка модели грунта путем изменения коэффициента теплопроводности снега, выходящая за рамки физического смысла, приводит к значительному снижению расчетной величины ореола растепления вокруг трубопровода.

Список литературы

1. Вагнер В.В. и др. Развитие аэрозольных выбросов подземных магистральных газопроводов при переменной обводненности грунтов / В.В. Вагнер, С.Я. Кушнир, С.А. Пульников. – СПб.: ООО «Недра», 2010. – 226 с.
2. 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.
3. Конеv В.В., Закирзаков Г.Г., Райшев Д.В., Мерданов Ш.М., Саудаханов Р.И. Математическое моделирование теплового состояния строительно-дорожных машин // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 6. – С. 320.
4. 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.
5. Луканин В.Н., Шатров М.Г. Теплотехника. – М.: Высшая школа, 2000. – 671 с.
6. Пульников С.А. Взаимодействие вибронгруженных магистральных газопроводов с окружающими грунтами: дис. ... канд. техн. наук. – Тюмень, 2007. – 173 с.
7. Пульников С.А., Сысоев Ю.С., Лазарев С.А. Влияние теплового режима подземного магистрального газопровода на его пространственные деформации в сложных геологических условиях // Нефть и газ Западной Сибири: материалы Международной научно-технической конференции, посвященной 50-летию Тюменского индустриального института / отв. ред. О.А. Новоселов. – Тюмень, 2013. – С. 52–56.
8. Семенов С.М. Методы оценки последствий изменения климата для физических и биологических систем. – М.: Росгидромет, 2012. – 511 с.
9. РД 39-30-139-79. Методика теплового и гидравлического расчета магистральных трубопроводов при стационарных и нестационарных режимах перекачки ньютоновских и неньютоновских нефтей в различных климатических условиях. – 1979. – 57 с.
10. РСН 67-87. Инженерные изыскания для строительства. Составление прогноза измерений температурного режима вечномерзлых грунтов численными методами. – 1987. – 40 с.

References

1. Vagner V.V., Kushnir S.Ya., Pulnikov S.A. Razvitiye arochnykh vybrosov podzemnykh magistral'nykh gazoprovodov pri peremennoy obvodnennosti gruntov. SPb.: Nedra, 2010. 226 p.
2. Ivanov I.A., Kushnir S.Ya., Pulnikov S.A. Geotekhnicheskie problemy truboprovodnogo transporta: uchebnoe posobie. Tyumen: TSOGU, 2011. 208 p.
3. Konev V.V., Zakirzakov G.G., Raishev D.V., Merdanov Sh.M., Saudakhanov R.I. Sovremennyye problemy nauki i obrazovaniya. 2014, no. 6, pp. 320.
4. Kushnir S.Ya., Pulnikov S.A., Sysoev Yu.S., Karnaukhov M.Yu. Problemy sbora, podgotovki i transporta nefi i nefteproduktov. 2011, no. 4, pp. 74–80.
5. Lukanin V.N., Shatrov M.G. Teplotekhnika. Moscow, Vysshaya shkola, 2000. 671 p.
6. Pulnikov S.A. Vzaimodeystvie vibronagruzhennykh magistral'nykh gazoprovodov s okruzhajushimi gruntami: dis. ... kand. tehn. nauk. Tyumen, 2007, 173 p.
7. Pulnikov S.A., Sysoev Yu.S., Lazarev S.A. Neft i gaz Sibiri. Tyumen, 2013, pp. 52–56.
8. Semenov S.M. Metody ocenki posledstviy izmenenija klimata dlja fizicheskikh i biologicheskikh sistem. Moscow, Rosgidromet, 2012, 511 p.
9. RD 39-30-139-79. Metodika teplovogo i gidravlichesko-go rascheta magistral'nykh truboprovodov pri stacionarnykh i nestacionarnykh rezhimakh perekachki nyutonovskikh i nenyutonovskikh neftej v razlichnykh klimaticheskix usloviyax. 1979. 57 p.
10. RSN 67-87. Inzhenernye izyskaniya dlya stroitelstva. Sostavlenie prognoza izmerenij temperaturnogo rezhima vech-nomerzlyx gruntov chislennymi metodami. 1987. 40 p.

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.

Работа поступила в редакцию 18.03.2015.