

УДК 621.644.07

РАСЧЕТ ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМА МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ГРУНТОВ С УЧЕТОМ РАДИАЦИОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ИНФРАКРАСНОЙ ОБЛАСТИ СПЕКТРА И ТЕРМИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ СНЕЖНОГО ПОКРОВА

¹Марков Е.В., ¹Пульников С.А., ²Гербер А.Д.

¹ФГБОУ ВО «Тюменский государственный нефтегазовый университет», Тюмень, e-mail: markov.ev@mail.ru, spulnikov@mail.ru;

²ООО НИЦ «Геотехэкспертиза», Тюмень, e-mail: gerber_a@mail.ru

Выявлено, что методика расчета температурного режима многолетнемерзлых грунтов методом численного решения дифференциального уравнения теплопроводности, закрепленная в нормативно-технической документации РФ, не учитывает радиационный теплообмен в инфракрасной области спектра. Анализ научно-технической литературы показал, что неучёт данного вида теплообмена приводит к существенному искажению результатов моделирования теплового взаимодействия подземных сооружений с многолетнемерзлыми грунтами. Выведено уравнение для задания граничных условий третьего рода на поверхности грунта, учитывающее теплообмен в инфракрасной области спектра и задающее снежный покров методом эквивалентного термического сопротивления, доказана единственность его решения. Показано, что теплообмен в инфракрасной области спектра вносит существенный вклад в температурный режим многолетнемерзлых грунтов и его учет необходим для обеспечения высокой степени достоверности результатов моделирования.

Ключевые слова: многолетнемерзлый грунт, граничные условия третьего рода, инженерные изыскания, подстилающая поверхность грунта, теплообмен в инфракрасной области спектра, снежный покров, эквивалентное термическое сопротивление, теорема Штурма

CALCULATION OF PERMAFROST TEMPERATURE CONDITION TAKING INTO ACCOUNT INFRA-RED RADIATION AND THERMAL RESISTANCE OF SNOW

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;

²SRC Geotechexpertiza ltd., Tyumen, e-mail: gerber_a@mail.ru

Analysis of methodic of normative-technical documentation for calculating temperature rate of permafrost by numeric solving of heat transfer differential equation has been revealed, that the methodic not take into account infra-red radiation. Analysis of scientific-technical literature has been indicated, that calculation with neglecting of infra-red radiation significantly distorts the results of modeling of underground buildings and permafrost thermal interaction. The new equation for determination of third-kind boundary condition on the ground surface, that take into account blanket of snow, by equivalent thermal resistance and infra-red radiation has been derived, existence and uniqueness of its solution has been proved. Importance of infra-red radiation influence to the temperature rate of permafrost has been proved.

Keywords: permafrost, boundary condition of third kind, engineering survey, ground surface, heat transfer in infrared spectrum, blanket of snow, equivalent thermal resistance, Sturm's theorem

Заполярные территории относятся к районам со сложными природно-климатическими и инженерно-геологическими условиями. Корректный расчет температурного режима грунтов криолитозоны необходим для обеспечения требуемого уровня надежности сооружений. Наибольшую опасность представляют термически неустойчивые просадочные многолетнемерзлые грунты (ММГ) с высокой влажностью [1–8; 11–13; 15].

В нормативно-технической документации РФ утверждена методика расчета температурного режима ММГ, которая учитывает влияние температурного режима воздуха, солнечной радиации, скорости ветра и снежного покрова, но не учитывает теплообмен подстилающей поверхности

грунта с атмосферой в инфракрасной области спектра [14]. Проведенные ранее исследования показывают, что инфракрасное излучение оказывает существенное влияние на результаты прогнозных теплотехнических расчетов [9, 10].

Цель работы – разработать методику задания граничных условий третьего рода, учитывающую теплообмен с атмосферой посредством инфракрасного излучения и термическое сопротивление снежного покрова и обосновать необходимость ее применения.

Задачи:

– проанализировать исходные данные, необходимые для выполнения расчета температурного режима ММГ;

– вывести формулу для задания граничных условий третьего рода на поверхности грунта;
 – обосновать необходимость введения поправки на теплообмен посредством инфракрасного излучения.

Моделирование температурного режима ММГ (рисунок) выполняется путем численного решения дифференциального уравнения теплопроводности методом конечных элементов или конечных разностей:

$$\rho(T)c_p(T)\frac{\partial T}{\partial t} - \nabla \cdot (K(T)\nabla T) = 0, \quad (1)$$

где $\rho(T)$ – плотность грунта; T – температура; $c_p(T)$ – теплоемкость грунта; t – время; $K(T)$ – теплопроводность грунта.

На нижней и боковых поверхностях моделируемого массива грунта выбирается граничное условие типа «нулевой тепловой поток». На поверхности грунта задается граничное условие:

$$Q = Q_k - Q_c + Q_p = a_i(T_{\text{пов}} - T_{\text{в},i}) - q_i + \varepsilon_i \sigma_0 (T_{\text{пов}}^4 - b_i T_{\text{в},i}^4), \quad (2)$$

где Q – тепловой поток от грунта в атмосферу; Q_k – конвективный тепловой поток; Q_c – поток тепла от солнечной радиации; Q_p – радиационный поток тепла в ИК области спектра; a – коэффициент конвективной теплоотдачи подстилающей поверхности грунта; q_i – поток тепла от солнечной радиации; ε_i – степень черноты подстилающей поверхности грунта; σ_0 – постоянная Стефана – Больцмана; b_i – коэффициент излучения атмосферы; индекс i относится к i -му месяцу в году.

Выражение (2) полностью описывает тепловой поток в периоды времени, когда снежный покров отсутствует. Однако учет снежного покрова методом эквивалентного термического сопротивления усложняет задачу. Появляется дополнительная неизвестная величина – температура поверхности снега. Далее мы займемся выводом формулы, задающей тепловой поток от поверхности грунта в атмосферу через снежный покров.

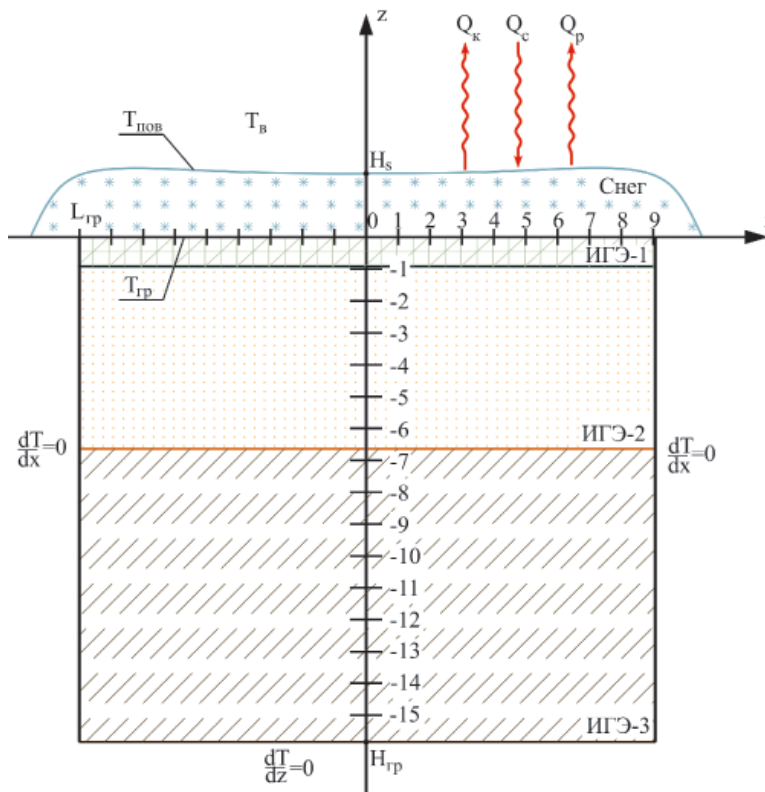


Схема для моделирования температурного режима

многолетнемерзлых грунтов и основные граничные условия:

- H_s – высота снежного покрова; $H_{гр}$ – глубина моделируемого грунтового основания, соответствующая границе нулевой годовой амплитуды температуры;
- $L_{гр}$ – ширина моделируемого грунтового основания; $T_{\text{пов}}$ – температура подстилающей поверхности грунта; $T_{\text{в}}$ – температура атмосферного воздуха;
- $T_{\text{гр}}$ – температура грунта; ИГЭ-1, 2, 3 – инженерно-геологические элементы

При задании динамики теплоизоляционных свойств снежного покрова методом эквивалентного термического сопротивления существенным является тот факт, что тепловой поток через толщу снега считается квазистационарным, т.е. постоянным в любой момент времени. Как следствие, принимается линейное распределение температур. Такой подход имеет хорошее приближение к действительности, если заранее известна динамика толщины, плотности и теплопроводности снежного покрова.

Величина теплового потока через снежный покров в случае стационарного теплового потока имеет следующий вид (3):

$$Q = \frac{\lambda_i (T_{гр} - T_{пов})}{\delta_i}, \quad (3)$$

где λ_i – коэффициент теплопроводности снега; δ_i – толщина снежного покрова.

Теперь мы имеем систему из двух уравнений (2) и (3) и две неизвестные величины: Q и $T_{пов}$. Приравняем уравнения (2) и (3) друг к другу, исключив из рассмотрения величину теплового потока Q :

$$a_i (T_{пов} - T_{в,i}) - q_i + \varepsilon_i \sigma_0 (T_{пов}^4 - b_i T_{в,i}^4) = \frac{\lambda_i (T_{гр} - T_{пов})}{\delta_i}. \quad (4)$$

Как видно, уравнение (4) является полиномиальным, четвертой степени относительно неизвестной переменной $T_{пов}$. Сгруппируем коэффициенты при одинаковых степенях в формуле (4):

$$\varepsilon_i \sigma_0 T_{пов}^4 + T_{пов} \left(\frac{\lambda_i}{\delta_i} + a_i \right) - \left(a_i T_{в,i} + q_i + \varepsilon_i \sigma_0 b_i T_{в,i}^4 + \frac{\lambda_i}{\delta_i} T_{гр} \right) = 0. \quad (5)$$

Заметим, что все числовые множители мономов в уравнении (5) являются положительными. В соответствии с физическим смыслом задачи нам необходимо найти температуру подстилающей поверхности грунта (температуру поверхности снега в зимний период времени), которая может принимать значения в диапазоне от 0 до ∞ .

В связи с громоздкостью окончательного выражения для $T_{пов}$ мы не будем получать решение в явном виде. Мы лишь докажем, что решение уравнения (5) существует и единственно для данной задачи. Для доказательства применим теорему Штурма. Найдем все полиномы штурма и запишем число смены знаков в полиномах штурма для исследуемых интервалов (табл. 1).

Зная число смены знаков в полиномах Штурма, определим количество действительных положительных корней уравнения N :

$$N = w(\text{inf}) - w(0) = 2 - 1 = 1. \quad (6)$$

Таким образом, доказано существование единственного положительного корня уравнения (5), а значит и однозначная разрешимость системы уравнений (2)–(3). Благодаря тому, что степень уравнения (5) не превышает четырех, становится возможным найти аналитическое решение, например, по формулам Декарта – Эйлера. Решение для $T_{пов}$ подставляется в уравнение (3) или (4) и находится величина теплового потока Q .

Теперь рассмотрим влияние снежного покрова на соотношение тепловых потоков различного рода. Исходные данные и результаты расчетов приведены в табл. 2.

Таблица 1

Определение числа смены знаков в полиномах Штурма

Полиномы штурма	Граница диапазона	
	0	inf
$f_0 = kT_{пов}^4 + mT_{пов} - n$	–	+
$f_1 = 4kT_{пов}^3 + m$	+	+
$f_2 = -0,75mT_{пов} + n$	+	–
$f_3 = -\frac{1024kn^3}{27m^3} - 4m$	–	–
Число смены знаков, w	2	1

Таблица 2

Оценочный расчет слагаемых конвективного и радиационного теплообмена

Последовательность расчета	Основные виды теплообмена	Конвективный тепловой поток $a_i(T_{пов} - T_{в,i})$	Поток тепла от солнечной радиации q_i	Тепловой поток ИК излучения $\varepsilon_i \sigma_0 (T_{пов}^4 - b_i T_{в,i}^4)$
Исходные данные		$a_i = 30 \text{ Вт}/(\text{К}\cdot\text{м}^2)$ $(T_{гр} - T_{в,i}) = 5 \text{ К}$	$q_i = 0 \text{ Вт}/\text{м}^2$ (полярная ночь)	$\varepsilon_i = 0,9$ (для снега) $\sigma_0 = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$ $T_{в,i} = 248 \text{ К}$ $T_{гр} = 253 \text{ К}$ $b_i = 0,89$
Термическое сопротивление снежного покрова, $\delta/\lambda_s, \text{ м}^2/\text{Вт}$		0,1...5		
Температура поверхности снега, К		248,66...247,39		
Величина теплового потока от грунта в атмосферу, $\text{Вт}/\text{м}^2$		20,01...-18,23	0	23,32...19,34
Вклад в суммарный тепловой поток, %		46,2...48,5 ¹⁾	0	53,8...51,5 ¹⁾

Примечание. 1 – вклад в суммарный тепловой поток вычислен от суммы модулей величин конвективного и радиационного теплового потока.

Из табл. 2 видно, что абсолютная величина теплового потока от инфракрасного излучения почти всегда преобладает над конвективным тепловым потоком. Более того, при увеличении толщины снежного покрова конвективный тепловой поток меняет свой знак на противоположный. Это обусловлено тем, что радиационная температура атмосферы ниже температуры воздуха. Как следствие, наблюдается переохлаждение приповерхностных слоев снега до температур, более низких, чем температура атмосферного воздуха. Такой эффект может быть обнаружен только в том случае, если в расчете учитывается радиационный тепловой поток в инфракрасной области спектра по закону Стефана – Больцмана. Его учет является обязательным условием достоверного описания процесса теплопередачи от грунта в атмосферу. Это является очередным подтверждением выводов работ [9, 10].

Выводы

Выявлено, что методика расчета температурного режима ММГ, закрепленная в нормативно-технической документации РФ, не учитывает радиационный теплообмен в инфракрасной области спектра. Анализ научно-технической литературы показал, что неучёт данного вида теплообмена приводит к существенному искажению результатов моделирования теплового взаимодействия подземных сооружений с ММГ [9, 10]. Выведена система уравнений для задания граничных условий третьего рода

на поверхности грунта, учитывающая теплообмен в инфракрасной области спектра и задающая снежный покров методом эквивалентного термического сопротивления. Доказана единственность решения системы уравнений для данной задачи. Показано, что теплообмен в инфракрасной области спектра вносит существенный вклад в температурный режим ММГ и его учет необходим для обеспечения высокой степени достоверности результатов моделирования.

Список литературы

1. Алескерова З.Ш., Пульников С.А., Сысоев Ю.С., Казакова Н.В. Оценка эффективности геотехнического мониторинга магистральных газопроводов по качеству продуцируемой информации // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. – 2015. – № 3. – С. 81–86.
2. Горковенко А.И., Вагнер В.В., Пульников С.А. Результаты исследований взаимодействий вибронагруженных магистральных подземных газопроводов с окружающими грунтами // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. – 2007. – № 4. – С. 73–77.
3. Карнаузов М.Ю., Лазарев С.А., Пульников С.А., Сысоев Ю.С. Исследование процесса формирования эксплуатационного положения протяженных участков МГ Уренгой – Челябинск в сложных гидрогеологических условиях // Газовая промышленность. – 2015. – № S724 (724). – С. 53–58.
4. Кушнир С.Я., Карнаузов 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.
5. Кушнир С.Я., Пульников С.А., Малюшин Н.А., Сенив Д.М. Пространственная устойчивость подземных магистральных трубопроводов // Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2012. – № 1. – С. 51–56.

6. Кушнир С.Я., Пульников С.А., Серебренников А.А., Сенев Д.М. Устойчивость призм обвалования подземных магистральных нефтегазопроводов // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. – 2010. – № 4. – С. 65–70.
7. 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.
8. 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.
9. Марков Е.В., Пульников С.А., Гербер А.Д. Проблемы задания граничных условий при моделировании теплового взаимодействия «горячих» трубопроводов с многолетнемерзлыми грунтами // Фундаментальные исследования. – 2015. – № 2–10. – С. 2106–2110.
10. Марков Е.В., Пульников С.А., Сысоев Ю.С. Анализ типовых методик расчета глубины протаивания вечномерзлых грунтов под трубопроводами // Современные проблемы науки и образования. – 2015. – № 1. – С. 142.
11. Мерданов Ш.М., Егорова Т.Ю., Киселев П.В. Создание реологического уравнения состояния снега // Проблемы функционирования систем транспорта. – 2010. – С. 229.
12. Пульников С.А. Взаимодействие вибронгруженных магистральных газопроводов с окружающими грунтами: дис. ... канд. техн. наук. – Тюмень, 2007. – 173 с.
13. Пульников С.А., Сысоев Ю.С., Гербер А.Д., Карнаухов М.Ю. Методика обработки данных мониторинга пространственного положения эксплуатируемого участка подземного магистрального газопровода // Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. – Уфа: Изд-во ИПТЭР, 2013. – Вып. 3 (93). – С. 58–66.
14. РСН 67-87. Инженерные изыскания для строительства. Составление прогноза измерений температурного режима вечномерзлых грунтов численными методами. – 1987. – 40 с.
15. Тарасенко А.А., Сильницкий П.Ф., Тарасенко Д.А. Проблемы проектирования теплоизоляции оснований вертикальных стальных цилиндрических резервуаров, возводимых в криолитозоне // Труды десятой международной конференции по мерзлотоведению TICOP. – 2012. – С. 300–301.
2. Gorkovenko A.I., Vagner V.V., Pulnikov S.A. Rezultaty issledovaniy vzaimodejstvij vibronagruzennykh magistralnykh podzemnykh gazoprovodov s okruzhajushhimi gruntami. Izvestija vysshih uchebnykh zavedenij. Neft i gaz. 2007, no. 4, pp. 73–77.
3. Karnauhov M.Yu., Lazarev S.A., Pulnikov S.A., Sysoev Yu.S. Gazovaya promyshlennost. 2015. no. S724 (724). pp. 53–58.
4. Kushnir S.Ya., Karnauhov M.Yu., Pulnikov S.A., Sysoev Yu.S. Izvestija vysshih uchebnykh zavedenij. Neft i gaz. 2011. no. 5. pp. 72–75.
5. Kushnir S.Ya., Pulnikov S.A., Malyushin N.A., Seniv D.M. Problemyi sbora, podgotovki i transporta nefiti i nefteproduktov. 2012. no. 1. pp. 51–56.
6. Kushnir S.Ya., Pulnikov S.A., Serebrennikov A.A., Seniv D.M. Ustojchivost prizm obvalovaniya podzemnykh magistralnykh neftegazoprovodov. Izvestija vysshih uchebnykh zavedenij. Neft i gaz. 2010, no. 4, pp. 65–70.
7. Kushnir S.Ja., Pulnikov S.A., Sysoev Yu.S., Karnauhov M.Ju. Problemy sbora, podgotovki i transporta nefiti i nefteproduktov. 2011, no. 4, pp. 74–80.
8. Kushnir S.Ya., Pulnikov S.A., Sysoev Yu.S. Izvestija vysshih uchebnykh zavedenij. Neft i gaz. 2012. no. 1. pp. 72–76.
9. Markov E.V., Pulnikov S.A., Gerber A.D. Fundamental research, 2015, no. 2-10, pp. 2106-2110.
10. Markov E.V., Pulnikov S.A., Sysoev Yu.S. Problems of modern science and education, 2015, no. 1, pp. 142.
11. Merdanov Sh.M., Yegorova T.Yu., Kisilev P.V., Problemyi funkcionirovaniya sistem transporta, 2010. 229 p.
12. Pulnikov S.A. Vzaimodejstvie vibronagruzennykh magistralnykh gazoprovodov s okruzhajushhimi gruntami: dis. ... kand. tehn. nauk. Tyumen, 2007, 173 p.
13. Pulnikov S.A., Sysoev Yu.S., Gerber A.D., Karnauhov M.Yu. Problemy sbora, podgotovki i transporta nefiti i nefteproduktov. 2013, no. 3, pp. 58–66.
14. RSN 67-87. 1987, 40 p.
15. Tarasenko A.A., Silnitskiy P.F., Tarasenko D.A. Trudyi desyatoj mezhdunarodnoy konferentsii po merzlotovedeniyu TICOP, 2012, pp. 300–301.

References

Рецензенты:

Якубовский Ю.Е., д.т.н., заведующий кафедрой «Прикладная механика», ФГБОУ ВО «Тюменский государственный нефтегазовый университет», г. Тюмень;
Тарасенко А.А., д.т.н., профессор кафедры ТУР, ФГБОУ ВО «Тюменский государственный нефтегазовый университет», г. Тюмень.