

Тепловое взаимодействие горячего подземного трубопровода с грунтом и сезонно-действующими охлаждающими устройствами

Hot underground pipeline and soils and seasonal cooling devices: thermal interference

D.S. Pazderin
(Giprotyumenneftegas, HMS Group, RF, Tyumen)

E-mail: pazderin@list.ru

Key words: permafrost soils, thermal interference, thermostabilisation, seasonal cooling device, pipeline.

Value of negative temperature is the upmost attribute to define strength of permafrost soils and thus, their bearing capacity when using for pipeline foundations. As a consequence, transfer of soils from plastic frozen to solidly frozen state both ensures higher safety of installations at unexpected temperature variations of permafrost soils, and is more economically effective. Most efficient ones, as per freezing efficiency and ease of operation and economic feasibility, are self-regulating seasonal cooling devices (SCD) with close-ended convection of V/L heat transfer fluid (ammonia, carbon dioxide, Freon gas). Close-ended convection units of V/L heat transfer fluid are featured for high freezing efficiency, as phase transitions occur with absorption and release of big amount of heat (e.g, 1300 kJ/kg for ammonia). The article considers thermal interference issues of a hot pipeline with permafrost soils in conditions of thermostabilisation applying the single vertical SCD. Boundary conditions on the pipeline – soil border, SCD – soil, and air – soil are stated. Areas of soil freezing and thawing near the buried pipeline are defined. The finite-difference approximation of thermal conductivity 3D equation is compiled. The design strategy and its implementation to predict 3D temperature soil profile near the buried pipeline and SCD is obtained. The design strategy takes into account seasonal changes of temperature and number of precipitations on soil, soil inhomogeneity as per composition and thermophysical properties of permafrost soils.

Д.С. Паздерин
(ОАО «Гипротюменнефтегаз»,
Группа ГМС)

Адрес для связи: pazderin@list.ru

Ключевые слова: многолетнемерзлые грунты, тепловое взаимодействие, термостабилизация, сезонно-действующее охлаждающее устройство (СОУ), трубопровод.

Проектирование и строительство зданий и сооружений на многолетнемерзлых грунтах (ММГ) неотъемлемо связаны с проведением прогнозных теплотехнических расчетов динамики температурного поля грунтов основания на весь период эксплуатации сооружения. При этом актуальным является расчет теплового взаимодействия инженерного сооружения с грунтом и окружающим воздухом. Однако не существует готового точного аналитического решения всех задач, так как сооружения, климатические условия и геологический разрез в каждом случае различны. Кроме того, нередко в условиях распространения ММГ для поддержания грунтов в мерзлом состоянии предусматриваются мероприятия по температурной стабилизации грунтов с помощью сезонно-действующих охлаждающих устройств (СОУ), что дополнительно осложняет расчет.

Существуют два принципа использования ММГ в качестве основания для зданий и сооружений: I – в мерзлом состоянии, сохраняемом в процессе строительства и в течение всего периода эксплуатации сооружения; II – в оттаянном или оттаивающем состоянии (СНиП 2.02.04-88 «Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах»). При использовании ММГ по I принципу применяются различные технические решения, в том числе СОУ различных модификаций. Для выбора СОУ необходимы теплотехнические расчеты динамики температурного поля грунтов в зоне его действия.

При подземной прокладке трубопровода с положительной температурой перекачиваемого продукта происходит растепление ММГ. В связи с этим предусматривают мероприятия, предотвращающие протаивание. В ряде случаев необходимая температурная стабилизация грунтов может быть достигнута теплоизоляцией трубопровода и размещением СОУ вдоль него с расчетным шагом. Задача расчета температуры грунта по известному уравнению теплопроводности (А.А. Кислицын, 2002 г.) не имеет точного аналитического решения, поэтому решается с использованием численных методов

$$C(T) \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} (\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} (\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial z}) + f, \quad (1)$$

где $C(T)$ – эффективная объемная теплоемкость грунта; $T(x,y,z,\tau)$ – температура грунта; x, y, z – координаты декартовой системы координат; τ – время; $\lambda(T)$ – коэффициент теплопроводности; f – функция, определяющая наличие источников/стоков тепла в грунте.

При этом трасса трубопровода разбивается на участки со схожими геологическими разрезами и для каждого участка выполняется теплотехнический расчет, в котором учитываются наличие теплоизоляции поверхности трубы, а также температура перекачиваемого продукта. Разбивка на участки позволяет выбрать шаг расстановки СОУ вдоль трубопровода и удаление термостабилизирующих устройств от трубопровода.

Задача теплового взаимодействия ММГ с горячим трубопроводом при термостабилизации является нелинейной, нестационарной, трехмерной. Для ее решения требуется сформулировать граничные и начальные условия. Граничные условия задаются условиями теплообмена на внешних границах расчетной области, причем удаление внешних границ выбираемой расчетной области от источников тепла определяется малым тепловым влиянием источников на выбранном расстоянии за весь расчетный период. Это удаление подбирается эмпирически из условия достаточно небольшого изменения результатов расчета при последовательном увеличении данного расстояния. Удаление в глубь массива нижней горизонтальной границы расчетной области выбирается аналогичным образом из условия достаточно малого влияния на результаты расчета составляющей теплового потока от источников и стоков тепла на выбранной глубине. На этой поверхности составляющая теплового по-

тока принимается равной нулю [1]. С учетом значительной протяженности участка трубопровода и, следовательно, возможности разбить сетку расчетной области на симметричные участки длина расчетной области вдоль оси трубопровода принимается равной половине расстояния между осями СОУ.

На поверхности испарителя СОУ задается условие теплообмена, определяемое геометрией данного устройства, температурой воздуха, скоростью ветра и температурой грунта [2]

$$K_{\text{СОУ}} = \alpha_{\text{в}} \frac{F_{\text{к}}}{F_{\text{и}}}, \quad (2)$$

где $\alpha_{\text{в}}$ – коэффициент теплоотдачи надземной конденсаторной части СОУ, определенный в работе [3]; $F_{\text{к}}$, $F_{\text{и}}$ – площадь соответственно конденсатора и испарителя, м^2 .

На поверхности трубопровода запишем условие теплопередачи в грунт через слой теплоизоляции [4]

$$K_{\text{труб}} = \frac{2\pi L\lambda}{\ln(r + \delta / r)}, \quad (3)$$

где L – длина трубы, м; r – радиус трубы, м; δ – толщина теплоизоляции трубопровода, м.

В качестве примера рассчитаем температурное поле грунтов с подземным горячим трубопроводом и СОУ.

В начальный момент времени $\tau=0$ считаем распределение температуры грунта, его влажности, плотности, объемной теплоемкости и теплопроводности известными во всей рассматриваемой области. Для расчета температуры ММГ примем следующие климатические данные и его теплофизические свойства.

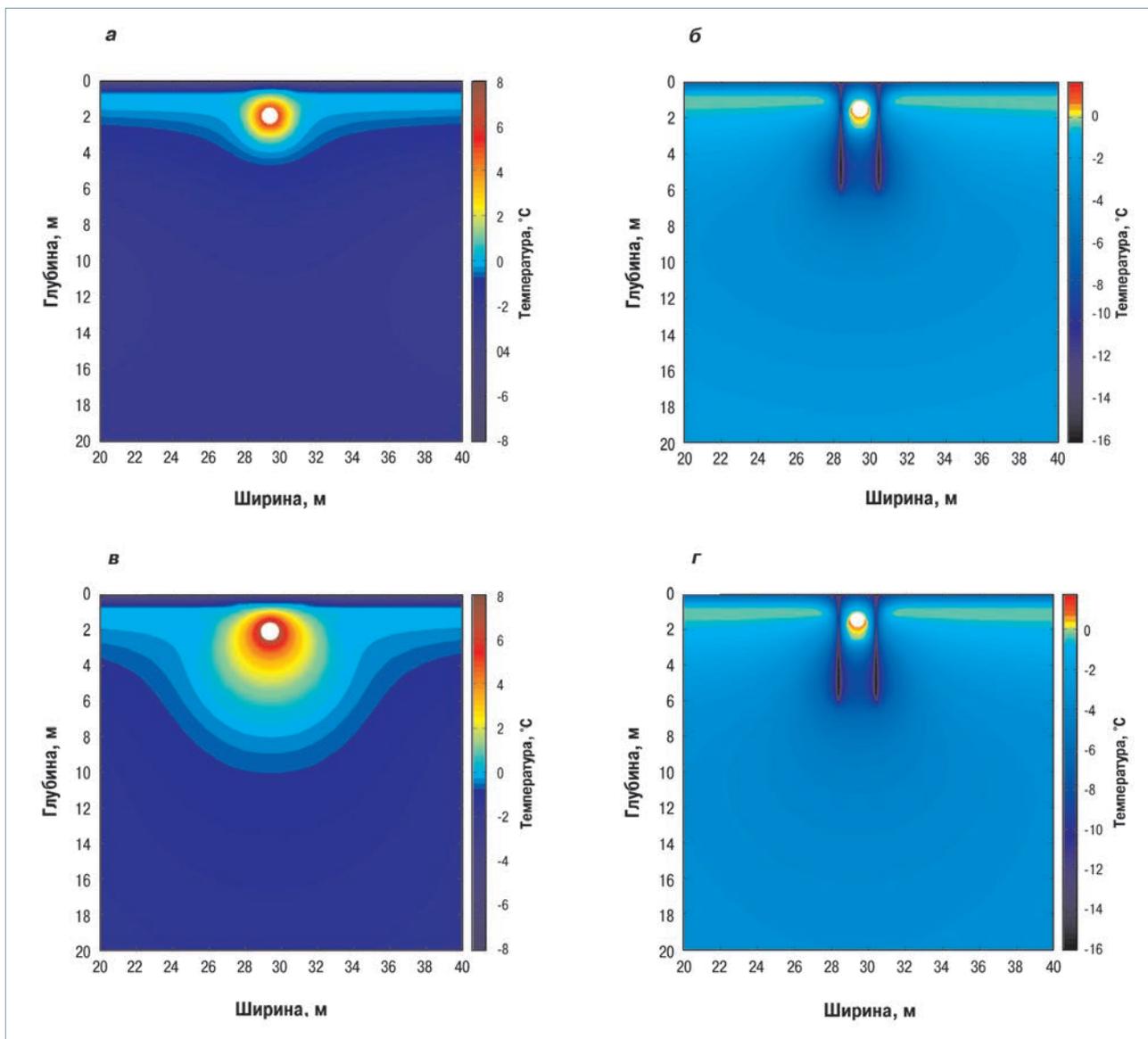
1. Средние месячная скорость ветра и температура воздуха взяты для метеостанции Уренгой (СП 131.13330.2012 «Строительная климатология».)

2. Теплофизические свойства ММГ представлены в таблице.

3. Диаметр трубопровода принят равным 800 мм, расстояние от земной поверхности до оси трубопровода – 2 м, температура перекачиваемого продукта равна 45 °С, толщина теплоизоляции трубопровода – 200 мм, теплопроводность изоляции – 0,035 Вт/(м·К).

Результаты расчетов сложного теплового взаимодействия трубопровода с грунтом и СОУ приведены на рисунке. Установлена высокая эффективность применения вертикальных СОУ. Так, глубина протаивания под трубопроводом на конец второго года эксплуатации со-

Толщина слоя ММГ, м	Теплопроводность, Вт/(м·К), грунта		Объемная теплоемкость, МДж/(м³·К), грунта		Плотность скелета грунта, кг/м³	Влажность	Температура начала фазового перехода, °С
	талого	мерзлого	талого	мерзлого			
2	1,85	2,13	2,5	2,1	1776	0,12	-0,1
6,4	1,54	1,71	2,6	2,3	1585	0,27	-0,1
31,6	1,64	1,87	3,4	2,09	1090	0,51	-0,2



Распределение температуры грунта вокруг трубопровода через 2 года (а, б) и 30 лет (в, г) эксплуатации без установки СОУ (а, в) с установленными СОУ (б, г)

ставила 1,2 м, на конец 30-го года – 5 м без использования СОУ. При установке вблизи трубопровода термостабилизаторов протаивание происходит до 0,1 м вплоть до конца тридцатого года эксплуатации. Отсутствие экспериментальных данных о замерах температуры грунтов вблизи подземного трубопровода с установленными СОУ не позволяет сравнить с ними полученные результаты.

В будущем предполагается усовершенствовать модель путем аппроксимации с экспериментальными данными и использовать ее для выдачи рекомендаций с целью проектирования.

Полученная модель позволяет прогнозировать температурное распределение в грунте при взаимном влиянии горячего трубопровода, СОУ и ММГ в процессе сезонного изменения температуры воздуха, скорости ветра и толщины снежного покрова.

Список литературы

1. Горелик Я.Б., Шабаров А.Б., Сысоев Ю.С. Динамика протаивания мерзлых пород в зоне влияния двух скважин // Криосфера Земли. – 2008. – Т. XII. – № 1. – С. 59-65.
2. Искусственное охлаждение грунтов с помощью термосвай / С.С. Вялов, Ю.А. Александров, Ю.С. Миренбург, Ю.Г. Федосеев // Инженерное мерзлотоведение. – 1979. – С. 72-91.
3. Примakov С.С., Паздерин Д.С. О расчете теплообмена при проектировании конденсаторной части сезоннодействующего охлаждающего устройства // Нефтяное хозяйство. – 2013. - №4. – С. 124-125.
4. Уонг Х. Основные формулы и данные по теплообмену для инженеров/пер. с англ. – М.: Атомиздат, 1979. – 216 с.

References

1. Gorelik Ya.B., Shabarov A.B., Sysoev Yu.S., *Kriosfera Zemli*, 2008, V. XII, no. 1, pp. 59-65.
2. Vyvalov S.S., Aleksandrov K.A., Mirenourg Yu.S., Fedoseev Yu.G., *Collected papers "Inzhenernoe merzlotovedenie"* (Engineering permafrostology), Moscow: Nauka Publ., 1979, pp. 72-90.
3. Primakov S.S., Pazderin D.S., *Neftyanoe khozyaystvo – Oil Industry*, 2013, no. 4, pp. 124-125.
4. Wong H.Y., *Heat transfer for engineers*, Longman Group, 1977, 213 p.