

МОДЕЛИРОВАНИЕ ОРЕОЛА ОТТАИВАНИЯ МАГИСТРАЛЬНОГО НЕФТЕПРОВОДА

О.Г. Буняк

Научный руководитель – доцент Н.В. Чухарева

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск Россия

Цель статьи заключается в исследовании влияния “горячего” нефтепровода на вмещающий грунт с ледяными включениями. Основным негативным фактором для подземных нефтепроводов, проложенных в криолитозоне, является формирование ореолов оттаивания вокруг трубопровода, что приводит к осадке грунта. Отметим, что с точки зрения прочности нефтепровода, наибольшую опасность представляет его залегание в грунтах, содержащих крупные включения подземного льда, дающие при оттаивании термокарстовые провалы или просадку [1]. В связи с этим при проектировании и эксплуатации нефтепроводов обязательным является выполнение теплотехнического расчета, на основании которого прогнозируют формирование ореола оттаивания вокруг нефтепровода. Поскольку геологическое строение грунтов с повторно-жильными льдами (ПЖЛ) имеет сложную и неоднородную структуру, прогнозирование требует определения трехмерного температурного поля в грунте с учетом фазовых переходов. Использование же двумерного моделирования не позволяет учесть реальную геометрию моделируемых объектов, включая ПЖЛ, и может привести к большим погрешностям расчета. В настоящее время существует множество методов расчета теплового взаимодействия нефтепровода и многолетнемерзлого грунта, краткий анализ большинства из них представлен в работе [2]. Однако ни одна из них не позволяет прогнозировать ореол оттаивания вокруг нефтепровода с учетом таких немаловажных факторов, как неоднородное геологическое строение разреза, изменение метеорологических условий во времени, наличие теплоизоляционных материалов, а также наличие в грунте неоднородных крупных включений льда. В статье использован программный комплекс FROST 3D, который позволяет решить эту задачу в трехмерной постановке с учетом перечисленных факторов для больших геометрических масштабов и многолетних прогнозов.

Используемая математическая модель и численный метод

Решение задачи расчета трехмерного поля температур вокруг нефтепровода требует рассмотрения нелинейного уравнения теплопроводности следующего вида:

$$C_{eff}(T) \frac{\partial T}{\partial t} = \text{div}(\lambda(T) \text{grad}(T)), \quad (1)$$

где: $C_{eff}(T)$ – эффективная теплопроводность грунта (учитывающая наличие фазового перехода);

$\lambda(T)$ – теплопроводность грунта;

$T(x,y,z,t)$ – трёхмерное поле температур, изменяющееся с течением времени; t — время

Известно, что уравнение (1) допускает аналитическое решение только в одномерном случае для полубесконечной прямой, что при проектировании трубопроводов на многолетнемерзлых грунтах не имеет никакой практической ценности. Рассмотрение же двухмерного случая, а тем более трехмерного, требует применения численных методов для решения уравнения теплопроводности (1). В численном методе решения уравнения теплопроводности (1), используемом в программном комплексе FROST 3D, учтен как отечественный [3, 4], так и зарубежный опыт [5] решения задач теплопередачи. Рассматриваемое трехмерное уравнение теплопроводности решается с применением метода переменных направлений в соответствии со схемой Дугласа — Рекфорда [6].

Численное моделирование ореола оттаивания. Расчет был выполнен для следующей конфигурации: трубопровод проходит вдоль решетки ПЖЛ.

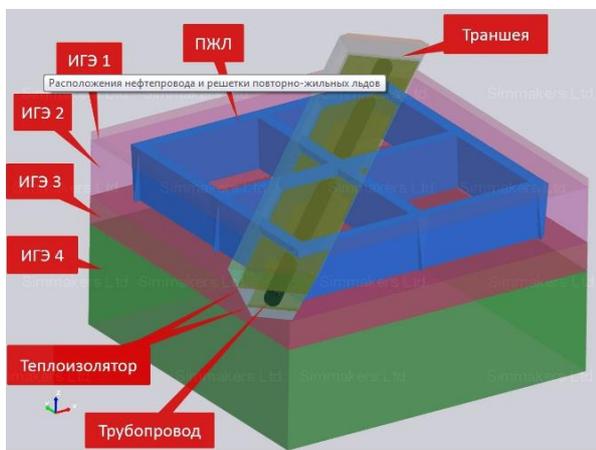


Рис. 1 Конфигурация взаимного расположения нефтепровода и решетки ПЖЛ

Учитывались следующие геометрические параметры.

Линейные размеры области моделирования: 25×25 м в горизонтальной плоскости и 15 м в глубину.

Глубина залегания льдов: 0.7 м, мощность: 4.3 м.
 Диаметр нефтепровода: 1220 мм.
 Толщина стенки трубы: 10 мм.
 Толщина теплоизоляции трубопровода: 70 мм.
 Температура перекачиваемой нефти: плюс 8 °С.

Теплофизические характеристики инженерно-геологических элементов (ИГЭ) вокруг траншеи с нефтепроводом были заданы согласно таблице 1:

Таблица 1

Теплофизические характеристики инженерно-геологических элементов

Номер ИГЭ	Грунт	Мощность слоя, м	Коэффициент теплопроводности талого и мерзлого грунта λ_t/λ_m , Вт/(м·К)	Объемная теплоемкость талого и мерзлого грунта C_T/C_M , кДж/(м ³ ·К)	Объемная влажность грунта, м ³ /м ³
1	Торф	0.7	0.5 / 2	3600 / 1300	0.33
2	Торф преимущественно среднеразложившийся, пластичномерзлый, льдистый. Содержит ПЖЛ	4.3	0.5 / 2	3600 / 1300	0.33
3	Супесчано-суглинистый грунт, льдистый	2.2	1.45 / 2.3	2867 / 2030	0.57
4	Супесчано-суглинистый грунт с повышенным содержанием льда	7.8	1.25 / 2.3	3160 / 205	0.42

Для повторно-жильных льдов задавалась теплоемкость, равная 1860 кДж/(м³·К), а теплопроводность – 2.25 Вт/(м·К).

Результаты моделирования.

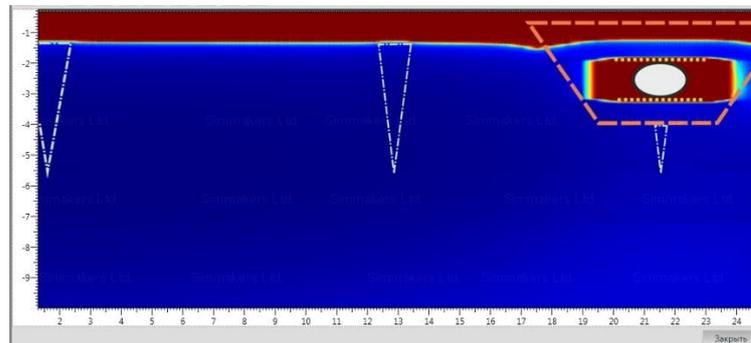


Рис. 2. Ореол оттаивания грунта вокруг нефтепровода в сечении YZ

По расчетам установлено, что максимальное оттаивание грунта вокруг нефтепровода формируется в направлениях, в которых отсутствует теплоизолятор, и не превышает 0.9 м. Амплитуда годовых колебаний температурного поля в грунте в окрестности трубопровода варьируется в пределах от 3 до 5 °С.

Стоит также отметить, что тепловое влияние нефтепровода не привело к таянию ПЖЛ под ним. Это обстоятельство связано с тем, что трубопровод располагается в траншее с техногенным грунтом, из которой удалили подземный лед и разместили теплоизоляционный материал.

Литература

1. Бородавкин П. П. Подземные магистральные трубопроводы. – 2011.
2. Зотов М. Ю. и др. Опыт применения программных комплексов для расчета напряженно-деформированного состояния нефтепроводов, прокладываемых на вечномерзлых грунтах //Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2012. – №. 2. – С. 61-65.
3. Кудрявцев С. А. Численное моделирование процесса промерзания, морозного пучения и оттаивания грунтов //Основания, фундаменты и механика грунтов. – 2004. – №. 5. – С. 21 – 26.
4. Абжалимов Р. Ш. Определение расчетных значений распределения отрицательной температуры в грунтах по глубине промерзания //Развитие городов и геотехническое строительство. – 2007. – Т. 2. – №. 11. – С. 204.
5. Thomas H. R. et al. Modelling of cryogenic processes in permafrost and seasonally frozen soils //Geotechnique. – 2009. – V. 59. – No. 3. – P. 173 – 184.
6. Dazhenka T. A., Gishkeluk I. A. Quasilinear heat equation in three dimensions and Stefan problem in permafrost soils in the frame of alternating directions finite difference scheme //Proceedings of the World Congress on Engineering. – 2013. – V. 1. – P. 3 – 5.