

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ОТТАИВАНИЯ МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ГРУНТОВ ВОКРУГ ПОДЗЕМНОГО ТРУБОПРОВОДА БОЛЬШОЙ ПРОТЯЖЕННОСТИ

FORECASTING
OF PERMAFROST
THAWING AROUND
AN UNDERGROUND
CROSS-COUNTRY PIPELINE



УДК 622.692.4(211)+551.328.2



И.А. Гишкелюк

кандидат технических наук, директор
по науке Simmakers Ltd,
Беларусь, г. Минск

I.A. Gishkeluk

Candidate of Sciences, Chief Science Officer,
Simmakers Ltd,
Minsk, The Republic of Belarus
info@simmakers.com



Ю.В. Станиловская

научный сотрудник лаборатории геоэкологии
Института геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН,
г. Москва

J.V. Stanilovskaya

Research Associate of Laboratory of Geocryology,
Sergeev Institute of Environmental Geoscience
Russian Academy of Sciences (IEG RAS),
Moscow, Russian Federation
Stanilovskaya@geoenv.ru



Д.В. Евланов

управляющий директор Simmakers Ltd,
Беларусь, г. Минск

D.V. Evlanov

Managing Director, Simmakers Ltd,
Minsk, The Republic of Belarus
info@simmakers.com

Аннотация: Моделируется формирование ореола оттаивания вокруг протяженного подземного трубопровода с подогреваемой нефтью при его залегании в грунтах с мощными подземными льдами. Компьютерное моделирование основано на численном решении уравнения теплопроводности в трехмерной постановке с учетом фазовых превращений. Предложенную методику можно применять при проектировании и эксплуатации подземных трубопроводов в сложных инженерно-геологических условиях для оценки ореола оттаивания, знание которого необходимо при расчете напряженно-деформированного состояния трубопроводов.

Ключевые слова: ореол оттаивания, подземный трубопровод, трехмерное моделирование, расчет тепловых полей, многолетнемерзлые грунты, подземный лед.

Abstract: The formation of thawing bulb around the cross-country pipeline with the warmed-up oil at its bedding in soils with ground ice is simulated. The computer simulation is based on the numerical solution of the heat equation in three-dimensional statement factoring phase transitions.. The proposed technique can be applied at design and operation of underground pipelines in difficult geological and engineering conditions for an assessment of the thawing bulb formation. The knowledge of the thawing bulb size is necessary at calculation of the stress-strain state of a pipeline.

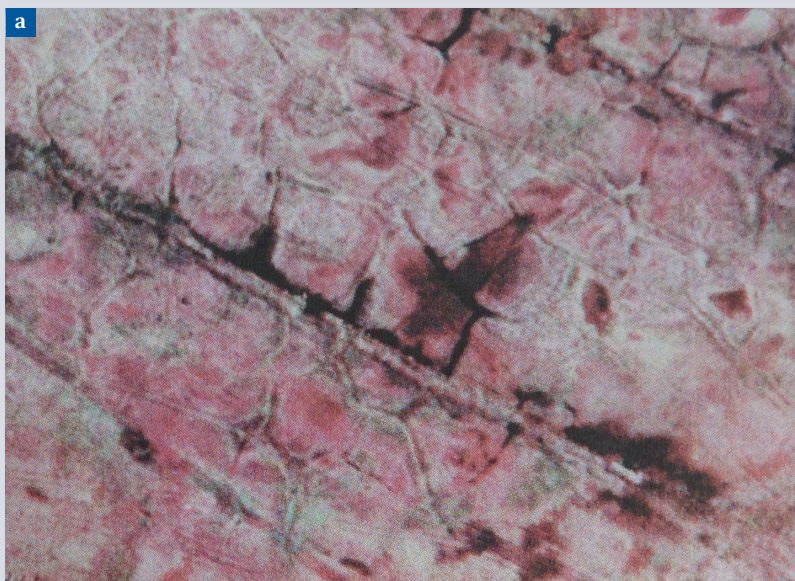
Key words: thawing bulb, underground pipeline, 3-D simulation, thermal field simulation, permafrost, ground ice.

Для реализуемых проектов транспортировки нефти в криолитозоне по подземным нефтепроводам «Куюмба – Тайшет», ВСТО-1,2, Сковородино – граница КНР одним из негативных событий может являться формирование ореола оттаивания вокруг трубопровода, который приводит к осадке поверхности и напряженно-деформированному состоянию трубопровода. Опасными участками для возникновения деформаций трубопровода в результате его теплового воздействия являются участки смены грунтов с различным льдосодержанием. Примером могут служить границы смены талого и мерзлого грунта или участки с крупными включениями подземного льда, при оттаивании которого образуются термокарстовые провалы [1]. Зачастую выполнение теплотехнического расчета обязательно при проектировании и эксплуатации нефтепроводов в целях прогнозирования потенциальной осадки земной поверхности (рис. 1). Значение размера ореола оттаивания необходимо в любой методике по оценке осадки грунта и напряженно-деформированного состояния трубопровода.

Существует большое количество программных средств и подходов, позволяющих рассчитать ореол оттаивания в поперечном сечении трубопровода [3–7]. В широко известных зарубежных программных комплексах для численного моделирования ANSYS и ABAQUS можно осуществить трехмерный расчет теплового поля вокруг трубопровода, но только для участка небольшой протяженности (максимум несколько десятков метров). При этом прогнозирование оттаивания мерзлых грунтов на один год в этих программах занимает несколько суток. С практической точки зрения трехмерный тепловой расчет небольшого участка трубопровода (тем более двумерный) не представляет большой ценности, поскольку не позволяет оценить неравномерную осадку трубопровода при его прохождении через грунты с различным содержанием льда, которые дают разную осадку при растеплении.

Рис. 1

Трасса трубопровода с термокарстом по решетке с повторно-жильными льдами (а) (вид сверху) и участок газопровода, нарушенный термоэрозией (б) [2]



Проведенный обзор публикаций и программных комплексов для математического моделирования показал, что подходящей программой для трехмерного теплового расчета оттаивания и промерзания грунтов вокруг трубопровода большой протяженности является программный комплекс Frost 3D Universal [8]. Программный комплекс позволяет в короткие сроки прогнозировать на десятки лет трехмерную динамику тепловых полей вокруг трубопровода большой протяженности (километр и более) с учетом фазовых превращений и конвективного переноса тепла.

Цель настоящей работы – спрогнозировать и оценить неравномерность распределения и величину ореола оттаивания вокруг трубопровода большой длины. Итог работы – сделан десятилетний прогноз ореола оттаивания вокруг подземного нефтепровода протяженностью 1 км в мерзлых грунтах с залежами подземного льда. Результаты подобного прогноза широко востребованы для оценки неравномерной осадки грунта под трубопроводом, тем не менее расчеты в таких геометрических и временных масштабах ранее не выполнялись. Необходимость данного расчета

обусловлена неопределенностью возможного протаивания подземных льдов на стадии эксплуатации нефтепроводов в районе населенных пунктов Куюмба, Сквородино, Чульман, Олекминск.

Математическая модель

Расчет трехмерного теплового поля вокруг трубопровода требует численного решения нелинейного уравнения теплопроводности следующего вида

$$\left(C(T) + \rho_b L \frac{\partial w_w(T)}{\partial T} \right) \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla(-\lambda(T)\nabla T) + C_w u \nabla T = 0, \tag{1}$$

где T – температура, °C; $C(T)$ – зависимость объемной теплоемкости грунта от температуры, Дж/(м³·°C); $w_w(T)$ – зависимость количества незамерзшей влаги в грунте от температуры, д.е.; ρ_b – плотность грунта, кг/м³; L – удельная теплота фазового перехода, Дж/кг; t – время, с; $\lambda(T)$ – зависимость теплопроводности грунта от температуры, Вт/(м·°C); C_w – объемная теплоемкость воды, Дж/(м³·°C); \mathbf{u} – вектор скорости фильтрации грунтовых вод, м/с.

В качестве зависимости объемной теплоемкости и теплопроводности от температуры используются выражения

$$C(T) = C_f(1 - w_w(T)/w_{tot}) + C_{th}(w_w(T)/w_{tot}),$$

$$\lambda(T) = \lambda_f(1 - w_w(T)/w_{tot}) + \lambda_{th}(w_w(T)/w_{tot}),$$

где C_f и C_{th} – объемная теплоемкость мерзлого и талого грунта, Дж/(м³·°C); λ_f и λ_{th} – теплопроводность мерзлого и талого грунта, Вт/(м·°C); w_{tot} – суммарная весовая влажность грунта, д.е. При этом зависимость количества незамерзшей влаги в грунте от температуры $w_w(T)$ задается табличной функцией.

Для учета теплового взаимодействия грунта с трубопроводом и атмосферой к уравнению теплопроводности (1) формулируется граничное условие вида

$$n(-\lambda \Delta T) + \alpha_b (T_b - T) + \alpha_{tr} (T_H - T) + q = 0,$$

где α_b – коэффициент теплообмена между грунтом и атмосферой, Вт/(м²·°C); T_b – температура воздуха, °C; α_{tr} – коэффициент теплообмена между грунтом и трубопроводом, Вт/(м²·°C); T_H – температура перекачиваемого

продукта в трубопроводе, °C; q – тепловой поток на границе области моделирования, Вт/м².

Уравнение теплопроводности (1) допускает аналитическое решение только в частном одномерном случае. Рассмотрение же трехмерного случая требует использования численных методов. Для численного решения уравнения теплопроводности (1) известно много подходов, базирующихся на численных методах – конечных элементов, конечных разностей и их различных модификаций [9]. Однако проблема решения этой задачи заключается в том, что дискретизация участка грунта, содержащего трубопровод протяженностью один километр, потребует десятки миллионов ячеек расчетной сетки.

Такое количество ячеек в расчетной сетке объясняется следующим:

- большой размер расчетной области требует большого количества ячеек для ее дискретизации;
- увеличение размера ячейки также ограничено, так как ее максимальный размер зависит от геометрических размеров элементов, находящихся в расчетной области – диаметр трубопровода, толщина теплоизоляции, границы различных грунтов и др.;
- необходимо выполнять учащенную дискретизацию области, где грунт переходит из талого состояния в мерзлое, так как увеличение размера ячеек расчетной сетки на границе фазового перехода приводит к резкому увеличению погрешности численного решения.

В свою очередь решение уравнения теплопроводности на расчетных сетках, состоящих из десятка миллионов узлов, требует очень больших вычислительных ресурсов, в том числе большое количество процессорного времени и большой объем оперативной памяти. Именно по этой причине такие широко известные универсальные программные комплексы, как ANSYS и ABAQUS не в состоянии решать подобные задачи.

В отличие от универсальных систем конечно-элементного анализа, программная реализа-

ция численного решения уравнения теплопроводности (1) в программе Frost 3D Universal выполнена с использованием конструкций и парадигм программирования для параллельных вычислений низкого уровня. Это позволило увеличить степень параллелизации вычислений и значительно сократить требуемый объем оперативной памяти. Как результат, численное решение уравнения теплопроводности на расчетных сетках из десятков миллионов узлов в программе Frost 3D Universal осуществляется за приемлемое время – несколько часов.

Численное моделирование и анализ результатов

Для анализа формирования ореола оттаивания вокруг трубопровода проводился расчет динамики трехмерного температурного поля в течение 10 лет и содержания незамерзшей влаги в грунте. При этом рассматривался наиболее опасный случай, когда часть трубопровода лежит на границе раздела подземного льда (рис. 2 – ИГЭ2) и грунтов с низким содержанием льда (рис. 2 – ИГЭ3).

В программе Frost 3D Universal на основании данных по инженерно-геологическим изысканиям восстанавливалась трехмерная геометрия инженерно-геологического строения грунтов, а также создавалась геометрия трубопровода (рис. 2). Следует отметить, что геометрия трубопровода имеет изгибы как по оси Z, так и по оси Y, при этом некоторые участки трубопровода проходят через подземные льды. Размеры построенной трехмерной геометрии рассматриваемого участка грунта составили: длина – 1000 м, ширина – 50 м, глубина – 55 м; диаметр трубопровода – 1,2 м.

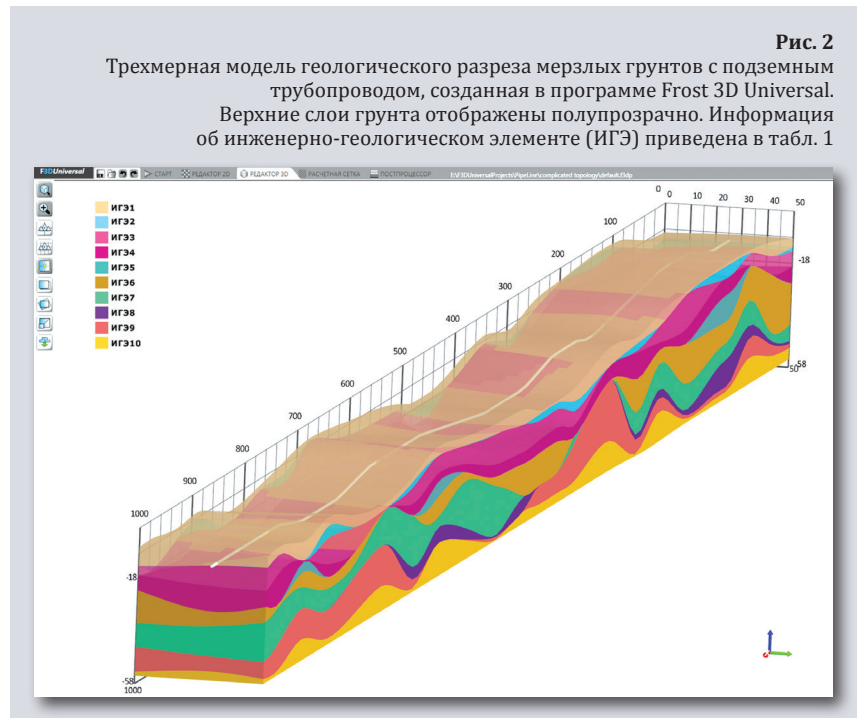
Геологический разрез типового участка представлен переслаиванием высокольдистого торфа, залежей льда, песков и супеси с гравием (рис. 2). Линзы льда мощностью до 4-х метров залегают на глубине расположения трубопровода и перекрыты торфом. Для каждого инженерно-геологического элемента (ИГЭ),

образующего рассматриваемую область, задавались теплофизические свойства в соответствии с табл. 1.

Изменение относительного содержания незамерзшей воды (w_w/w_{tot}) в зависимости от температуры для различных типов грунтов задавалось в программе в табличном виде. На рис. 3 представлены некоторые типичные зависимости, используемые в данном расчете.

На границе области моделирования задавались следующие граничные условия.

Поскольку нижняя граница расчетной области находится на достаточном удалении от трубопровода (более 50 м), то тепловой поток от трубопровода практически не оказывает влияние на температуру многолетнемерзлых грунтов, расположенных ниже расчетной области. Поэтому на нижней границе задавалась постоянная температура, равная температуре многолетнемерзлого грунта: минус 1,1 °С. Боковые границы области моделирования также находятся на достаточном удалении от трубопровода, и поэтому тепловой поток на них предполагается равным нулю. Для учета теплообмена поверхности грунта с атмосферой на верхней границе моделируемой



области задавалось изменение во времени температуры воздуха T_v и коэффициента теплообмена поверхности грунта с воздухом α_v .

Зависимость коэффициента теплообмена между грунтом и воздухом от времени вычисляется, исходя из среднемесячных значений скорости ветра и толщины снежного покрова с использованием следующих уравнений [10]

$$\alpha_v = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_v(t)} + \frac{d(t)}{\lambda_s}}$$

где $d(t)$ – изменение толщины снежного покрова от времени, м; λ_s – теплопроводность снежного покрова, Вт/(м·°С); $\alpha_v(t)$ – конвективный коэффициент теплообмена поверхности грунта с воздухом, Вт/(м²·°С), который в

Табл. 1
Теплофизические характеристики грунтов в моделируемой области

Номер ИГЭ	Грунт	Коэффициент теплопроводности $\lambda_{ж}/\lambda_{л}$, Вт/(м·К)	Объемная теплоемкость $C_{ж}/C_{л}$, кДж/(м ³ ·К)	Суммарная весовая влажность грунта д.е.	Плотность сухого грунта, кг/м ³	Температура начала фазовых превращений, °С
1	Торф среднеразложившийся	0,81 / 1,34	4000 / 2310	3,47	80	0
2	Лед	0,56 / 2,25	4212 / 2261	1,0	1000	0
3	Суглинок мягкопластичный	1,57 / 1,8	3170 / 2410	0,29	1450	-0,31
4	Суглинок пластичномерзлый	1,57 / 1,8	3170 / 2410	0,57	1030	-0,31
5	Песок мелкий твердомерзлый	2,26 / 2,62	2780 / 2260	0,23	1590	-0,32
6	Гравийный грунт	1,54 / 1,62	2160 / 1800	0,21	1550	0
7	Песок средней крупности	2,0 / 2,2	2390 / 2080	0,21	1630	-0,32
8	Песок пылеватый твердомерзлый	1,91 / 2,14	2780 / 2060	0,24	1550	-0,19
9	Супесь твердомерзлая	1,62 / 1,74	2310 / 2140	0,27	1470	-0,32
10	Супесь твердомерзлая слаболистая	1,62 / 1,74	2310 / 2140	0,18	1710	-0,38

Рис. 3

Изменение относительного содержания незамерзшей воды в зависимости от температуры для различных типов грунтов

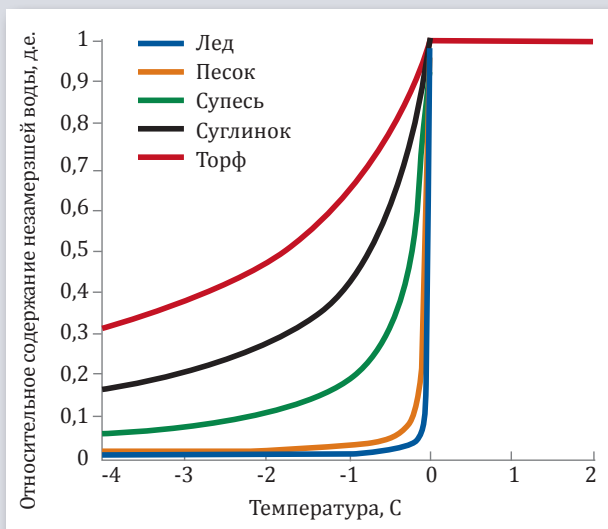


Рис. 4

Трехмерное распределение температуры в градусах Цельсия через 10 лет (октябрь 2024 г.) в продольном сечении расчетной области

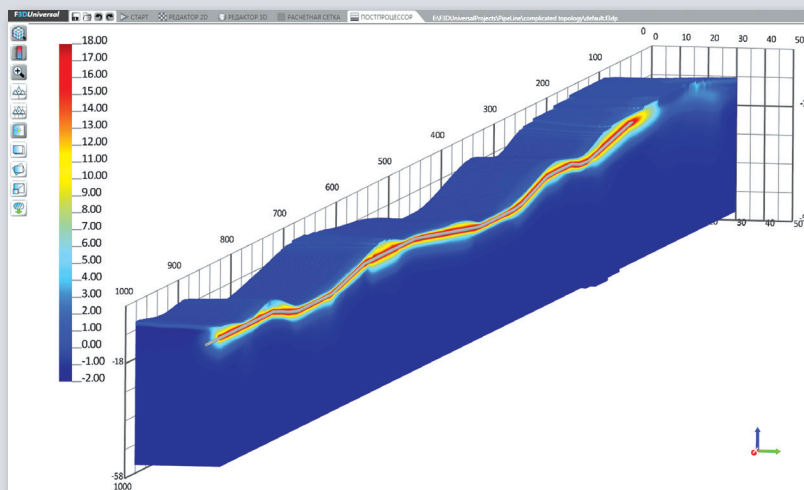
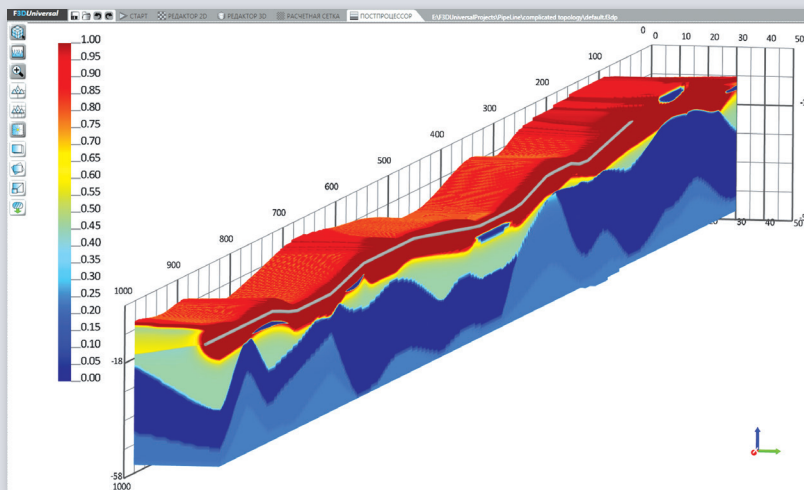


Рис. 5

Трехмерное распределение относительного содержания незамерзшей воды вокруг трубопровода через 10 лет (октябрь 2024 г.) в продольном сечении расчетной области



зависимости от скорости ветра (u , м/с) определяется выражением

$$\alpha_v = \begin{cases} 6,16 + 4,19 u & 0 < u < 5 \\ 7,56 u^{0,78} & 5 < u < 30. \end{cases}$$

При проведении данного теплотехнического расчета предполагалось, что по трубопроводу перекачивается нефть с температурой $T_n = +18$ °С. Теплообмен между трубой и грунтом учитывался путем задания на границе «труба – грунт» коэффициента теплообмена $\alpha_{тр}$, который вычисляется с использованием уравнений [8]

$$\alpha_{тр} = \left(\frac{D_2}{\alpha_{liq} D_1} + \frac{D_2}{2\lambda_{ст}} \ln \frac{D_2}{D_1} \right)^{-1}, \quad (2)$$

где D_1 – внутренний диаметр трубопровода, м; D_2 – наружный диаметр трубопровода, м; $\lambda_{ст}$ – теплопроводность стенки трубопровода, Вт/(м·°С); α_{liq} – коэффициент теплообмена между прокачиваемым продуктом по трубопроводу и стенкой трубопровода, Вт/(м²·°С).

Коэффициент теплообмена между прокачиваемым продуктом по трубопроводу и стенкой трубопровода рассчитывается с использованием уравнения [11]

$$\alpha_{liq} = \frac{0,023 Pr Re^{0,8}}{1 + 2,14 Re^{-0,1} (Pr^{2/3} - 1)} \cdot \frac{\lambda_n}{D_1}, \quad (3)$$

где Re – число Рейнольдса; Pr – число Прандтля; λ_n – теплопроводность нефти в трубопроводе, Вт/(м·°С).

Таким образом, предполагая, что средняя скорость прокачки нефти составляет 30 млн т в год, внутренний диаметр трубопровода равен $D_1 = 1,19$ м, наружный – $D_2 = 1,2$ м, теплопроводность стенки трубопровода – 28 Вт/(м·°С), и следуя уравнениям (2–3) получаем коэффициент теплообмена от трубопровода к грунту $\alpha_{тр} = 203$ Вт/(м²·К).

Построенная трехмерная геометрия рассматриваемого участка грунта (рис. 2) для численного решения уравнения теплопроводности дискретизировалась прямоугольной гексаэдрической расчетной сеткой, состоящей из 20 316 296 узлов. Впоследствии на эту расчетную сетку были перенесены заданные пользователем теплофизические свойства грунтов и граничные условия.

На основании вышеперечисленных исходных данных было проведено прогнозирование трехмерных полей температур (рис. 4) и количества незамерзшей влаги (рис. 5) в грунте вокруг трубопровода в течение десяти лет. Расчет данной модели в программе Frost 3D Universal на персональном компьютере с графическим ускорителем GeForce GTX TITAN занял 3 часа.

На распределении относительного содержания незамерзшей воды (рис. 5) красному цвету соответствуют грунты, в которых вся влага находится в незамерзшем состоянии. Из распределения количества незамерзшей влаги оценивался размер ореола оттаивания, формирующегося вокруг трубопровода. Смоделированный ореол оттаивания имеет несимметричную форму и неоднороден по всей длине километровой участка. Максимальный ореол оттаивания образовался в местах прохождения трубопровода через суглинок мягкопластичный с низким начальным содержанием льда и глубиной протаивания грунтов под трубопроводом составила 6,6 м. Минимальный ореол оттаивания образовался в местах, где трубопровод проходил через подземные льды и глубина протаивания под трубопроводом не превысила 2,5 м. Таким образом, в высокольдистых отложениях оттаивание грунтов происходит менее интенсивно. Это обусловлено тем, что при образовании ореола оттаивания большая часть тепла от трубопровода затрачивается на фазовое превращение «лед – вода». Несмотря на то, что расчетное протаивание грунтов с большим содержанием льда наименьшее, необходимо иметь в виду, что протаивание увеличивается и ускоряется при миграции талой воды, что приводит к наибольшей фактической осадке.

Полученное распределение ореола оттаивания грунта по длине трубопровода необходимо для дальнейшей проектной оценки осадки грунтов под протяженным трубопроводом и расчета его напряженно-деформированного состояния.

Выводы

1. Выполнено трехмерное компьютерное моделирование формирования ореола оттаивания вокруг километровой участка подземного трубопровода, залегающего в грунтах с высоким содержанием льда. Результаты таких расчетов необходимы для оценки осадки грунта вследствие его растепления от теплового влияния трубопровода и последующего расчета напряженно-деформированного состояния трубопровода.
2. По результатам расчета получено неоднородное распределение ореола оттаивания на протяженном участке трубопровода. В проектных и эксплуатационных целях необходимо рассматривать участок большой длины, поскольку на величину ореола влияют теплофизические свойства грунтов и содержание льда, которые сильно варьируются по длине трубопровода.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бородавкин П. П. Подземные магистральные трубопроводы. М.: Недра, 1982. 384 с.
2. Хренов Н. Н. Основы комплексной диагностики северных трубопроводов. Наземные исследования. М.: Газоил пресс, 2005. 608 с.
3. Новиков П. А., Александров А. А., Ларионов В. И. Оценка результатов прогнозирования ореола оттаивания вокруг трубопровода на участках с многолетнемерзлыми грунтами // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Естественные науки». 2013. № 1. С. 73–81.
4. Опыт применения программных комплексов для расчета напряженно-деформированного состояния нефтепроводов, прокладываемых на вечномерзлых грунтах / М. Ю. Зотов [и др.] // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. 2012. № 2. С. 61–65.
5. Котляревский В. А. Расчет деформаций трубопроводов в ореолах оттаивания адаптацией нормативных требований // Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело». 2013. № 3. С. 206–216.
6. Сивцева А. С. Исследование напряженно-деформированного состояния подземных трубопроводов в условиях вечномерзлых грунтов с использованием программного комплекса Spire // Трубопроводный транспорт: теория и практика. 2007. № 4(10). С. 32–35.
7. Программа расчета теплового взаимодействия инженерных сооружений с вечномерзлыми грунтами. WARM: Н. В. Емельянов, Г. П. Пустовойт, Л. Н. Хрусталева, С. В. Яковлев; Свидетельство № 940281; Оpubл. РосАПО, 1994.
8. Программный комплекс для теплотехнических расчетов FROST 3D UNIVERSAL [Электронный ресурс]. URL: <http://www.simmakers.ru/frost-3d>. 2014.
9. Dazhenka T. A., Gishkeluk I. A. Consistency of the Douglas – Rachford splitting algorithm for the sum of three nonlinear operators: application to the Stefan problem in permafrost soils / Applied and Computational Mathematics. 2013. Vol. 2. Issue 4. Pp. 100–108.
10. Куртнер Д. А., Чудновский А. Ф. Расчет и регулирование теплового режима в открытом и защищенном грунте. Л.: Гидрометеоздат, 1969. 299 с.
11. Кутателадзе С. С. Теплопередача и гидродинамическое сопротивление: справ. пособ. М.: Энергоатомиздат, 1990. 367 с.

REFERENCES

- [1] Borodavkin P.P., Underground trunk pipelines. M.: Nedra, 1982, 384 p.
- [2] Khrenov N.N., Bases of complex diagnostics of northern pipelines. Ground surveys. M.: Gazoil press, 2005, 608 p., (Russian Federation).
- [3] Novikov P.A., Aleksandrov A.A., Lariionov V.I., Assessment of the forecasting results of thawing halo around the pipeline on the sites with permafrost grounds. Vestnik MGTU. im. N.E. Bauman Publ., Series «Natural sciences», 1(2013), 73–81, (Russian Federation).
- [4] Zotov M.Y. et al., Application of software solutions to calculate stress-strain behavior of pipelines laid on permafrost soils. *Oil and Oil Products Pipeline Transportation: Science & Technologies*, 2(2012), 61–65, (Russian Federation).
- [5] Kotlyarevsky V.A., Calculation of deformations of pipelines in thawing halos by means of adaptation of regulatory requirements. The electronic scientific journal «Oil and Gas Business», 3(2013), 206–216, (Russian Federation).
- [6] Sivtceva A.S., Research of the stressed-deformed state of underground pipelines in the conditions of permafrost soils with use of the program complex Spire. *Pipeline transport: Theory and Practice*, 4(2007), 32–35, (Russian Federation).
- [7] Emelianov N.V., Pustovoyt G.P., Khrustalev L.N., Yakovlev S.V., The calculation program of thermal interaction of engineering constructions with permafrost soils. Certificate No. 940281; RosAPO Publ., 1994, (Russian Federation).
- [8] The program complex for thermotechnical calculations FROST 3D UNIVERSAL. Electronic resource. Available at: <http://www.simmakers.ru/frost-3d> (accessed: 30.01.2014).
- [9] Dazhenka T. A., Gishkeluk I. A. Consistency of the Douglas – Rachford splitting algorithm for the sum of three nonlinear operators: application to the Stefan problem in permafrost soils / Applied and Computational Mathematics. 2013. Vol. 2. Issue 4. Pp. 100–108, (Russian Federation).
- [10] Kurtener D.A., Chudnovsky A.F., Calculation and regulation of the thermal mode in the open and protected soil. L.: Gidrometeoizdat Publ., 1969, 299 p.
- [11] Kutateladze S.S., Heat transfer and hydrodynamic resistance. Guidance. M.: Energoatomizdat Publ., 1990, 367 p., (Russian Federation).