

УДК 624.139:536.2

ТЕМПЕРАТУРНОЕ ПОЛЕ МАССИВА МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ГРУНТОВ ПОД ВЛИЯНИЕМ МАГИСТРАЛЬНОГО ГАЗОПРОВОДА

¹**Рожин И.И., ²Ефимов В.М., ³Степанов А.В., ³Степанов А.А.**

¹*Институт проблем нефти и газа ФГБУН ФИЦ «Якутский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук», Якутск, e-mail: rozhin@ipng.ysn.ru;*

²*АО «Якутский проектный научно-исследовательский институт строительства», Якутск, e-mail: efimov_vm@mail.ru;*

³*Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова*

ФГБУН ФИЦ «Якутский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук», Якутск, e-mail: stepanov-a.a@mail.ru

В работе моделируется температурное поле массива грунтов вблизи загубленного магистрального газопровода. Целью теплового расчета является изучение влияния его теплоизоляции на грунты и определение времени формирования предельного радиуса растепления грунтов вокруг газопровода. Теплообмен газопровода с окружающим массивом грунтов исследуется с учетом ряда сезонных факторов, оказывающих на него влияние, таких как солнечная радиация и албедо поверхности, снежный покров, характеристики атмосферного воздуха, а также при циклических изменениях температуры транспортируемого газа. Температуры транспортируемого газа, соответствующие выбранному участку газопровода, приняты на основании тепловых расчетов газопровода. Переменные значения температур обусловлены увеличением подачи газа в магистральный газопровод в разные сроки его эксплуатации. Методом исследования является математическое моделирование. На основании результатов вычислительного эксперимента были определены ореолы протавивания-промерзания и температуры грунтов оснований на выбранном участке магистрального газопровода. Данная информация необходима для прогнозирования устойчивости грунтового основания, а следовательно, и безопасной эксплуатации газопровода. На основании полученных данных могут быть приняты технические решения (тип прокладки магистрального газопровода), обеспечивающие его надежность в процессе эксплуатации. Рассмотрены мероприятия по инженерной защите газопровода.

Ключевые слова: газопровод, тепловой расчет, теплообмен, математическая модель, температурное поле, многолетнемерзлый грунт, теплоизоляция

TEMPERATURE FIELD OF THE PERMAFROST SOILS UNDER THE EFFECT OF A GAS PIPELINE

¹**Rozhin I.I., ²Efimov V.M., ³Stepanov A.V., ³Stepanov A.A.**

¹*Institute of Oil and Gas Problems, FRC “Yakutsk Science Center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences”, Yakutsk, e-mail: rozhin@ipng.ysn.ru;*

²*JSC Yakutsk Design Research Institute of Construction, Yakutsk, e-mail: efimov_vm@mail.ru;*

³*V.P. Larionov Institute of Physical and Technical Problems of the North,*

*FRC “Yakutsk Science Center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences”,
Yakutsk, e-mail: stepanov-a.a@mail.ru*

The paper considers the model of a temperature field of a soil mass around a buried gas pipeline. The purpose of thermal calculation is to study the effect of its thermal insulation on soils and determine the time of formation of the limiting radius of soil thawing around the gas pipeline. The heat exchange of the gas pipeline with the surrounding soils is investigated taking into account a number of seasonal factors affecting it, such as solar radiation and surface albedo, snow cover, atmospheric air characteristics, as well as cyclic changes in the temperature of the transported gas. The temperatures of the transported gas, corresponding to the selected section of the gas pipeline, are taken on the basis of thermal calculations of the gas pipeline. Variable temperatures are due to an increase in gas supply to the main gas pipeline at different periods of its operation. The research method is mathematical modeling. Based on the results of the computational experiment, the thawing-freezing halos and the temperatures of the base soils on the selected section of the main gas pipeline were determined. This information is necessary to predict the stability of the soil base, and hence the safe operation of the gas pipeline. Based on the data obtained, technical solutions can be made (the type of laying of the main gas pipeline) that can ensure its reliability during operation. Measures for the engineering protection of the gas pipeline are considered.

Keywords: газопровод, тепловой расчет, теплообмен, математическая модель, температурное поле, перmafrost soil, heat insulation

Процесс естественного теплообмена многолетнемерзлых грунтов с окружающей средой нарушается при промышленном освоении участка местности. Вследствие

вмешательства меняются характеристики снежного и растительного покровов, гидрогеологический режим грунтов, изменяется влажность и т.д. Все это влечет за со-

бой изменение температурного режима, что проявляется в виде таких отрицательных для устойчивости оснований промышленных объектов факторов, как изменение величины и динамики образования ореолов промерзания-оттаивания.

Таким образом, при строительстве и эксплуатации объектов на многолетнемерзлых грунтах требуется учитывать инженерно-геокриологические условия участка местности, как до вмешательства, так и в ходе изменения первоначальных условий в результате техногенного воздействия. Для исключения негативных последствий, вызванных такими изменениями, необходимо проведение специальных мероприятий для сохранения мерзлых пород, обеспечивающих устойчивость сооружений [1, 2].

Известно [1], что температура поверхности грунта в зимние и летние месяцы выше температуры окружающего воздуха, а весной и осенью близка к ней. Зимой снежный покров ухудшает теплообмен с окружающей средой, в то время как летом верхняя часть грунта нагревается солнечными лучами, при этом повышение альbedo поверхности вызывает снижение ее температуры.

Рассмотрим участок газопровода, который характеризуется высокой влажностью (льдистостью) рыхлых грунтов, преимущественно супесчаного состава с высоким содержанием щебня или дресвы мощностью до 4 м, высокой сжимаемостью при оттаивании и повышенной пучинностью. Весьма вероятным на этих участках является проявление процессов наледеобразования.

Материалы и методы исследования

Математическая постановка задачи динамики двумерного температурного поля в грунтовом массиве выполнена на основе общей постановки задач типа Стефана. Процесс теплообмена массива грунтов с газопроводом и наружным окружающим воздухом описывается дифференциальным уравнением теплопроводности, описывающим распространение тепла в водонасыщенном грунте с учетом фазового перехода «вода – лед». При этом задача теплопроводности с фазовым переходом формулируется как обычная краевая задача для квазилинейного параболического уравнения с разрывными коэффициентами [3]. В разработанной математической модели двумерного разреза массива грунтов учитываются: изменения температур атмосферного воздуха и транспортируемого газа со временем, воздействия суммарной солнечной

радиации и альbedo дневной поверхности, изменения толщины и теплофизических свойств снежного покрова и изменение коэффициента теплоотдачи от атмосферного воздуха в зависимости от скорости ветра. Поставленная задача решается методом конечных разностей с использованием продольно-поперечной схемы (суммарной аппроксимации) [4]. При этом исходное двумерное уравнение расщепляется на уравнения с весами, которые решаются методом сквозного счета со слаженными функциями коэффициентов теплопроводности и объемной теплоемкости. Таким образом, эффективный расчет двумерной задачи строится на основе метода расщепления по пространственным координатам с использованием схемы переменных направлений [5] и с привлечением для обеспечения устойчивости получающихся одномерных задач, неявных методов на основе прогоночных алгоритмов.

Результаты исследования и их обсуждение

При расчете ореолов оттаивания для участка использовались исходные данные, приведенные в табл. 1–5. Начальное температурное поле и фазовое состояние грунтового массива принимается на основании анализа инженерно-геологических изысканий (данные термокаротажа), а также на основании результатов адаптации условий теплообмена на поверхности земли в ненарушенных условиях. Усредненные значения теплофизических свойств грунтов геологического разреза приведены в табл. 1. Данные термометрии согласно по паспорту термоскважины (табл. 2) взяты в качестве начального распределения температур массива грунтов (в середине декабря). Использованные в расчетах условия теплообмена с окружающей средой приведены в табл. 3, в которой среднемесячные значения температуры воздуха, скорости ветра, суммарной солнечной радиации и альbedo поверхности взяты по метеостанции г. Олекминск (Республика Саха (Якутия)) и адаптированы к инженерно-геокриологическим условиям для данной скважины. Значения этих величин между месяцами аппроксимируются линейной зависимостью. Температуры транспортируемого газа, соответствующие данному участку газопровода, приняты на основании тепловых расчетов газопровода и приведены в табл. 4. В табл. 5 приведены ежедекадные средние данные толщины и плотности снежного покрова.

Таблица 1

Теплофизические характеристики грунтов инженерно-геологического разреза

Интервал, м	Грунты	Плотность сухого грунта, кг/м ³	Суммарная влажность, д.е.	Коэффициент теплопроводности грунта, Вт/(м·°C)		Объемная теплоемкость грунта, МДж/(м ³ ·°C)		Температура начала замерзания, °C
				талого	мерзлого	талого	мерзлого	
0–0,1	Почвенно-растительный слой	—	—	—	—	—	—	—
0,1–5,7	Супесь твердомерзлая	1386	0,234	1,668	2,416	2,501	1,853	-0,15
5,7–7,3	Супесь гравелистая	1705	0,135	1,945	2,505	2,415	1,968	-0,15
7,3...	Доломит низкой прочности	1630	0,150	1,56	1,95	2,405	1,926	-0,2

Таблица 2

Натурные данные температур по глубине массива грунтов в середине декабря

z, м	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
T, °C	-3,14	-0,06	-0,25	-0,40	-0,48	-0,61	-0,71	-0,72	-0,70	-0,90

Таблица 3

Климатические параметры по метеостанции Олекминск

Месяц	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Температура воздуха, °C	-31,6	-27,2	-15,6	-3,4	7,0	14,9	18,2	14,5	6,0	-5,3	-21,1	-29,6
Скорость ветра, м/с	2,0	2,2	2,6	3,1	3,1	2,4	2,2	2,2	2,4	2,6	2,3	2,0
Суммарная солнечная радиация, Вт/м ²	23,47	62,35	136,10	203,68	226,83	242,48	215,88	153,31	108,31	67,27	29,10	14,08
Альбедо поверхности	0,78	0,78	0,78	0,76	0,40	0,16	0,18	0,20	0,28	0,70	0,78	0,76

Таблица 4

Температуры транспортируемого газа

Год эксплуатации	Месяц											
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
1	-0,62	-1,44	-2,07	-2,10	-1,37	-0,84	1,15	4,06	4,61	2,78	0,87	-0,01
2	-0,34	-1,06	-1,77	-2,20	-1,62	-0,97	1,30	4,19	4,53	2,64	0,80	0,13
3	10,8	10,7	10,8	10,6	10,3	10,4	20,5	14,9	12,5	12,1	11,8	11,5
4	10,9	10,8	10,7	11,1	11,5	11,9	23,8	16,7	12,8	12,2	11,9	12,1
5	11,3	11,2	11,0	11,2	11,6	14,2	25,6	17,8	12,7	12,4	12,0	12,2
6–30	10,6	10,5	10,4	10,8	11,2	12,9	25,0	16,7	12,5	11,4	10,8	10,7

Таблица 5

Высота δ_{ch} (см) и средняя плотность снежного покрова ρ_{ch} ($\text{г}/\text{см}^3$) по декадам

Параметры	Октябрь			Ноябрь			Декабрь			Январь		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
δ_{ch} , см	—	2	4	8	12	15	18	21	23	25	27	30
ρ_{ch} , $\text{г}/\text{см}^3$	—	0,10	0,11	0,12	0,12	0,14	0,15	0,15	0,15	0,16	0,16	0,16
Параметры	Февраль			Март			Апрель			Май		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
δ_{ch} , см	31	32	33	33	34	33	31	25	12	1	—	—
ρ_{ch} , $\text{г}/\text{см}^3$	0,16	0,16	0,17	0,18	0,18	0,19	0,22	0,20	0,12	0,10	—	—

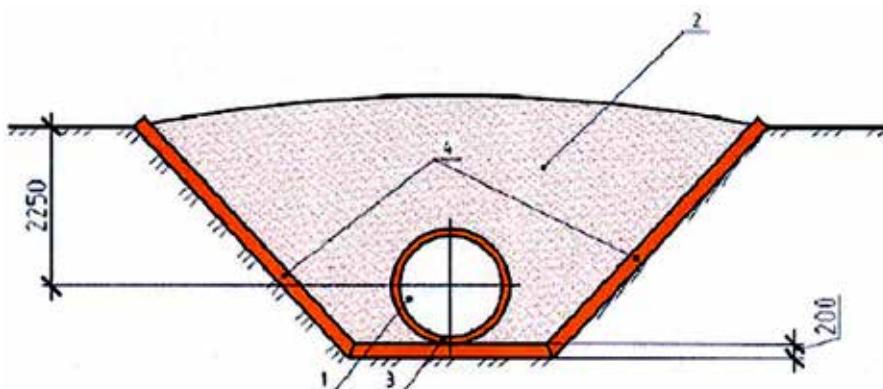


Рис. 1. Схема прокладки газопровода: 1 – труба диаметром Ø1420 мм; 2 – грунт обратной засыпки; 3 – кольцевая теплоизоляция толщиной 100–200 мм; 4 – теплоизоляция траншеи толщиной 100–200 мм

Коэффициенты теплообмена для транспортируемого газа приняты равными: для газопровода без теплоизоляции – 300 Вт/($\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}$); для газопровода с теплоизоляцией толщиной 100 мм – 0,29 Вт/($\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}$); для газопровода с теплоизоляцией толщиной 200 мм – 0,145 Вт/($\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}$).

При отсутствии снежного покрова увеличивается эффективное излучение с поверхности земли и интенсивность теплообмена с наружным холодным воздухом возрастает, так как снежный покров в октябре – феврале препятствует проникновению холода в массив, а в марте – апреле – отводу холода из грунта.

В расчетах температурного поля и чаши оттаивания были рассмотрены следующие варианты:

- 1) без применения теплоизоляции;
- 2) кольцевая теплоизоляция на газопроводе (Ду1400) толщиной 100 мм;
- 3) кольцевая теплоизоляция на газопроводе (Ду1400) толщиной 200 мм;
- 4) кольцевая теплоизоляция на газопроводе (Ду1400) толщиной 200 мм и теплоизо-

ляция траншеи толщиной 200 мм по боковым граням и по нижней грани (рис. 1).

Значения величины оттаивания под газопроводом в его основании сведены в табл. 6.

Приведенные далее рис. 2–5 иллюстрируют температурные поля массива грунтов вокруг газопровода, полученные по результатам расчетов для каждого из четырех вариантов. На рисунках каждой изотерме составлено число, показывающее значение температуры. Координата u соответствует расстоянию по горизонтали, а координата z – по глубине массива грунтов. Температурные поля, представленные на рисунках, соответствуют одному моменту времени – середине октября. На всех рисунках полукругом показано месторасположение газопровода на глубине массива грунтов – от 1 до 2,4 м. Фронт фазового перехода с температурой $-0,15$ $^\circ\text{C}$ при малых временах эксплуатации газопровода (до 10 лет) практически совпадает с нулевой изотермой.

Участок заболоченный, сильнольдистый. При этом коренная порода – гнейс (3,5–15 м) считается несжимаемой (табл. 7).

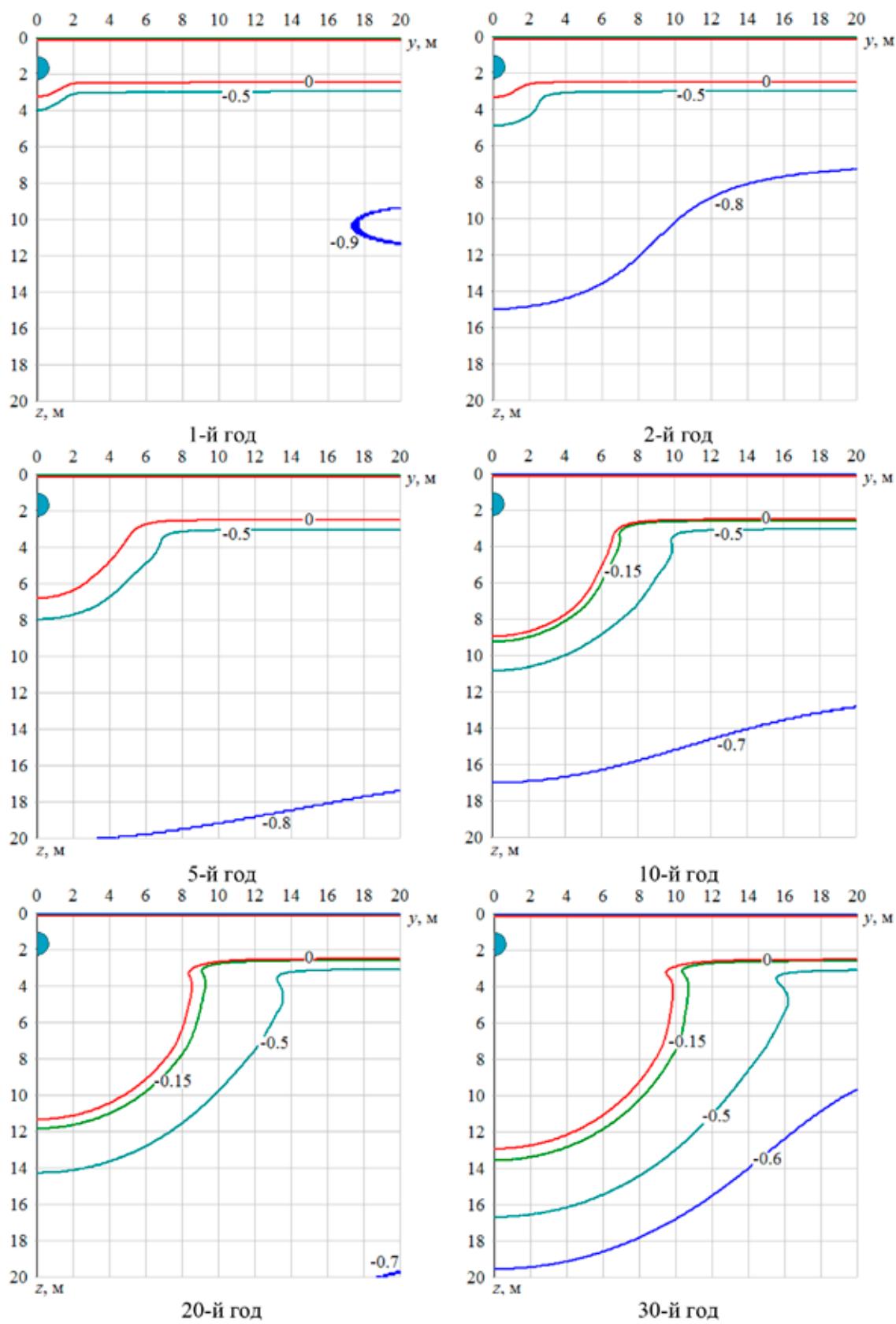


Рис. 2. Конфигурации изотерм в различные моменты времени эксплуатации газопровода для варианта 1

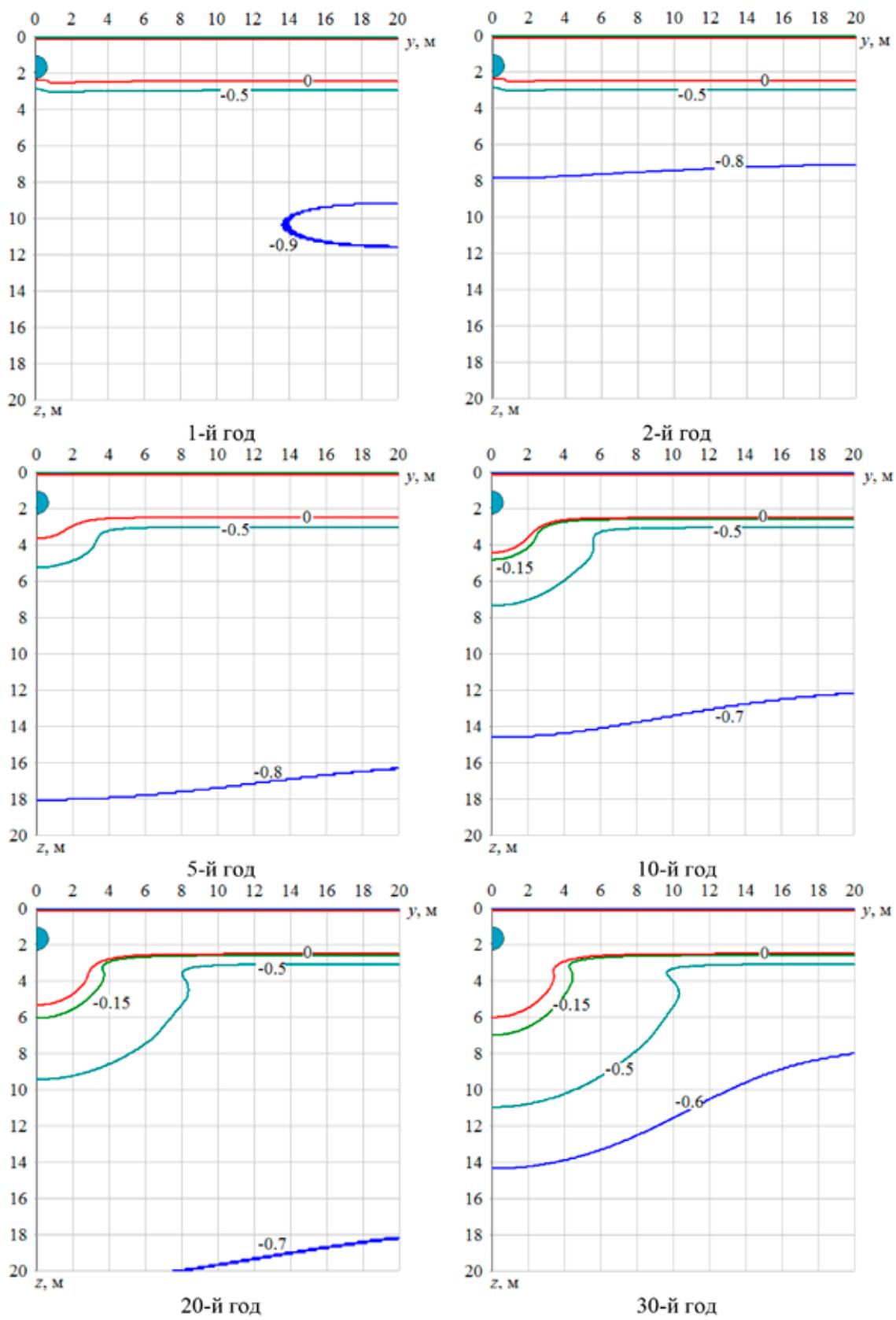


Рис. 3. Конфигурации изотерм в различные моменты времени эксплуатации газопровода для варианта 2

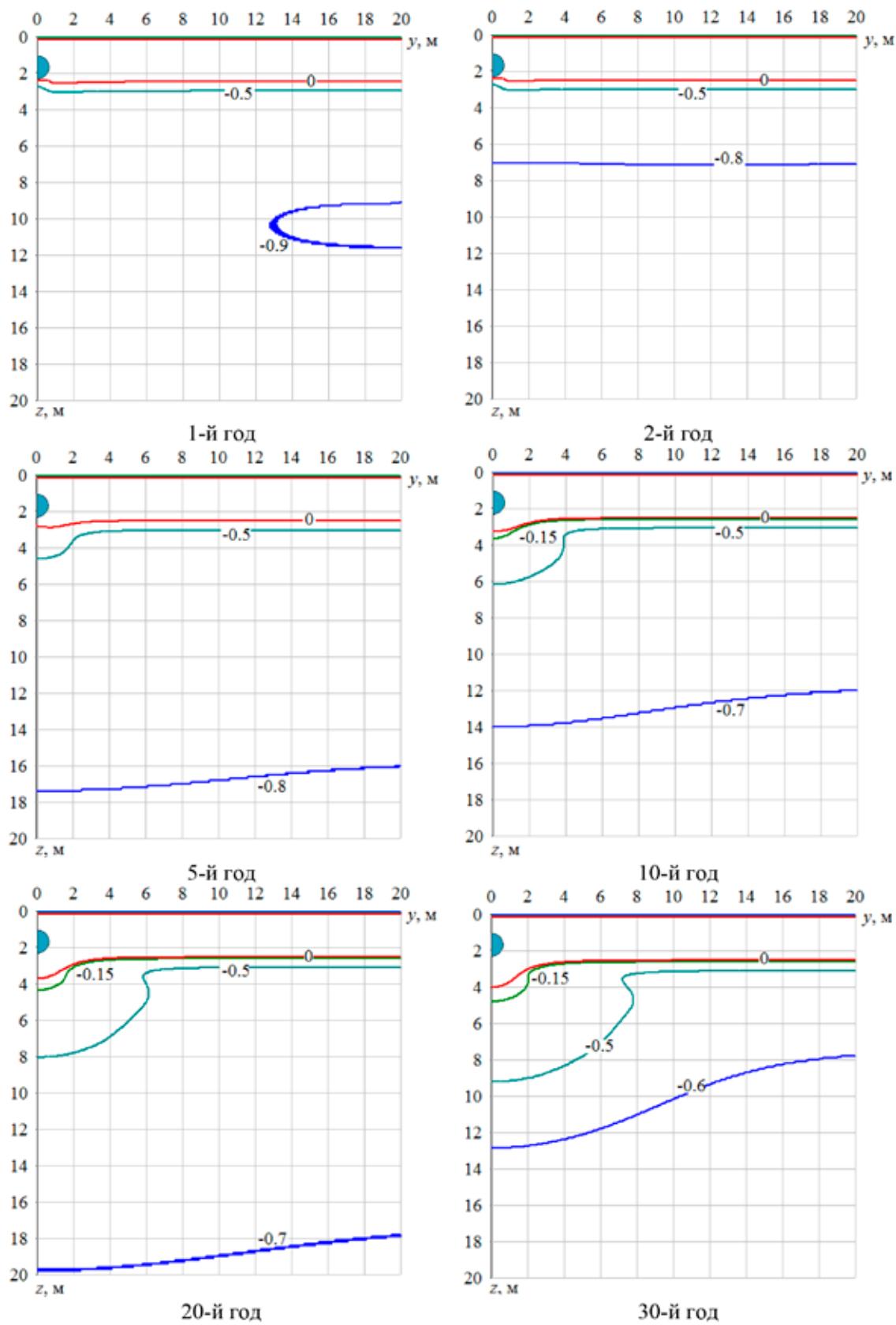


Рис. 4. Конфигурации изотерм в различные моменты времени эксплуатации газопровода для варианта 3

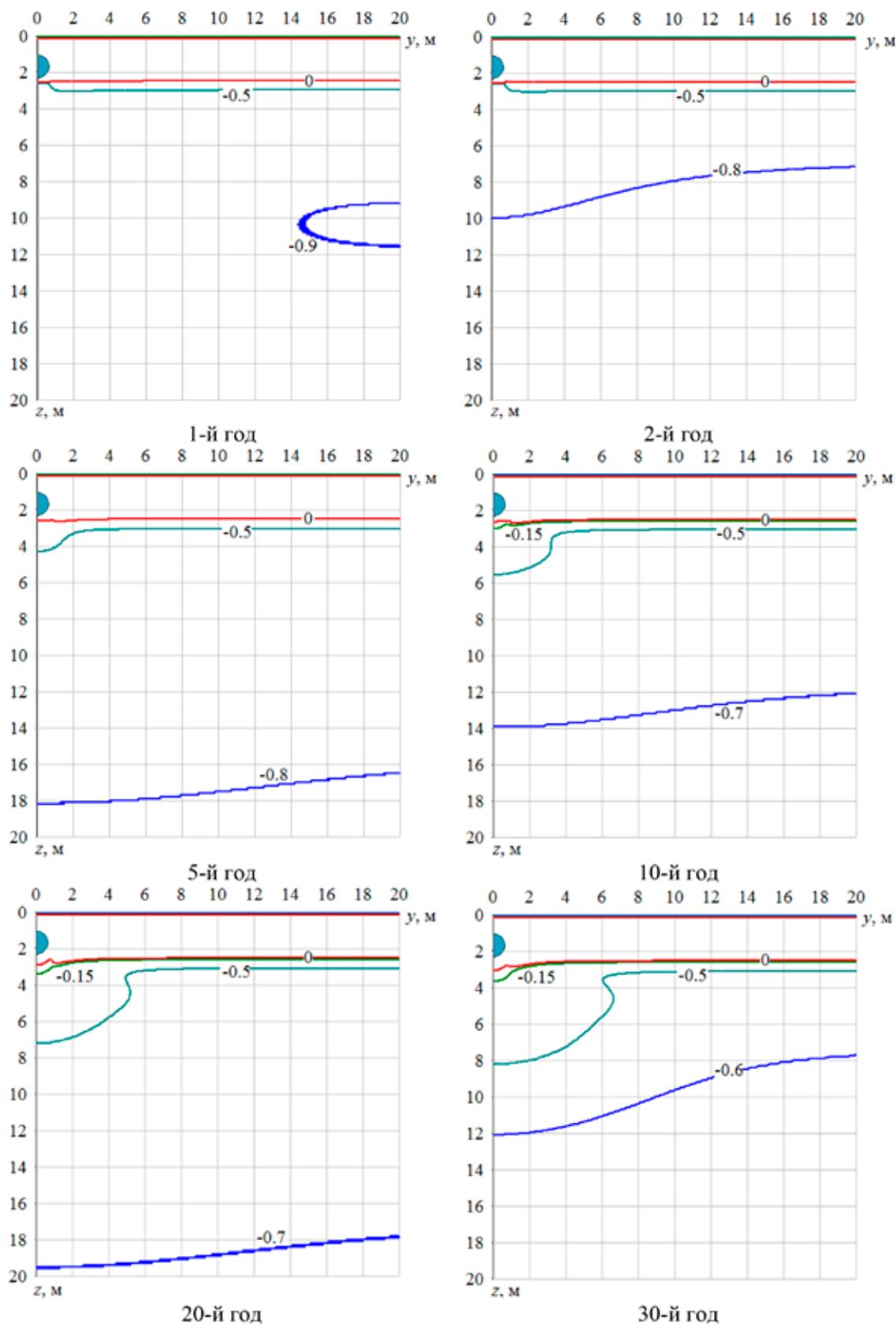


Рис. 5. Конфигурации изотерм в различные моменты времени эксплуатации газопровода для варианта 4

Таблица 6

Величина оттаивания грунтов основания под нижней образующей трубы
в середине октября, м

Год эксплуатации	Вариант 1	Вариант 2	Вариант 3	Вариант 4	Вариант 5	Вариант 6
1	0,91	—	—	—	—	—
2	1,04	—	—	—	—	—
3	2,68	0,57	0,07	—	—	—
5	4,57	1,45	0,63	0,08	0,36	—
10	7,00	2,43	1,25	0,42	0,81	0,28
20	9,64	3,59	1,94	0,79	1,35	0,70
30	11,41	4,60	2,40	1,05	1,73	0,97

Таблица 7

Физико-механические характеристики горных пород участка моделирования

Глубина, м	Грунты по изысканиям	Плотность грунта, кг/м ³	Плотность частиц, кг/м ³	Суммарная влажность, д.е.	Коэффициент оттаивания	Коэффициент сжимаемости Мпа ⁻¹
0,0–0,5	Почвенно-растительный слой Торф	150	1250	5,8	0,694	—
0,5–2,7	Супесь	1410	2630	0,28	0,075	0,0
2,7–3,5	Супесь	1220	2660	0,35	0,07	0,0397
3,5–10	Гнейс	1830	2730	0,09	—	—

Моделируемый участок расположен в зоне островного развития многолетнемерзлых пород и сложен вечномерзлыми грунтами.

В теплое время года возможно формирование подземных вод вида «верховодка», т.е. вод, которые находятся на незначительной глубине над водоупорными слоями. При этом водоупором для них в этом случае будут выступать многолетнемерзлые грунты. Атмосферные осадки и сезонное оттаивание грунтов будут вносить основной вклад в подпитку подземных вод [6].

Заключение

Основываясь на результатах проведенных расчетов, можно привести следующие рекомендации по обустройству заглубленного газопровода:

– как наиболее неблагоприятный вариант для расчета основания фундаментов следует рассмотреть наибольшую глубину оттаивания под газопроводом;

– при глубине заложения газопровода в 1 м из-за циклического изменения внешнего воздействия на дневной поверхности скорость движения фазового фронта меньше, и тем самым время формирования предельного радиуса растепления грунтов вокруг газопровода будет больше.

Для обеспечения устойчивости газопровода предлагаются следующие мероприятия по его инженерной защите:

– теплоизоляция трубопровода, днища и стенок траншеи толщиной слоя эффективного утеплителя в 200 мм, обеспечивающего резкое снижение глубины оттаивания грунтов в основании газопровода;

– проходка траншеи под трубопровод осуществляется до водоупора, т.е. до кровли скальных грунтов, траншея заполняется непучинистым грунтом (песчано-гравийная смесь или крупнозернистый песок) на всю ее глубину; для снятия криогенного напора в случае прорыва грунтовых вод

с окружающего траншею водонасыщенного массива закладываются на всю глубину траншеи трубчатые фильтры в виде перфорированных труб диаметром до 219 мм (шаг установки фильтров порядка 6 м).

Список литературы

1. Кондратьев В.Г., Перекупка А.Г., Примаков С.С., Петрова А.С. Мероприятия по изменению режима теплообмена на поверхности земли и их влияние на распределение температуры в грунте // Нефтяное хозяйство. 2012. № 10. С. 122–125.
2. Фельдман Г.М. Методы расчета температурного режима мерзлых грунтов. М.: Наука, 1973. 254 с.
3. Степанов А.В., Попенко Ф.Е., Рожин И.И. Основы инженерной защиты объектов строительства в криолитозоне. Новосибирск: Наука, 2014. 448 с.
4. Крайнов А.Ю., Миньков Л.Л. Численные методы решения задач тепло- и массопереноса. Томск: СТТ, 2016. 92 с.
5. Ковеня В.М. Алгоритмы расщепления при решении многомерных задач аэрогидродинамики. Новосибирск: Издательство СО РАН, 2014. 280 с.
6. Тукмакова О.В., Жданова С.М., Нератова О.А. Отвод поверхностных и грунтовых вод на многолетнемерзлых грунтах // Путь и путевое хозяйство. 2019. № 4. С. 13–16.