

Изучение влияния работы газовых скважин в условиях вечной мерзлоты на границы зон растепления грунта

К.Ю. Литвинцев (ООО «ТОРИНС»)

А.В. Минаков (Сибирский Федеральный Университет)

Одна из проблем связанная с добычей природного газа в Заполярье, это неустойчивость грунтов, на которых располагаются добывающие платформы. Поэтому для правильной организации мест добычи природного газа необходимо знать области растепления грунта (где температура выше температуры плавления льда). Авторами статьи была проведена работа по исследованию влияния работы газовых скважин на образования зон растепления в монолетне-мерзлой породе (ММП) и кустовых газовых площадках. В ходе исследования рассмотрены штатный и аварийный (пожар) режим работы скважины.

В штатном режиме для расчета границы зоны растления вокруг газовой скважины решалось уравнение нестационарной теплопроводности [1] с учетом фазового перехода лед-вода и свойств грунта [2] и теплоизоляционной прокладки (рис. 1а).

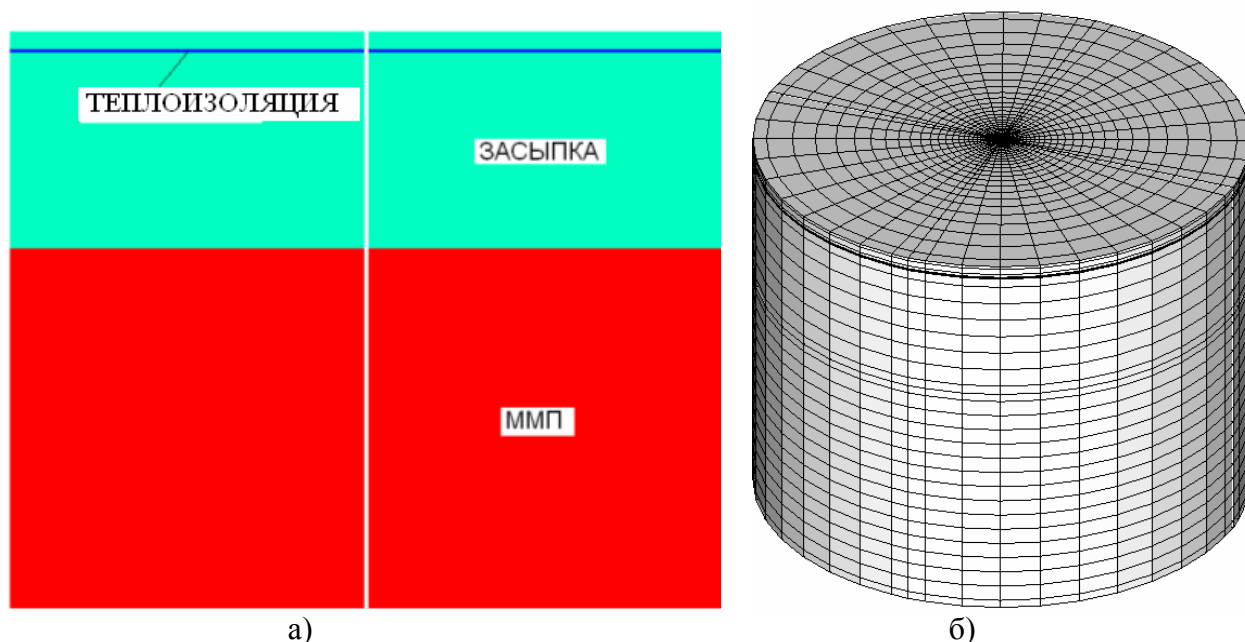


Рис.1. Постановка задачи.
а) структура грунта; б) расчетная сетка.

Расчетная область представляет собой кольцо с внешним радиусом 10м, внутренним – 0,07м (диаметр скважины равен 140мм) и высотой 16м (рис. 1б). Для расчета использовалась многоблочная сетка состоящая из 36000 контрольных объемов.

Рассматривались пять вариантов условий работы газовой скважины; «зимний», «летний», «летний» с низкой льдистостью засыпки и «летний» с двумя видами теплоизоляции скважины (табл. 1). Для каждого варианта длительность работы скважины составляла 100 суток.

Таблица 1. Варианты расчетов при работе скважины в штатном режиме

Вариант расчета	температура на поверхности грунта, °С	начальная температура грунта, °С	температура газа в скважине, °С	Условия теплопередачи от газа к грунту	льדיстость засыпки, %
«зимний»	-20	-6	30	изотерма	30
«летний»	+20	-2	30	изотерма	30
«летний» с низкой льдистостью засыпки	+20	-2	30	изотерма	10
«летний» с теплоизоляцией скважины	+20	-2	30	$\alpha = 3,5 \text{ Вт/м}^2\text{К}$	30
«летний» с применением теплоизолированной направляющей колонны	+20	-2	30	расчет	30

Анализ результатов численного моделирования показал, что область растепления, образующаяся при штатном режиме добычи газа, в течении 100 суток, вокруг скважины не превышает радиуса 2,5м для «зимнего» варианта (рис. 3а) и 4-ех для «летнего» (рис. 3б). Для летних вариантов, глубина растепления, связанная с высокой температурой окружающей среды, за это время, достигает 3,8м (рис. 2).

При уменьшении уровня льдистости засыпки с 30% до 10% происходит небольшое увеличение области растепления (рис.3в). Использование теплоизоляции сокращает ее в два раза (рис. 3г). Установка теплоизолированной направляющей колонны, еще больше уменьшает зону растепления – до 1,5м летом.

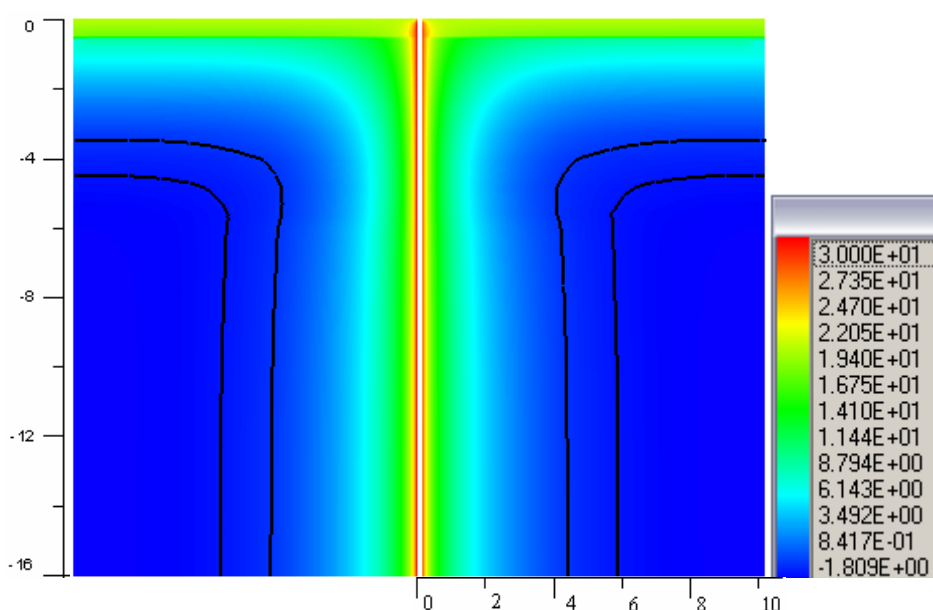


Рис. 2. Поле в вертикальном сечении. «Летний» вариант. 100 дней (изолинии температуры (0 °С, -1 °С)).

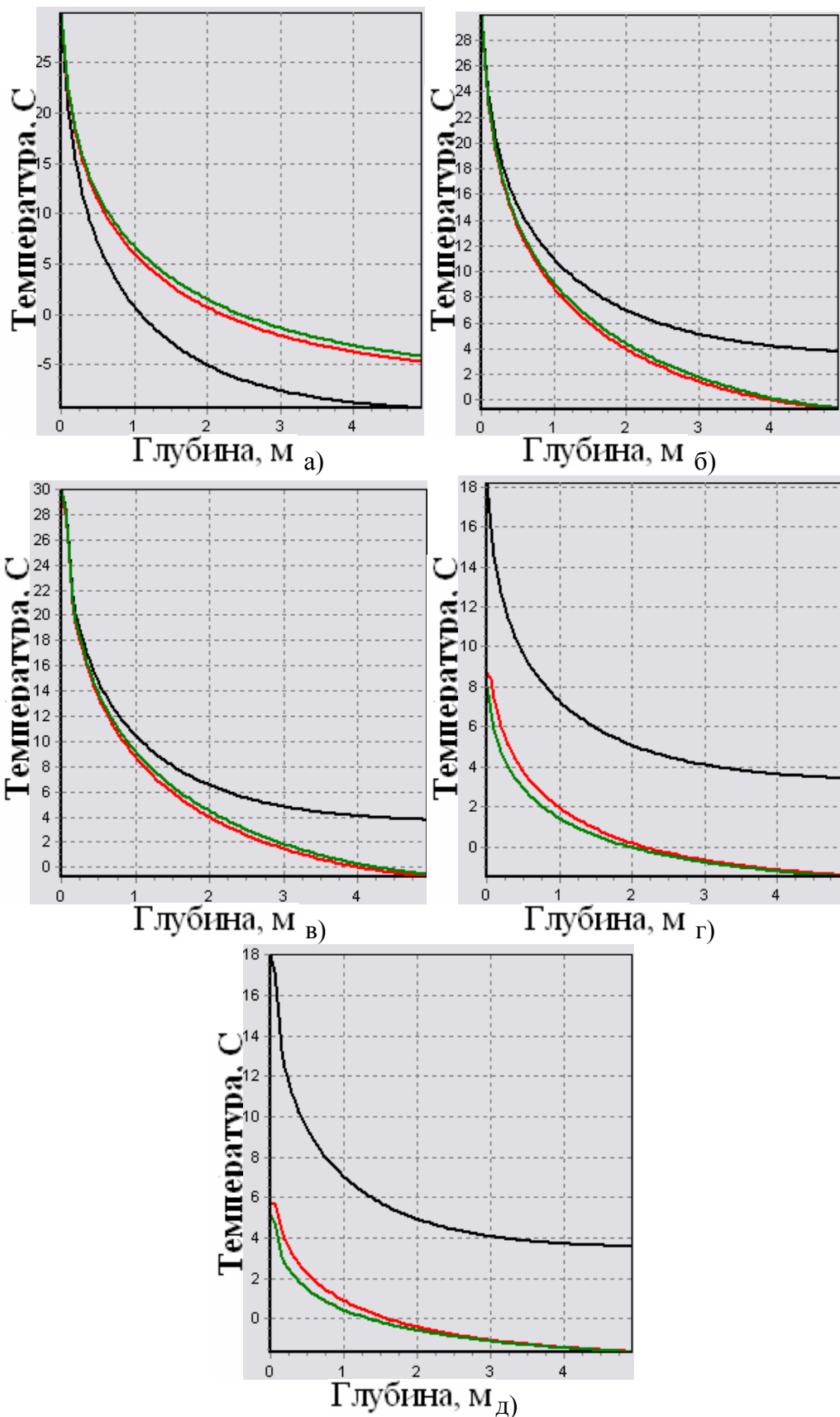


Рис. 3. Графики прогрева грунта вокруг скважины на различной глубине (черная – 2м, красная – 6м, зеленая – 10м). 100 дней.

а) «Зимний» вариант; б) «Летний» вариант; в) «Летний» вариант с льдистостью 10%; г) «Летний» вариант с теплоизоляцией; д) «Летний» вариант с теплоизолированной направляющей колонной.

Для исследования влияния пожара на формирование зоны растепления была изменена расчетная область, которая теперь представляет прямоугольник с основанием $100\text{м} \times 100\text{м}$ и высотой 40м (ММП) с располагающейся на ней засыпкой различной высоты от 1.5м до 6м (рис. 4). Лыдность засыпки выбрана 10% , так как при этом реализуются худшие условия по растеплению и прогреву грунта.

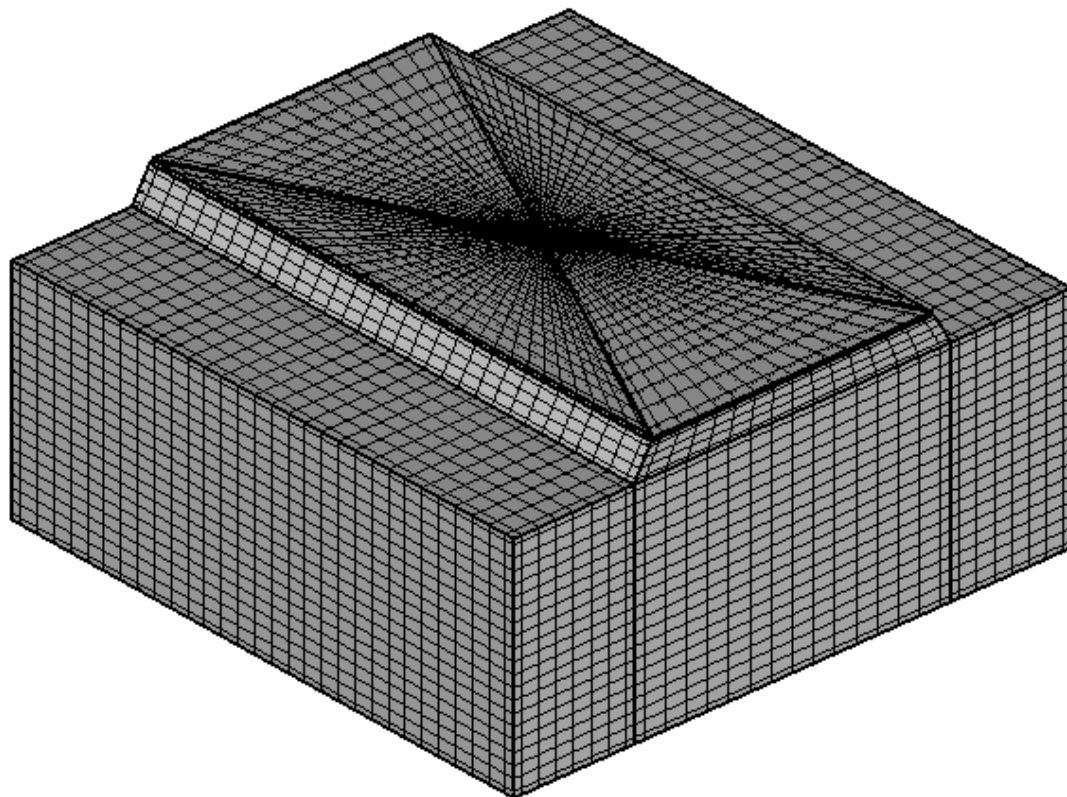
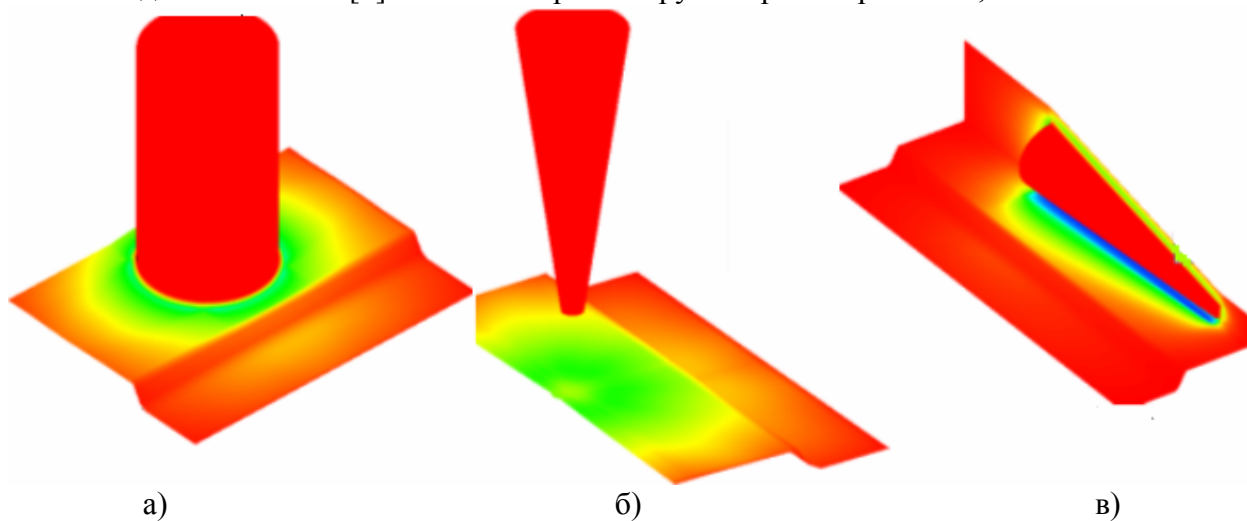


Рис. 4. Расчетная сетка для задачи теплопроводности (100000 узлов)

При расчета границы зоны растепления в аварийном режиме работы скважины сначала по эмпирическим формулам рассчитывалась форма и мощность факела для трех возможных сценариев пожара: диффузионный, вертикальный и настильный факел. Далее решалась задача радиационного теплопереноса от газового факела к поверхности земли (рис. 4). Для решения радиационной задачи использовался FVM [3] с разбиением углового пространства на 72 телесных угла. Для определения коэффициента поглощения использовалась модель RADCAL [4]. Степень черноты грунта бралась равной $0,9$.



а)

б)

в)

Рис. 5. Радиационный тепловой поток на грунт.

а) диффузионный факел; б) вертикальный факел; в) настильный факел.

Рассчитанный таким образом тепловой поток задавался в качестве граничного условия для уравнения теплопроводности в мерзлом грунте. В качестве начального распределения поля температур в грунте использовалось рассчитанное при штатном режиме работы газовой скважины для летнего и зимнего вариантов.

Для анализа процесса прогрева грунта было выбрано несколько точек мониторинга поведения температуры во времени (рис. 6, 7). Для вариантов с высотой засыпки 1,5м не рассматривалась точка мониторинга внутри засыпки.

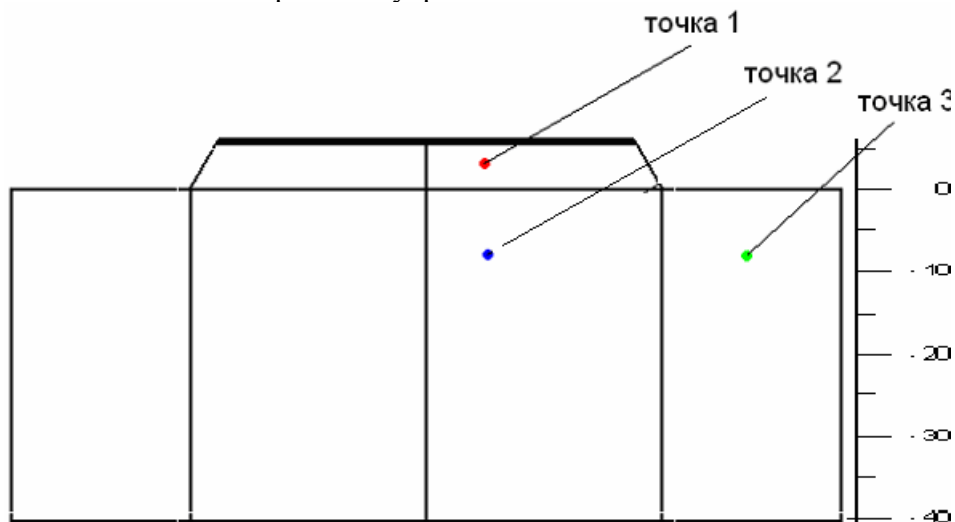


Рис. 6. Расположение точек мониторинга температуры грунта для диффузионного и вертикального факелов:

точка 1 –высота 3м, расстояние от скважины 8м; точка 2 –глубина 7м, расстояние от скважины 8м; точка 3 –глубина 7м, расстояние от скважины 40м

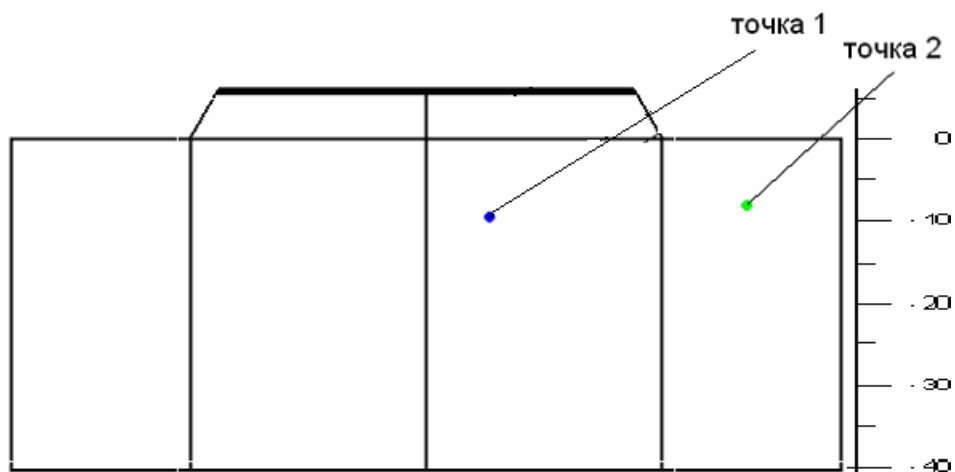


Рис. 7. Расположение точек мониторинга температуры грунта для настильного факела: точка 1 –глубина 9м, расстояние от скважины 75м вдоль оси факела; точка 2 –глубина 7м, расстояние от скважины 75м и 40м от оси факела

Наиболее опасные с точки зрения наибольшей области растепления является диффузионный факел и настильный (рис. 8, 9). Диффузионный факел оказывает сильное воздействие на область как вблизи самой скважины, так и на удалении, так в рассматриваемой области (100м×100м) растепление носит близкий к однородному характер вдоль расположения засыпки (рис. 8а). Настильный факел имеет наиболее протяженную область воздействия на грунт вдоль засыпки (рис. 9б). При вертикальном факеле уровень температур в грунте меньше, но при этом наблюдается более слабое падение температуры по мере удаления от центра факела (рис. 8в, рис 9в).

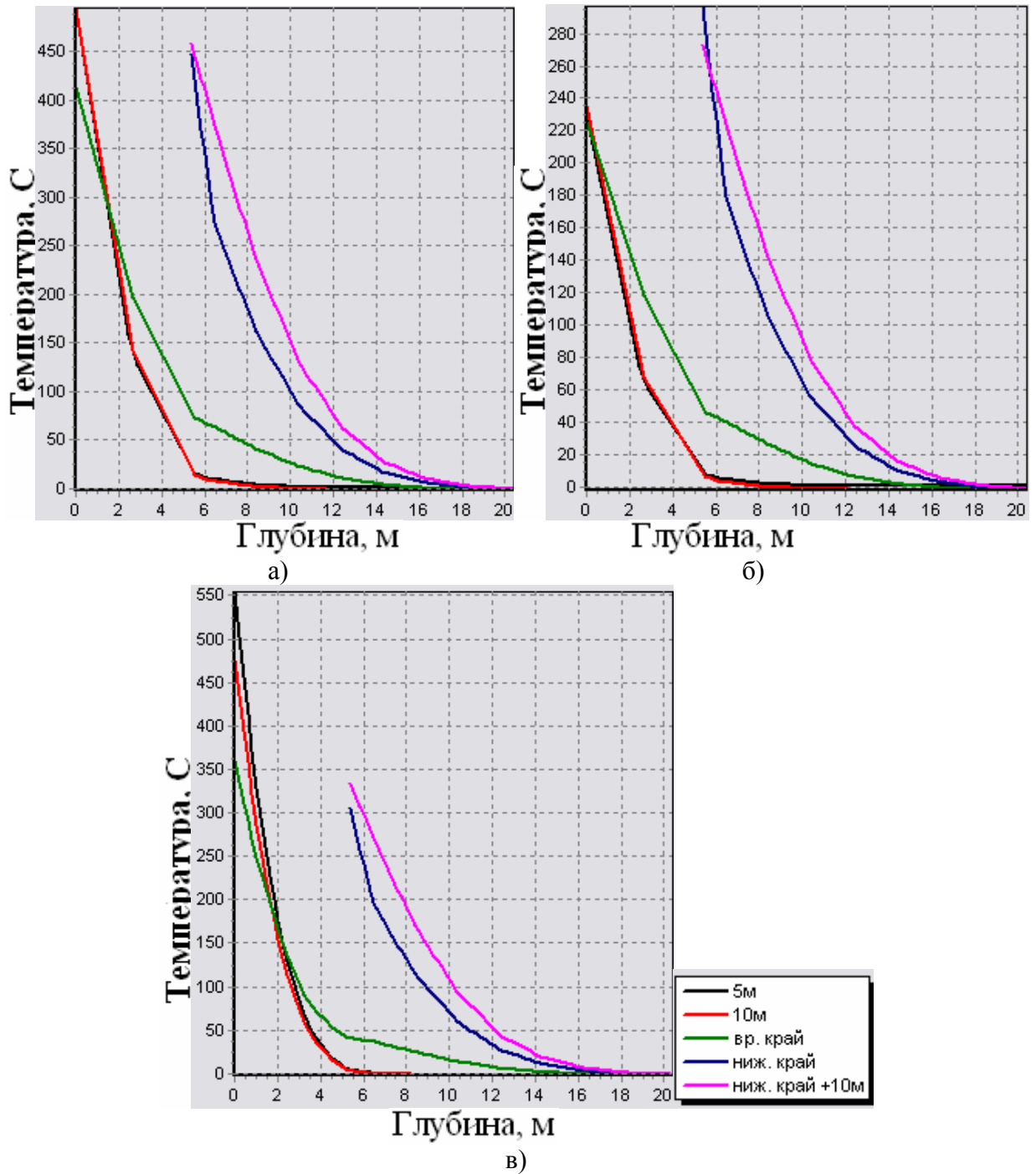


Рис. 8. Распределение температуры по глубине на различных расстояниях от скважины. Нулевой уровень на высоте 5,4м (под теплоизоляцией). Расхода природного газа 100 кг/с. Высота засыпки 6м. Лето.

а) диффузионный факел; б) вертикальный факел; в) настильный факел, сечение в области максимальных тепловых потоков.

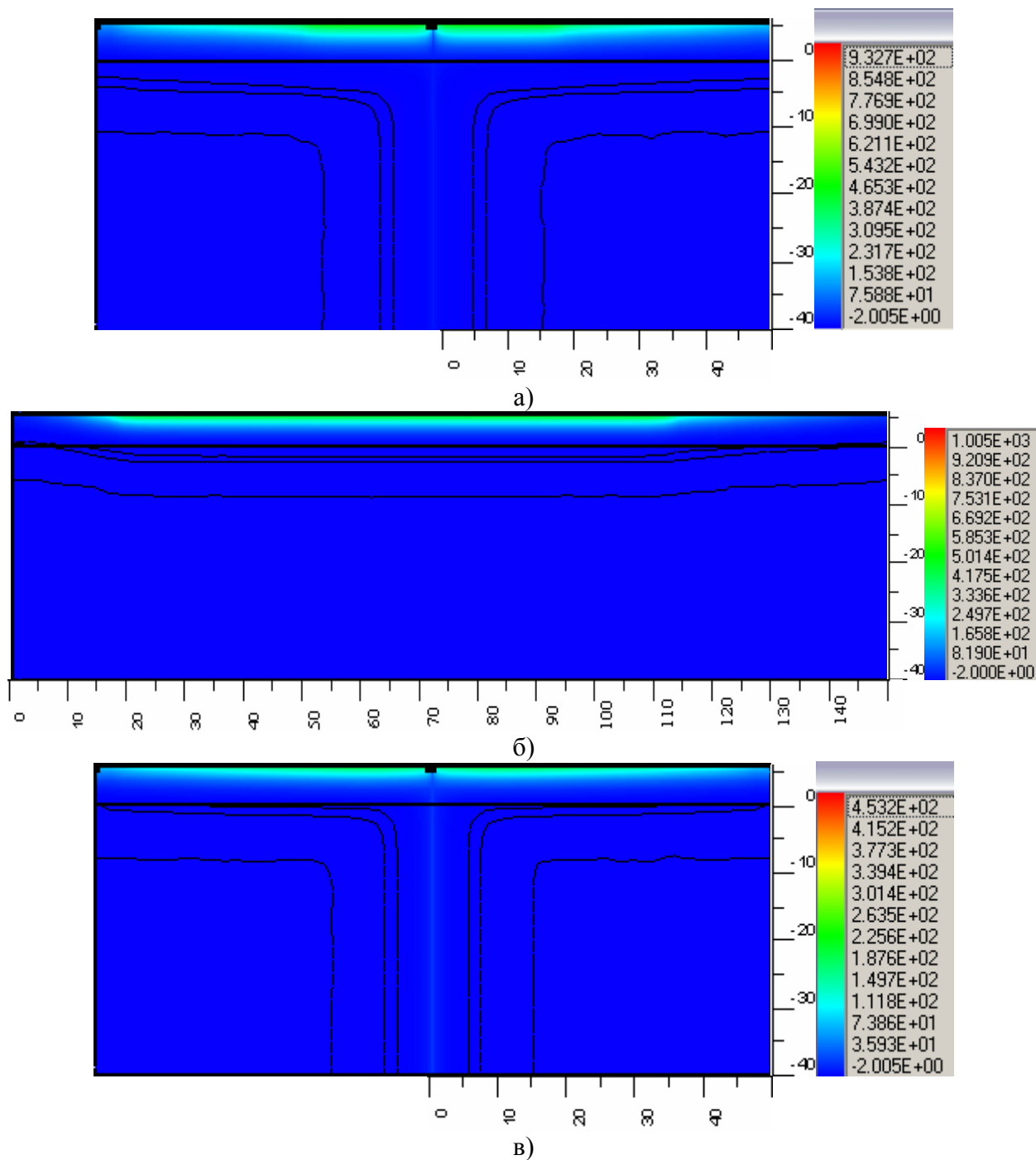


Рис.9. Поле температуры в продольном сечении. Изолинии температур 0 °С, -1 °С, -2 °С.
 Расход природного газа 100 кг/с. Высота засыпки 6м. Лето.
 а) диффузионный факел; б) настильный факел; в) вертикальный факел.

Как для наиболее опасного случая рассмотрение влияния остальных параметров задачи проводилось в основном для диффузионного факела.

При варьировании мощностью факела критическая область растепления почти не меняется, меняется главным образом градиент температуры по глубине грунта (рис. 10). Такое поведение связано с большим тепловым сопротивлением грунта, в результате которого температура на поверхности очень большая, что приводит к сильным радиационным потерям. Кроме этого тепловой поток падающий на грунт увеличивается в зависимости от расхода природного газа существенно меньше чем мощность факела.

Для настильного факела изменения области растепления более заметны. Основные отличия связаны с ее протяженностью и глубиной на удалении от засыпки, так как при

настильном факеле более сильную роль играет затенение связанное с возвышением засыпки над ММП. Но глубина зоны растепления под засыпкой при расходе газа в 10 и 100 кг/с остаются близкими (рис. 11).

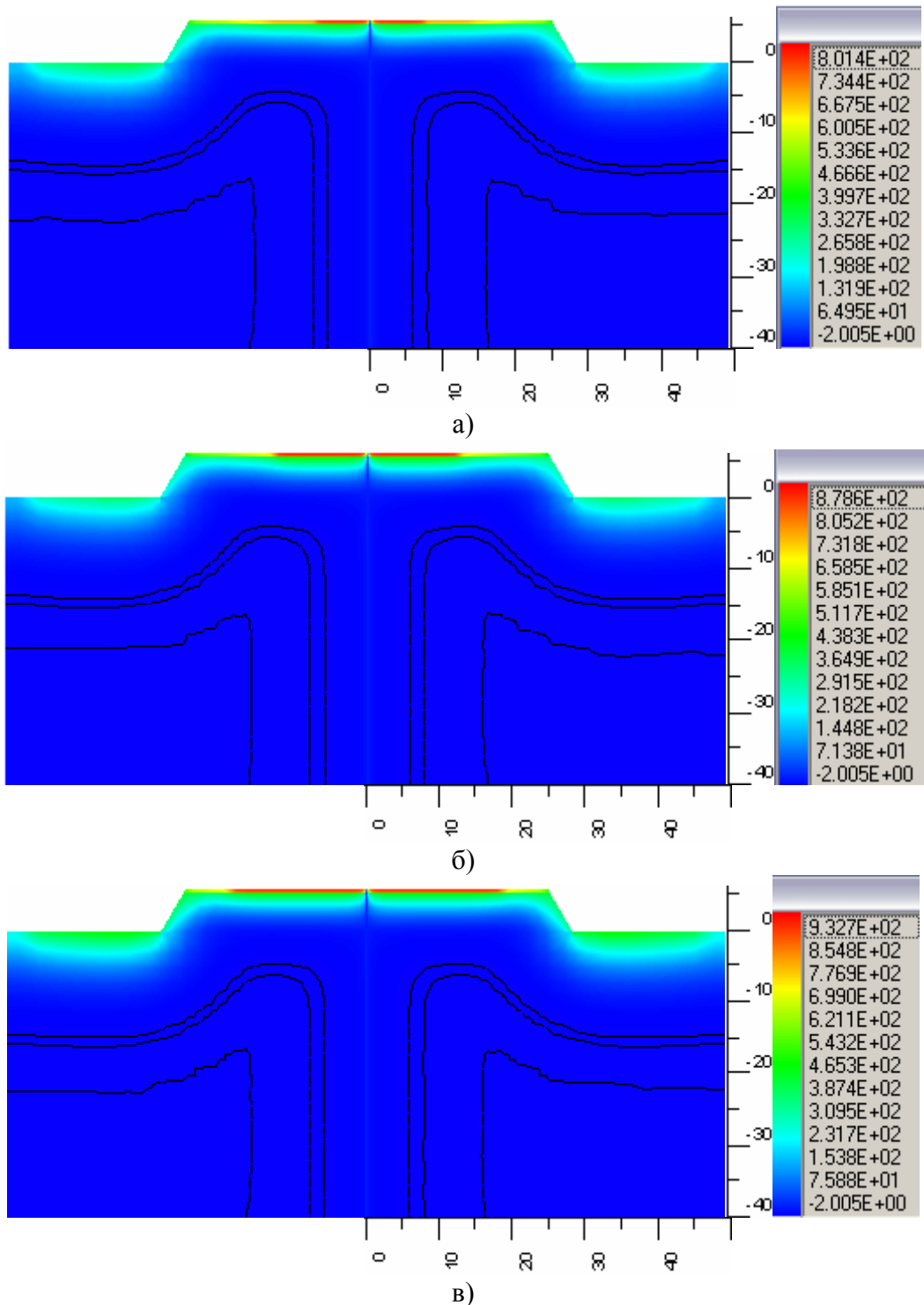


Рис. 10. Поле температуры в поперечном сечении. Изолинии температур 0 °C, -1 °C, -2 °C. Диффузионный факел для различных расходов природного газа. Высота засыпки 6м. Лето. 100 суток.

а) 10 кг/с; б) 40 кг/с; в) 100 кг/с.

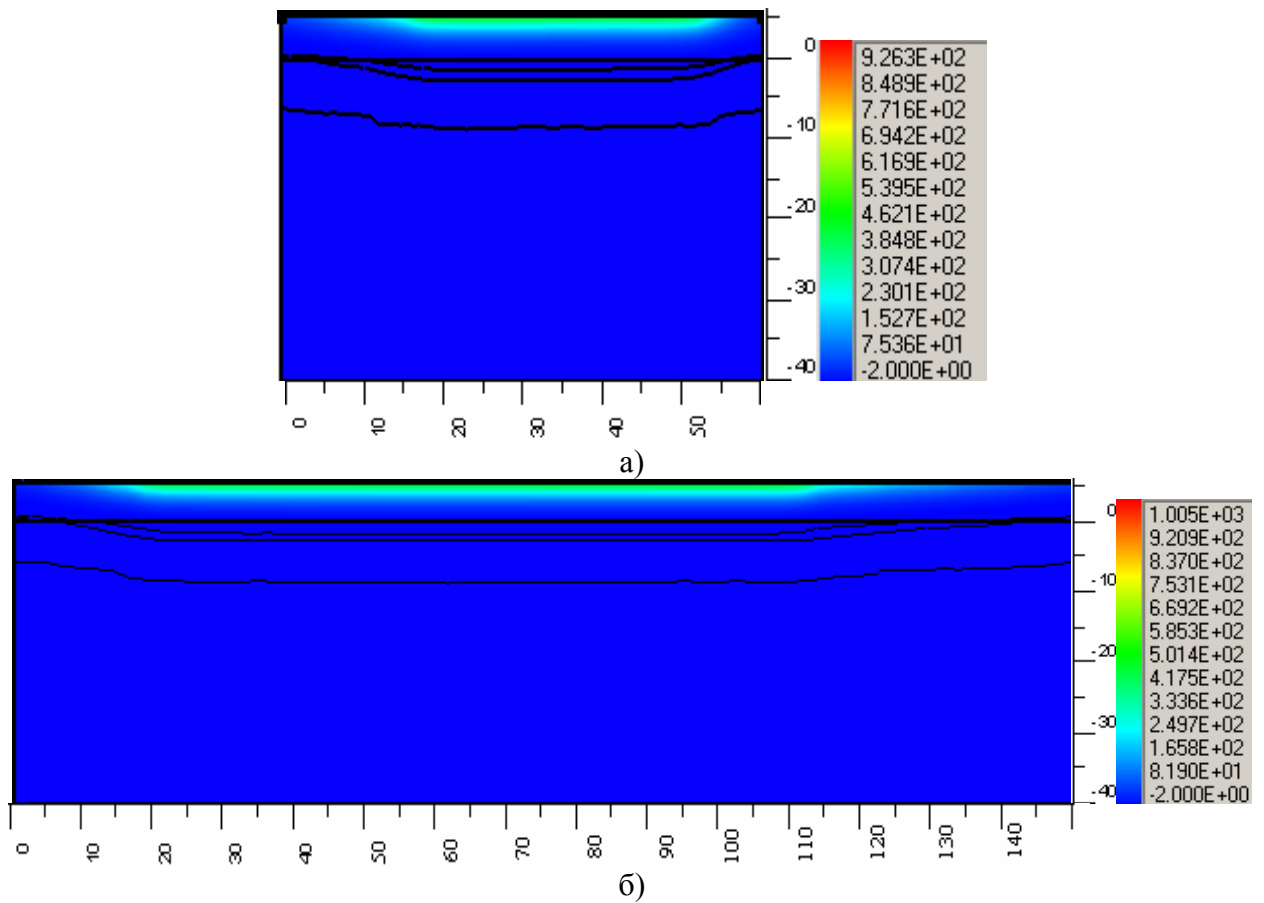


Рис. 11. Поле температуры в продольном сечении. Изолинии температур 0 °С, -1 °С, -2 °С. Настильный факел для различных расходов природного газа. Высота засыпки 6м. Лето.
а) 10 кг/с; б) 100 кг/с.

Зимой по сравнению с летним периодом глубина прогрева грунта уменьшается (рис. 10а, 12), но скорости прогрева грунта подобны (рис. 13) как для засыпки высотой 6 метров, так и для 1,5 метровой. Отличия на рис. 13в связаны с малым временем расчета для данной точки мониторинга.

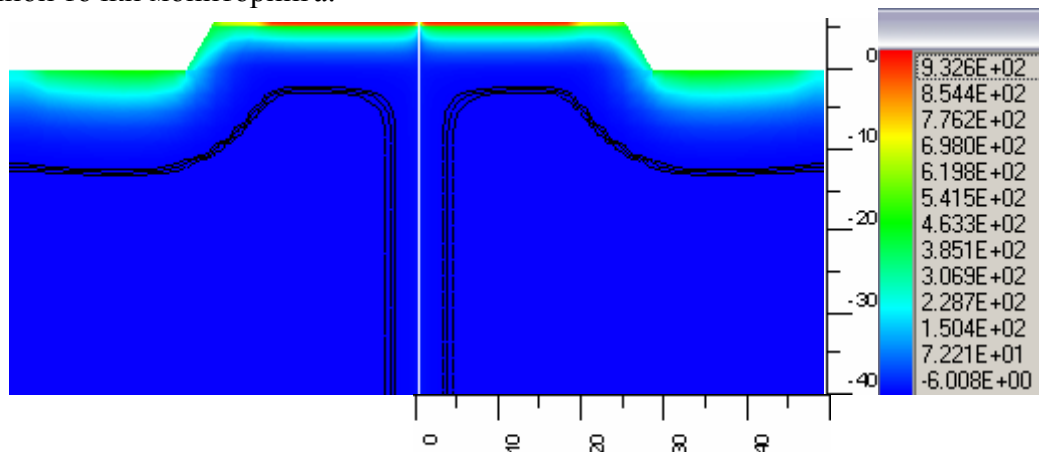


Рис. 12. Поле температуры в поперечном сечении. Изолинии температур 0 °С, -1 °С, -2 °С. Диффузионный факел для расхода природного газа 100 кг/с. Высота засыпки 6м. Зима. 100 суток.

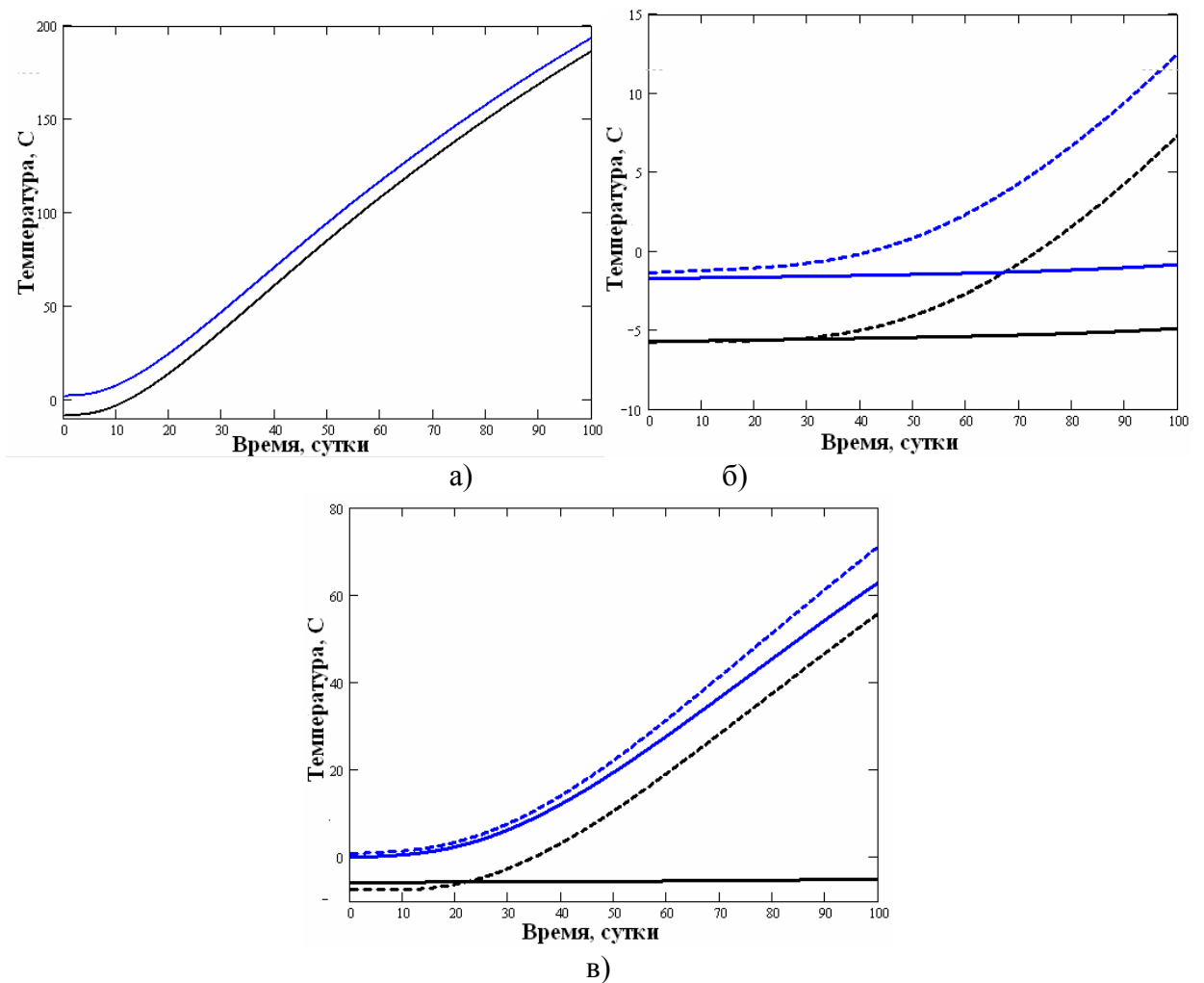


Рис. 13. Зависимость температуры грунта от времени для диффузионного факела при расходе газа 100 кг/с в различных условиях. Синие линии – лето, черные – зима; сплошные линии – высота засыпки 6м, пунктирные – 1,5м. а) точка 1; б) точка 2; в) точка 3.

Уменьшение высоты засыпки с 6 метров до 1,5 приводит к сопоставимому смешению вниз области растепления под засыпкой, кроме этого начинается более интенсивное прогревание смежного ММП (рис. 14, 15). Для летнего варианта с высотой засыпки 1,5м ее растепление происходит еще в штатном режиме работы скважины.

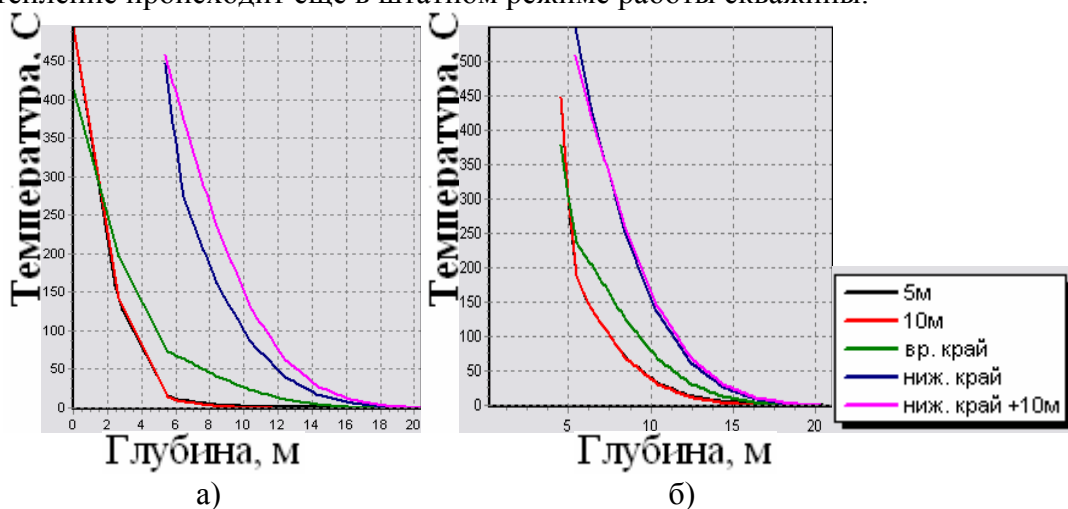


Рис. 14. Распределение температуры по глубине на различных расстояниях от скважины. Диффузионный факел для расхода природного газа 100 кг/с. Лето. 100 суток. а) высота засыпки 6м.; б) высота засыпки 1,5м.

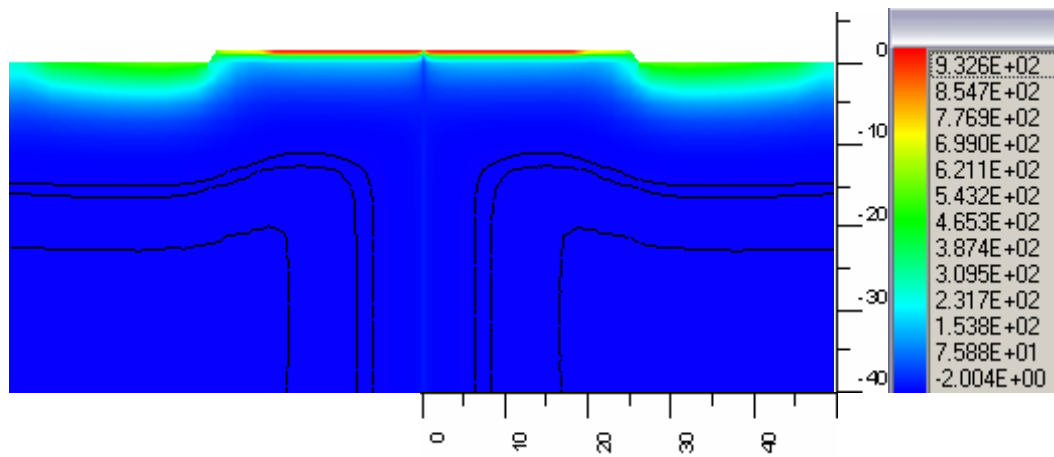


Рис. 15. Поле температуры в поперечном сечении. Изолинии температур 0 °С, -1 °С, -2 °С. Диффузионный факел для расхода природного газа 100 кг/с. Высота засыпки 1,5м. Лето. 100 суток.

При возникновении пожара в режиме бурения скважины поведение зоны критического растепления носит схожий характер со случаем, когда скважина функционирует, если убрать зону растепления связанную с ее работой (рис. 16).

Следует отметить, что сильное влияние на распределение поля температур в засыпке и под ней оказывает теплоизолирующая прокладка. Глубина зоны растепления под ней меньше, несмотря на более интенсивный тепловой поток (рис.10, 12, 16).

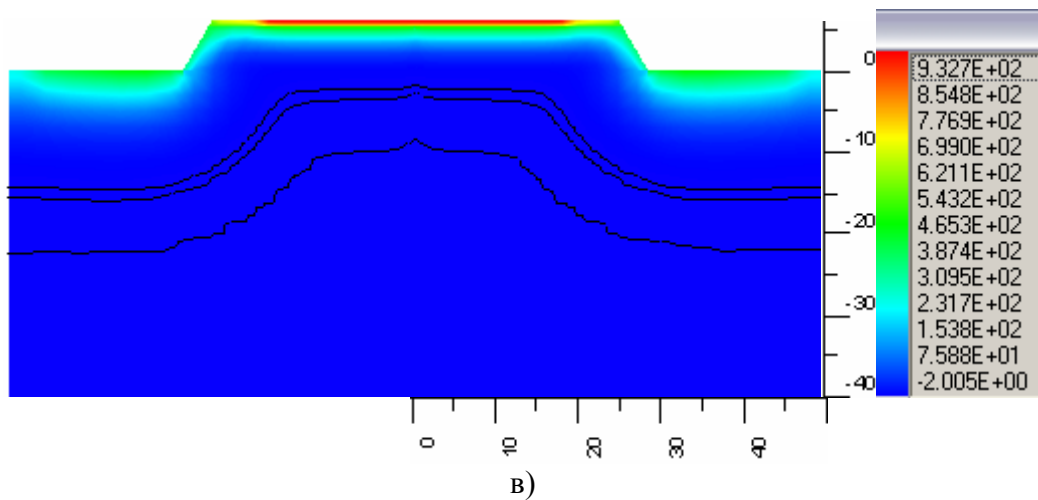


Рис. 16. Поле температуры в поперечном сечении. Изолинии температур 0 °С, -1 °С, -2 °С. Диффузионный факел для расхода природного газа 100 кг/с. Высота засыпки 6м. Лето. Скважина не работает. 100 суток.

Выводы:

1. Использование теплоизоляции газовой скважины может существенно снизить зону растепления.
2. Использование теплоизолирующей прокладки уменьшает глубину зоны растепления под ней.
3. Настильный факел показывает наибольший прогрев вдоль центральной линии насыпки в области своего максимального расширения, но тепловой поток на грунт быстро убывает с удалением от факела.
4. Наибольшая глубина растепления как в области насыпки, так и в прилегающей к ней ММП наблюдается при диффузионном факеле.
5. Наименее опасный случай пожара с точки зрения прогрева грунта – вертикальный факел.
6. Мощность факела в рассмотренном диапазоне слабо влияет на область растепления для диффузионного факела.

Список литературы:

1. Патанкар С. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости. М.: Энергоатомиздат, 1984. 152 с.
2. Дроговейко И.З. Разрушение мерзлых грунтов взрывом. М.: Недра, 1981. 243 с
3. J.C. Chai, S.V. Patankar, Finite-volume method for radiation heat transfer, to Appear in Advances in Numerical Heat Transfer, Editors: Minkowycz and Sparrow, Vol. 2, 2000, Taylor & Francis
4. Grosshandler, W. L., RADCAL: A Narrow-Band Model for Radiation Calculations in a Combustion Environment, [NIST technical note 1402](#), 1993