

ТЕПЛОФИЗИКА И ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ТЕППОТЕХНИКА

Яков Борисович ГОРЕЛИК¹
Артур Харисович ХАБИТОВ²

УДК 624.139

РОЛЬ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИИ СКВАЖИН ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ РАССТОЯНИЯ МЕЖДУ УСТЬЯМИ В РАЙОНАХ РАСПРОСТРАНЕНИЯ МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ГРУНТОВ^{*}

¹ доктор геолого-минералогических наук,
заведующий лабораторией тепломассообменных явлений,
Институт криосферы Земли,
Тюменский научный центр Сибирского отделения РАН
gorelik@ikz.ru

² аспирант, Институт криосферы Земли,
Тюменский научный центр Сибирского отделения РАН;
инженер, Гипротюменнефтегаз
prof.power@yandex.ru

Аннотация

Предложен метод расчета минимального расстояния между устьями скважин в районах распространения многолетнемерзлых грунтов. На основе анализа и сравнения результатов

* Работа выполнена согласно госзаданию по Программе фундаментальных исследований РАН IX.135.2 (проект IX.135.2.4).

Цитирование: Горелик Я. Б. Роль теплоизоляции скважин при определении расстояния между устьями в районах распространения многолетнемерзлых грунтов / Я. Б. Горелик, А. Х. Хабитов // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. 2019. Том 5. № 2. С. 10-26.

DOI: 10.21684/2411-7978-2019-5-2-10-26

расчетов показано, что применение теплоизоляции скважин существенно сокращает расчетное минимальное расстояние между устьями в сравнении с конструкциями без ее использования. При этом экономия в объемах отсыпки кустовых площадок может достигать 30-50%. Еще более значительная экономия может быть достигнута для газовых скважин при снижении минимального расстояния от 40 м (заложенного в Правилах безопасности в 2013 г.) до расчетного значения. Для адекватного определения параметров области протаивания необходимо (в отличие от существующей практики) учитывать совместное тепловое действие скважин в кусте. Этот фактор необходимо принимать во внимание для всех районов распространения многолетнемерзлых грунтов, однако с продвижением на север неточность в расчетах, связанная с исключением его из рассмотрения, возрастает.

Ключевые слова

Мерзлые породы, оттаивающие породы, скважина, параметры области протаивания, теплоизоляция, расстояние между устьями.

DOI: 10.21684/2411-7978-2019-5-2-10-26

Введение

Строительство и эксплуатация добывающих скважин на северных месторождениях в ряде случаев приводят к осложнениям, связанным с тепловым воздействием на мерзлые грунты, их протаиванием и осадками. Протаивание вблизи скважин происходит на всю мощность мерзлой толщи, что даже для слабольдистых грунтов может вызвать осадки значительной величины. В соответствии с замечаниями Н. А. Цытовича [14, с. 222] в этом случае можно говорить о просадках мерзлых грунтов при оттаивании. Вызванные этим осложнения могут быть связаны с исчезновением боковой опоры для крепи скважины при значительной просадке оттаявших льдистых грунтов в некотором интервале глубин и, как следствие, потерей ее продольной устойчивости под действием нагрузок от веса конструкции [1]. Также это может повлечь возникновение дополнительных осевых нагрузок, обусловленных влиянием оттаявшей массы грунта [5, 12]. Величина нагрузки может достигать значений, способных привести к потере продольной устойчивости крепи при сохранении боковой опоры на оттаявшие грунты [6], а также к значительным пластическим деформациям элементов конструкции, приводящим к ее разрушению [5, 15].

Тепловое воздействие на грунты существенно возрастает при кустовом способе разработки месторождений вследствие совместного теплового влияния скважин. Под действием веса эксплуатационного и ремонтного оборудования при слиянии таликов может возникнуть опасность потери несущей способности мерзлого основания, перекрывающего область протаивания в приустьевой зоне. Важными параметрами протаивания, определяющими прочность мерзлого основания и величину механических воздействий на крепь скважин, являются крутизна границы оттаивания в верхней части разреза и характеристика ее положения в каждый момент времени.

Учет совместного действия скважин на величину возникающих дополнительных нагрузок на крепь в настоящее время остается практически неизученным, что, вероятно, является главным элементом неопределенности в проектировании конструкций скважин при кустовом способе разработки. Эта неопределенность диктует необходимость довольно частых изменений в требованиях по ограничению минимального расстояния между устьями в соответствующих нормативных документах. На сегодняшний день принято максимальное ограничение (40 м) для газовых скважин и два радиуса протаивания для скважин иных типов [10]. Расстояние 40 м представляется завышенным даже для весьма сложных геокриологических условий, что приводит к значительному увеличению трудозатрат и стоимости строительства, но его применение оправдано отсутствием достаточных знаний о рассматриваемых негативных процессах. Условие же для иных типов скважин (по радиусам протаивания) является физически противоречивым, поскольку существенно завышает расстояние между устьями для слабольдистых, малопросадочных и достаточно прочных в оттаявшем состоянии грунтов по сравнению с сильнольдистыми грунтами (слабыми в механическом отношении в оттаявшем состоянии) [3].

В работе [8] путем сравнения результатов расчетов параметров протаивания вблизи отдельной скважины и для двух скважин в кусте показано, что при расчете динамики протаивания в зоне расположения куста скважин необходимо (в отличие от существующей практики) учитывать их совместное тепловое влияние. Без такого учета ошибка в расчетах оказывается существенной — смыкание таликов происходит значительно раньше принимаемого времени эксплуатации скважин. Учет совместного влияния скважин увеличивает минимальное расчетное расстояние между устьями (при этом риски возникновения аварийных ситуаций снижаются). Для газовых скважин (при нормированном расстоянии между устьями 40 м) предлагаемый способ расчета приводит к существенной экономии в отсыпке (при гарантированном отсутствии слияния таликов на весь срок эксплуатации). Для месторождения средних размеров эта экономия в объемах насыпи оценивается не менее чем в 150 000 м³ дефицитного материала.

Вместе с тем на экономичность выбора минимального расстояния между устьями существенное влияние может оказать применение теплоизоляции в конструкции крепи, которая снижает тепловое воздействие скважины на мерзлые породы. Этот фактор не рассмотрен в предшествующих публикациях. Настоящая работа имеет целью исследование этого влияния. Ниже для этого будут использованы расчетные методы, охарактеризованные и примененные в работе [8].

Характеристика расчетных условий

При проектировании и строительстве кустов скважин изыскания в целях определения свойств грунтов на глубину просадочной толщи проводятся лишь в исключительных случаях [3], и обычно эти свойства известны весьма приблизительно. По этой причине, несмотря на то что современные вычислительные методы и программные продукты позволяют учесть практически все важные факторы (неоднородность свойств грунтов по разрезу, сезонные колебания

температуры, сложный характер теплообмена грунтов с добываемым флюидом, наличие определенного количества незамерзшей воды в грунте при отрицательных температурах и т. д.), указанное обстоятельство лишает смысла отклонения от простейших вариантов постановки задачи, которые используются в настоящей работе. Тем не менее полученные ниже результаты будут определенным ориентиром при выяснении роли совместного влияния скважин и применения теплоизоляции в процедуре выбора минимального расстояния между устьями. Эти результаты могут быть уточнены при наличии более полной информации о свойствах грунтов и иных данных. Маловероятно, однако, что уточненные расчеты могут принципиально изменить качественные выводы о роли такого влияния.

Расчеты проведены для однородного по физическим и теплофизическим свойствам массива грунта (раздельно в мерзлом и талом состояниях). Для всех вариантов расчета приняты следующие характеристики (для талого грунта принят индекс u , для мерзлого — f): коэффициенты теплопроводности $\lambda_u = 1,75 \text{ Вт}/\text{м} \cdot \text{град}$, $\lambda_f = 1,80 \text{ Вт}/\text{м} \cdot \text{град}$; объемная теплоемкость $C_u = 2,68 \cdot 10^6 \text{ Дж}/\text{м}^3 \cdot \text{град}$, $C_f = 2,20 \cdot 10^6 \text{ Дж}/\text{м}^3 \cdot \text{град}$; объемный вес скелета грунта $\gamma_s = 1500 \text{ кг}/\text{м}^3$; влажность $w = 0,2$; переход единицы объема мерзлого грунта в талое состояние характеризуется величиной скрытой объемной теплоты $\kappa_v = \kappa \cdot \gamma_s \cdot w$, где $\kappa = 3,34 \cdot 10^5 \text{ Дж}/\text{кг}$ ($\kappa_v = 10^8 \text{ Дж}/\text{м}^3$).

Рассматривается простейшая теплоизолированная конструкция скважины, которая характеризуется следующим набором параметров [13]: НКТ диаметром и толщиной стенки $d_0 = 73 \times 5,5 \text{ мм}$, эксплуатационная колонна $d_2 = 168 \times 12 \text{ мм}$, кондуктор $d_3 = 245 \times 11 \text{ мм}$, теплоизоляция оформлена термокейсом по внешней поверхности насосно-компрессорной трубы (НКТ) с внешним диаметром термокейса $d_1 = 109 \text{ мм}$ и имеет толщину $\delta_t = 12,5 \text{ мм}$, коэффициент теплопроводности теплоизоляции $\lambda_i = 0,03 \text{ Вт}/\text{м} \cdot \text{град}$. Между термокейсом и эксплуатационной колонной имеется газовая прослойка толщиной $\delta_g = 29,5 \text{ мм}$, эффективный коэффициент теплопроводности которой принимается равным $\lambda_g = 0,52 \text{ Вт}/\text{м} \cdot \text{град}$ [13]. Межтрубное пространство между эксплуатационной колонной и кондуктором, а также затрубное пространство защемлены арктическим цементом до устья. Внешний диаметр цементного кольца имеет диаметр $d = 400 \text{ мм}$, коэффициент теплопроводности цемента принят $\lambda_s = 0,6 \text{ Вт}/\text{м} \cdot \text{град}$ [13], теплопроводность стали — $\lambda_{st} = 46 \text{ Вт}/\text{м} \cdot \text{град}$. Предполагается, что теплоизоляция НКТ выполнена на нескольких звеньях приуставного участка, а общая длина этих звеньев полностью перекрывает мощность просадочного при оттаивании слоя мерзлых пород. В качестве примера рассматривается залегающий с поверхности слой пород мощностью $H = 80 \text{ м}$. В сравнительных расчетах используется конструкция скважины без теплоизоляции, в которой промежуток между НКТ и эксплуатационной колонной полностью заполнен газом с коэффициентом теплопроводности, как принято выше, а остальные параметры сохраняются прежними.

Расчетная область и граничные условия

В настоящей работе с целью отбора оптимальных вычислительных инструментов сравнительный анализ результатов расчета минимального расстояния между

скважинами в кусте (для двух обозначенных выше конструкций) проводится тремя способами: а) для бесконечной галереи одинаковых скважин; б) для куста с конечным числом скважин; в) для совокупности параллельных трубопроводов в неограниченном пространстве. Преимущество расчетов для галереи заключается в возможности выбора наиболее простой конфигурации расчетной области, которая обусловлена симметрией расположения скважин и их идентичностью. При этом результаты такого расчета обеспечиваются максимальным «запасом», поскольку тепловое воздействие всей совокупности скважин галереи в каждой точке массива грунта превышает такое воздействие в любом кусте с конечным количеством скважин и с идентичным расстоянием между устьями. Далее приводится сравнение результатов расчета для галереи и конечного куста, которые демонстрируют величину возникающего расхождения. В завершающей части приводится обоснование упрощенной методики расчетов, заменяющей скважины в полубесконечном массиве на систему трубопроводов в неограниченном массиве, максимально сокращающую время расчетов при сохранении достаточной их точности.

Схематическое изображение расчетной области для бесконечной галереи скважин в полубесконечном массиве грунта приведено на рис. 1. Скважины располагаются вдоль осевой линии OY , расстояния между ними одинаковы и равны L_∞ . В силу имеющейся симметрии общее температурное поле в рассматриваемом массиве может быть определено по температурному полю в минимальном фрагменте — вертикальной полубесконечной (вдоль осей OX и OZ) полосе конечной ширины $L_\infty/2$, выделенной на рис. 1 коричневым цветом. В численных расчетах протяженность этой полосы ограничена размерами расчетной области: в направлении OZ — мощностью просачочного слоя H , в направлении OX — протяженностью радиуса теплового влияния скважин $l(\tau_e)$ за принимаемый срок эксплуатации τ_e [4]. Величина τ_e принята равной 30 лет, а соответствующее значение $l(\tau_e) = 80$ м. Таким образом, расчетная область для вычислительной процедуры характеризуется размерами параллелепипеда в соответствующих осях: $L_\infty/2 \times l(\tau_e) \times H$ с отброшенной четвертью круга в начале координат (радиусом $d/2$, равным радиусу внешнего цементного кольца). Отметим, что плоскость $Y = L_\infty/2$ совпадает с плоскостью симметрии SS , разделяющей галерею скважин на две половины (рис. 1).

Постановка задачи для определения динамики температурного поля в зоне влияния скважин с учетом фазовых переходов в грунтовой влаге, конечно-разностный аналог исходных уравнений, разбиение расчетной области на ячейки и другие детали вычислительной процедуры достаточно подробно изложены в работах [2, 8].

Граничные условия для рассматриваемой задачи в случае галереи скважин приняты в следующем виде: в силу симметрии температурного поля относительно плоскостей $X = 0$, $Y = 0$, $Y = L_\infty/2$ в любой момент времени τ нормальная проекция теплового потока q на них принимается равной нулю. Такое же (нулевое) значение для величины q принято для плоскостей $X = l(\tau_e)$ и $Z = H$ в силу их удаления от источников тепла (действующих по нормали к этим поверхностям) на расстояние, превышающее радиус теплового влияния в конце срока эксплуатации. Поскольку сезонные колебания температуры не являются определяющими при расчете расстояния между устьями [8], на верхней границе грунтового

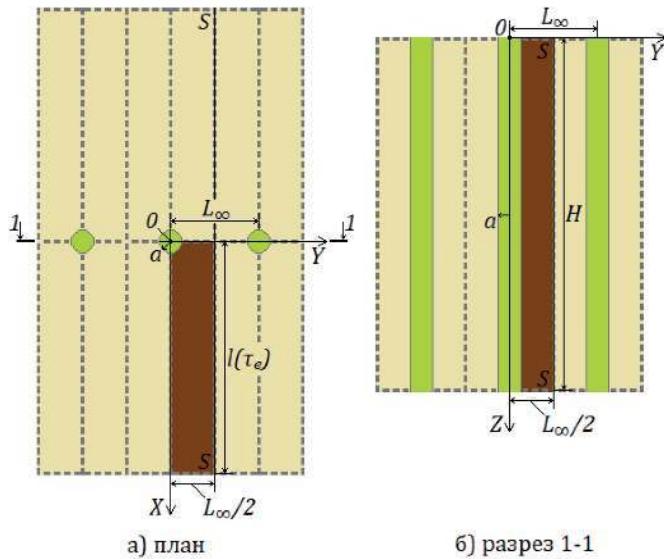


Рис. 1. Схема расчетной области для галереи скважин

Примечания: а) план; б) разрез. Цвет: зеленый — скважины; коричневый — расчетная область. SS — плоскость симметрии между соседними скважинами. Остальные обозначения см. в тексте.

массива ($Z = 0$) принимается граничное условие первого рода. Оно задает равенство температуры на этой поверхности $t(\tau)$ постоянному среднегодовому значению $t_0(t(\tau) = t_0)$, которое также совпадает с постоянной по разрезу начальной температурой грунта (для северных регионов $t_0 < 0$ °C). Теплообмен скважины с грунтами происходит кондуктивно через многослойную стенку. В пренебрежении изменением температуры добываемого флюида в направлении, перпендикулярном потоку, этот теплообмен полностью характеризуется эффективным коэффициентом теплопроводности стенки λ_{ef} , который определяется соотношением [9]:

$$\lambda_{ef} = \frac{\ln\left(\frac{a}{a_0}\right)}{\lambda_{st}^{-1} \cdot \ln\left(\frac{a_1}{a_0}\right) + \lambda_t^{-1} \cdot \ln\left(\frac{a_2}{a_1}\right) + \lambda_g^{-1} \cdot \ln\left(\frac{a_3}{a_2}\right) + \lambda_{st}^{-1} \cdot \ln\left(\frac{a_4}{a_3}\right) + \lambda_s^{-1} \cdot \ln\left(\frac{a_5}{a_4}\right) + \lambda_{st}^{-1} \cdot \ln\left(\frac{a_6}{a_5}\right) + \lambda_s^{-1} \cdot \ln\left(\frac{a}{a_6}\right)} \cdot (1)$$

Соответственно, теплообмен на контакте внешнего цементного кольца с грунтом записывается в виде граничного условия 3-го рода:

$$\frac{\lambda_{ef}}{a} \cdot (t_l - t_a) = -\lambda_f \cdot \left(\frac{\partial t}{\partial r}\right)_{r=a}, \quad (2)$$

где $r = \sqrt{X^2 + Y^2}$ — радиальная координата; t_l — пластовая температура добываемого флюида; t_a — неизвестная температура ($^{\circ}\text{C}$) на контакте цемента с грунтом (является функцией времени и определяется на каждом итерационном шаге в процессе расчета); a, a_0-a_6 — радиусы определенных выше соответствующих цилиндрических элементов конструкции крепи ($a_0 = d_0/2$ и т. д.).

Результаты расчета для галереи сопоставляются с результатами для куста, включающего две скважины (что обеспечивает минимальное совместное тепловое воздействие на грунт по сравнению с галереей). Расчетная область для двух скважин принята в форме прямоугольного параллелепипеда с двумя вертикальными отверстиями, соответствующими продольным осям скважин (рис. 2). Расстояние между скважинами равно L_2 . Вдоль горизонтальной прямой, соединяющей скважины, расстояние от устья каждой из скважин до ближайшей внешней границы расчетной области принято равным 80 м, а от этой прямой в перпендикулярном направлении — также 80 м. Глубина расчетной области (от поверхности) во всех случаях составляет 80 м. Границные условия выбираются из тех же соображений, что и для галереи, и идентичны им для соответствующей плоскости симметрии (SS), внешних границ области и на контакте скважины с грунтом.

Многовариантный расчет динамики трехмерных температурных полей с учетом фазовых переходов в грунтовой влаге, который лежит в основе определения минимального расстояния по моменту смыкания таликов, является довольно сложным, трудоемким и занимает значительное время. В силу того, что свойства грунтов при этом определяются недостаточно точно, такой способ расчета не всегда может быть оправданным. В такой ситуации целесообразно искать более простой путь решения расчетной проблемы, обладающий достаточной точностью и способный составить основу численных оценок. Изложим здесь кратко предпосылки такого способа.

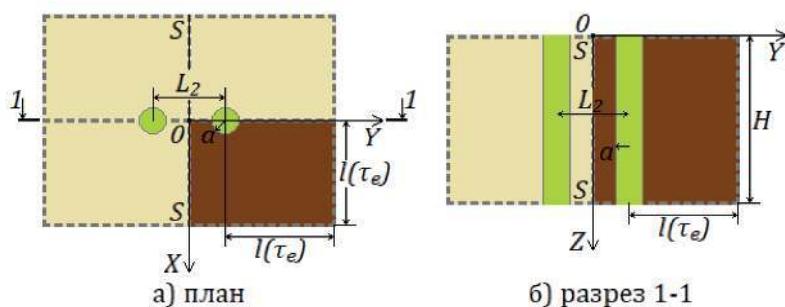


Рис. 2. Схема расчетной области для куста из двух скважин

Примечания: а) план; б) разрез. Цвет: зеленый — скважины; коричневый — расчетная область. SS — плоскость симметрии между скважинами. Остальные обозначения см. в тексте.

Fig. 2. The plan of the calculation area for a group of two boreholes

Notes: a) the plan; б) the cross-section. Colors: green — boreholes; brown — the calculation area. SS is the symmetry plane between boreholes. Other definitions are in the text.

Пространственная форма фазовой границы в координатах Y, Z имеет искривление вблизи поверхности массива, обусловленное влиянием ее отрицательной (среднегодовой) температуры. Протяженность участка искривления в глубину зависит от времени работы скважины, однако в любой момент имеется такая глубина, ниже которой фазовая граница принимает форму вертикальной прямой (рис. 3а-3г). Т. е. ниже этой глубины радиус протаивания имеет постоянное (максимальное) по глубине значение ($\zeta_1(\tau)$) для заданного момента времени τ . Способ определения расстояния между устьями по радиусу протаивания согласно [10] допускает однозначное толкование, если под радиусом протаивания подразумевается именно это максимальное значение. Если исключить из рассмотрения изменение температуры в приповерхностных слоях (важное для иных задач эксплуатации скважин) и сосредоточиться только на вопросе определения минимального расстояния, то важным оказывается только динамика движения вертикально падающего участка границы оттаивания и время до смыкания этих границ от соседних скважин. В этой части разреза тепловые потоки горизонтальны с высокой точностью, что означает возможность рассмотрения вопроса в условиях плоской задачи для параллельных труб в бесконечном пространстве. Вычислительная программа для такого случая более проста, а алгоритм перебора вариантов и длительность вычислений сокращаются. Такая вычислительная программа

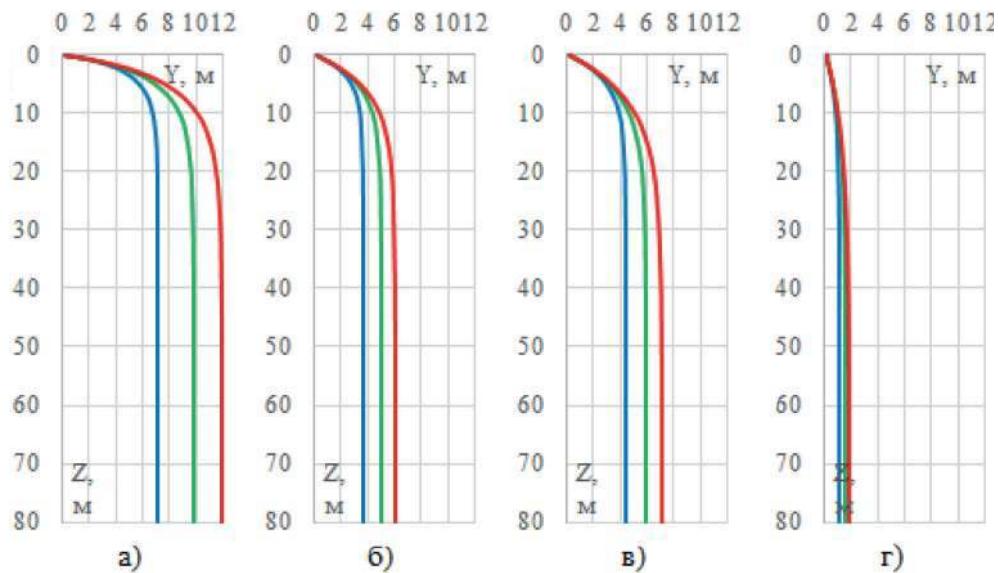


Рис. 3. Положение фазовой границы в зоне влияния отдельной скважины

Примечания: а) вариант II; б) вариант III; в) вариант III; г) вариант III. Цвет: синий — 10 лет; зеленый — 20 лет; красный — 30 лет эксплуатации.

Fig. 3. Location of the phase boundary in the influence zone of a single borehole

Notes: a) variant II; б) variant III; в) variant III; г) variant III. Colors: blue — 10 yrs; green — 20 yrs; red — 30 yrs of operations.

использована здесь в качестве третьего способа расчета, а результаты вычислений по ней сопоставлены с двумя предыдущими. Граничные условия для плоской задачи в основном повторяют те, что изложены для трехмерных аналогов. Главное отличие состоит в том, что исчезает необходимость в граничном условии на верхней границе полупространства (ввиду отсутствия этой границы).

Варианты расчета

Рассматриваемые примеры вычислений ограничены двумя вариантами значений температуры добываемого флюида $t_w = +30$ и $+50$ °C и двумя вариантами температуры мерзлых грунтов $t_0 = -2$ и -4 °C. Различное сочетание этих температур дает четыре варианта различных условий протаивания. Необходимость сопоставления конструкций скважины с теплоизоляцией и без нее увеличивает число вариантов до восьми. Для каждого из них производится вычисление минимального расстояния между устьями тремя различными способами, которые описаны выше. Перенумеруем варианты без теплоизоляции следующим образом: вариант I ($t_0 = -2$ °C, $t_w = +30$ °C); вариант II ($t_0 = -2$ °C, $t_w = +50$ °C); вариант III ($t_0 = -4$ °C, $t_w = +30$ °C); вариант IV ($t_0 = -4$ °C, $t_w = +50$ °C). Для теплоизолированной скважины присвоим те же номера, но с добавлением индекса i. Таким образом, варианты для теплоизолированной скважины: Ii ($t_0 = -2$ °C, $t_w = +30$ °C); вариант IIi ($t_0 = -2$ °C, $t_w = +50$ °C); вариант IIIi ($t_0 = -4$ °C, $t_w = +30$ °C); вариант IVi ($t_0 = -4$ °C, $t_w = +50$ °C).

Прямой способ определения минимального расстояния между устьями с учетом совместного теплового влияния скважин заключается в его подборе путем последовательно выполняемых вариантов расчета (отличающихся только расстоянием между устьями) до тех пор, пока расчетное время до слияния таликов от соседних скважин (τ_l) не приблизится с заданной точностью к значению τ_e . Т. е. с заданной точностью должно быть выполнено равенство: $\tau_l = \tau_e$. Эта процедура может быть начата с заведомо большого расстояния между устьями (например, 40 м) и продолжена последовательным его снижением в последующих вариантах (например, с шагом в 1 м). Учитывая трехмерность рассматриваемой задачи, этот путь может потребовать значительных затрат машинного времени. Однако вычислительная работа будет оправдана ожидаемой выгодой при строительстве кустовых площадок. Следуя такой процедуре, в настоящей работе мы приведем только окончательный результат расчета для каждого из вариантов. Далее будут использованы следующие обозначения для расчетных значений минимального расстояния между устьями скважин: L_0 — расстояние, определенное как удвоенное значение радиуса протаивания вокруг отдельной скважины в конце срока ее эксплуатации согласно [10]; L_2 — расстояние, обеспечивающее отсутствие слияния таликов для соседних скважин, определенное с учетом их совместного теплового влияния в кусте из двух скважин; L_∞ — расстояние, обеспечивающее отсутствие слияния таликов для соседних скважин, определенное с учетом их совместного теплового влияния в бесконечной галерее. Расстояния L_2 и L_∞ обеспечивают отсутствие слияния таликов от соседних скважин в конце срока их эксплуатации.

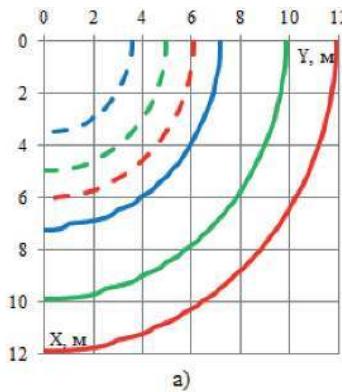
Результаты расчета

На рис. 3а-3г представлены результаты расчета формы и положения фазовой границы вокруг отдельной скважины на моменты времени 10, 20 и 30 лет эксплуатации для четырех вариантов начальных и граничных условий задачи, достигающих максимального (варианты II, IIi) и минимального (варианты III, IIIi) значений параметров области протаивания. Эти кривые симметричны относительно оси OZ . На рис. 4а-4б показаны те же варианты расчета в плоской постановке задачи (для бесконечного трубопровода), которые демонстрируют высокую степень соответствия результатов расчета для двух сравниваемых методов. На рис. 5а-5б для примера показан характер сближения и слияния фазовых границ в кусте из двух скважин (с учетом их совместного влияния) для соответствующих моментов времени в расчетном варианте III при расстоянии между устьями $L_0 = 14,2$ м ($L_0/2 = 7,10$ м соответствует рис. 1в при $\tau_e = 30$ лет). Здесь же для сравнения показано положение фазовой границы для отдельной скважины в соответствующие моменты времени. На рисунках представлена правая половина (симметричная часть) разреза фазовой границы в плоскости, проходящей через устья обеих скважин. Горизонтальная координата Y в данном случае откладывается от плоскости симметрии SS . Момент слияния таликов происходит гораздо раньше, чем при простой суперпозиции решений от отдельных скважин (30 лет), и заключен в интервале $15 \leq \tau_t \leq 16$ лет с момента запуска скважин. Отметим, что в момент слияния таликов верхняя (мерзлая) часть массива ограничена поверхностью с острым углом, направленным вниз острием (рис. 4б). Такая форма границы протаивания характерна только для нестационарных состояний. При достижении стационарной формы эта граница в окрестности своей низшей точки является гладкой [7]. Стационарные решения также могут служить важным ориентиром при тестировании вычислительных алгоритмов и программ.

Определенные выше параметры всех вариантов расчета представлены в таблице 1. Варианты расчета величин L_2 и L_∞ продублированы расчетом динамики температурного поля в зоне влияния системы бесконечных трубопроводов для плоской постановки задачи, как это описано выше. Результаты расчета в этом случае совпадают с результатами для трехмерных постановок задачи (с точностью до третьей значащей цифры) и по этой причине не приведены в таблице 1. Вместе с тем при использовании решения в плоской постановке достигается существенное сокращение времени счета.

Обсуждение результатов

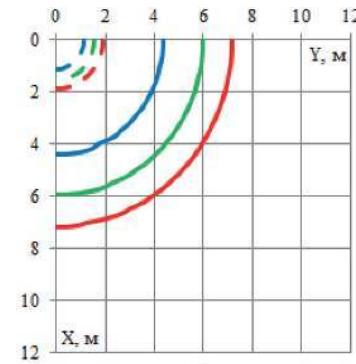
Приведенные в таблице 1 результаты вычислений показывают, что значение L_0 , определенное без учета совместного влияния скважин (в соответствии с [10]), является минимальным для всех рассмотренных вариантов. При этом время до смыкания таликов τ_t , определенное с учетом совместного действия скважин, для этого расстояния оказывается существенно меньше расчетного срока эксплуатации скважин ($\tau_e = 30$ лет). Таким образом, этот способ расчета минимального расстояния значительно повышает неконтролируемые риски при эксплуатации скважин.



a)

Рис. 4. Положение фазовой границы в зоне влияния бесконечного трубопровода (плоская постановка задачи)

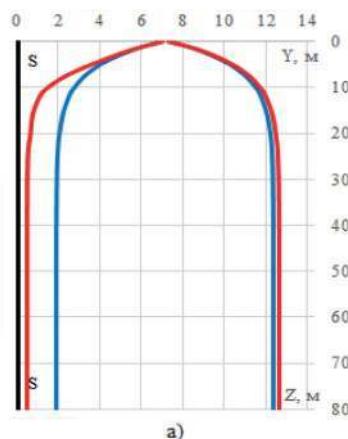
Примечания: а) варианты II и III; б) варианты III и IIIi. Цвет: синий — 10 лет; зеленый — 20 лет; красный — 30 лет эксплуатации. Сплошные линии — без теплоизоляции; штриховые линии — с теплоизоляцией.



б)

Fig. 4. Location of the phase boundary in the influence zone of an infinite pipeline (2D-problem)

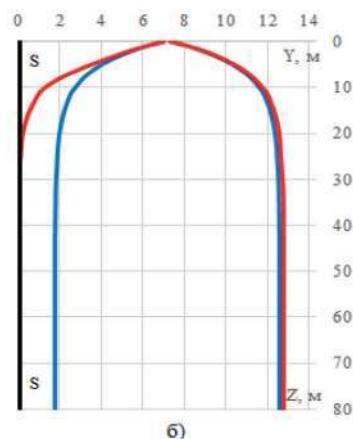
Notes: а) variants II and III; б) variants III and IIIi. Colors: blue — 10 yrs; green — 20 yrs; red — 30 yrs of operations. Solid lines — without thermal isolation; dash lines — with thermal isolation.



а)

Рис. 5. Положение фазовой границы в зоне влияния двух скважин для варианта III

Примечания: а) 15 лет; б) 16 лет эксплуатации. Цвет: синий — без учета влияния второй скважины; красный — с учетом влияния второй скважины. SS — положение плоскости симметрии между двумя скважинами.



б)

Fig. 5. Location of the phase boundary in the influence zone of two boreholes for variants III

Notes: а) 15 yrs; б) 16 yrs of operations. Colors: blue — without the other borehole's influence; red — with the other borehole's influence. SS is the symmetry plane between the wells.

Таблица 1

Результаты расчета промежутка времени τ_l и расстояний между устьями скважин без учета (L_0) и с учетом (L_2, L_∞) их совместного теплового действия

Table 1

The calculation results of time length τ_l and the distances between outfalls without (L_0) and with (L_2, L_∞) the total heat influence of the boreholes

Вариант № п/п	t_0 , °C	t_w , °C	τ_l , лет (от — до)	L_0 , м	L_2 , м	L_∞ , м
I	-2	+30	21-22	17,60	20,7	20,9
II	-2	+50	23-24	23,80	26,5	26,6
III	-4	+30	15-16	14,20	19,1	19,8
IV	-4	+50	19-20	20,40	25,0	25,4
Ii	-2	+30	12-13	7,80	11,5	12,2
IIi	-2	+50	17-18	12,10	15,5	15,9
IIIi	-4	+30	3-4	3,70	9,0	11,0
IVi	-4	+50	9-10	8,18	13,5	14,7

Наибольшее расчетное значение минимального расстояния для всех вариантов достигается при его вычислении для галереи скважин (L_∞). Этот результат является достаточно очевидным, поскольку учитывает влияние максимального количества источников тепла. Однако количественные отличия от случая куста из двух скважин (расстояние L_2) оказываются не очень значительными (несколько увеличиваясь для теплоизолированных скважин при низких температурах пород — варианты IIIi, IVi). Объяснение этому заключается в трехмерном характере распределения тепла каждой скважиной и вследствие этого достаточно быстрым убыванием ее влияния с увеличением расстояния до рассматриваемой точки вдоль осевой линии куста. Учитывая относительно небольшое расхождение в результатах расчета величин L_2 и L_∞ и также то, что величина L_∞ всегда вычисляется с определенным запасом по отношению к реальному кусту, для расчета минимального расстояния с учетом совместного влияния скважин можно рекомендовать схему бесконечной галереи (с наиболее простой расчетной областью). Применением этой схемы в сочетании с наиболее экономичной расчетной процедурой в плоской постановке задачи для системы бесконечных трубопроводов достигается наиболее эффективный способ решения рассматриваемой задачи. Расчетные величины L_2 и L_∞ обеспечивают смыкание таликов между соседними скважинами по истечении срока их эксплуатации во всех вариантах расчета.

Применение теплоизоляции существенно сокращает расчетное минимальное расстояние в сравнении с конструкциями без ее использования (варианты I и Ii)

и т. д.). При этом экономия в объемах отсыпки кустовых площадок может достигать 30-50%. Еще более значительная экономия в объемах отсыпки может быть достигнута для газовых скважин при снижении минимального расстояния от 40 м до значения L_{∞} . Тем не менее проектирование кустовых площадок должно включать технико-экономическое сравнение стоимости вариантов конструкций скважин в совокупности с затратами на отсыпку.

Отметим также, что на основе представленных в таблице 1 результатов расчета (как и в работе [8]) можно сделать однозначный вывод о том, что способ расчета минимального расстояния между устьями не может выполняться без учета совместного теплового действия скважин. При этом с продвижением на север (т. е. с понижением температуры мерзлых пород) неточность в расчетах, связанная с исключением из рассмотрения данного фактора, будет возрастать.

Выводы

1. Наиболее эффективный способ расчета минимального расстояния между устьями включает его расчет для бесконечной галереи при замене скважин бесконечными трубопроводами (величина L_{∞}). При этом обеспечивается необходимая точность вычислений и существенно сокращается время счета. Расчетная величина L_{∞} гарантирует отсутствие смыкания таликов от соседних скважин в течение срока их эксплуатации.
2. На основании представленных результатов вычислений можно утверждать, что при расчете динамики протаивания в зоне расположения куста скважин необходимо (в отличие от существующей практики) учитывать их совместное тепловое влияние. Без такого учета ошибки в расчетах оказываются существенной: смыкание таликов происходит значительно раньше принимаемого времени эксплуатации скважин (таблица 1, столбец 4), а минимальное расстояние между устьями, обеспечивающее надежность их эксплуатации, заметно больше, чем определенное без учета совместного влияния скважин (таблица 1, столбцы 5-7). Эти ошибки заметно возрастают со смещением начальной температуры мерзлых грунтов в область низких значений. В этой связи фактор совместного влияния необходимо принимать во внимание для всех районов распространения многолетнемерзлых грунтов, однако с продвижением на север неточность в расчетах минимального расстояния, связанная с исключением этого фактора, будет возрастать.
3. Применение теплоизоляции существенно сокращает расчетное минимальное расстояние в сравнении с конструкциями без ее использования. При этом экономия в объемах отсыпки кустовых площадок может достигать 30-50%. Еще более значительная экономия в объемах отсыпки может быть достигнута для газовых скважин при снижении минимального расстояния от 40 м до значения L_{∞} . Тем не менее проектирование кустовых площадок должно включать технико-экономическое сравнение стоимости вариантов конструкций скважин в совокупности с затратами на отсыпку.

4. Необходимо также отметить, что способ определения минимального расстояния по отсутствию слияния таликов в течение срока эксплуатации скважин остается довольно формальным и не показывает реальных связей между минимальным расстоянием между устьями и величиной дополнительных нагрузок на крепь, которые являются определяющими при проектировании надежной конструкции. Для более строгого определения минимального расстояния между устьями в кусте необходимо продолжить исследования по установлению такой связи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Василевский В. В. Повышение эксплуатационной надежности газовых и нефтяных скважин в многолетнемерзлых породах: дис. ... канд. техн. наук / В. В. Василевский. М.: ВНИИГАЗ, 2002. 163 с.
2. Горелик Я. Б. Динамика протаивания мерзлых пород в зоне влияния двух скважин / Я. Б. Горелик, А. Б. Шабаров, Ю. С. Сысоев // Криосфера Земли. 2008. Том 12. № 1. С. 59-65.
3. Горелик Я. Б. Инженерно-геокриологические условия Ямбургского газоконденсатного месторождения и динамика состояния кустовых площадок эксплуатационных скважин / Я. Б. Горелик, П. В. Солдатов, А. А. Селезнев // Криосфера Земли. 2015. Том 19. № 1. С. 58-69.
4. Горелик Я. Б. Корректность постановки и решения задач по прогнозу динамики температурных полей в основании сооружений на многолетнемерзлых грунтах / Я. Б. Горелик, Д. С. Паздерин // Криосфера Земли. 2017. Том 21. № 3. С. 49-59. DOI: 10.21782/KZ1560-7496-2017-3(49-59)
5. Горелик Я. Б. Метод расчета вертикальной нагрузки на крепь скважины при оттаивании вмещающих мерзлых пород / Я. Б. Горелик, П. В. Солдатов // Криосфера Земли. 2018. Том 22. № 2. С. 50-60. DOI: 10.21782/KZ1560-7496-2018-2(50-60)
6. Горелик Я. Б. О нарушении продольной устойчивости крепи эксплуатационных скважин при сохранении боковой опоры на оттаивающие мерзлые породы / Я. Б. Горелик, П. В. Солдатов // Криосфера Земли. 2016. Том 20. № 4. С. 93-104. DOI: 10.21782/KZ1560-7496-2016-4(93-104)
7. Горелик Я. Б. Тепловое взаимодействие куста добывающих скважин с вечномерзлыми грунтами / Я. Б. Горелик, М. И. Дзик // Известия Академии наук СССР. Энергетика и транспорт. 1990. Том 36. С. 143-152.
8. Горелик Я. Б. Учет совместного теплового действия скважин в кусте при расчете параметров области протаивания мерзлых грунтов / Я. Б. Горелик, С. Н. Романюк, А. Х. Хабитов // Криосфера Земли. 2019. Том 23. № 2. С. 79-87. DOI: 10.21782/KZ1560-7496-2019-2(79-87)
9. Исаченко В. П. Теплопередача / В. П. Исаченко, В. А. Осипова, А. С. Сукомел. М.: Энергия, 1969. 424 с.
10. Правила безопасности в нефтяной и газовой промышленности. М.: Госгортехнадзор РФ, 2013. 157 с.

-
11. Самарский А. А. Вычислительная теплопередача / А. А. Самарский, П. Н. Вабищевич. М.: Изд-во УРСС, 2003. 785 с.
 12. СП 25.13330.2012. Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах. М.: Минрегионразвития, 2008. 140 с.
 13. СТО Газпром 16-2005. Регламент по проектированию крепи добывающих скважин и их конструкций с учетом свойств мерзлых пород. М., 2005. 45 с.
 14. Цытович Н. А. Механика мерзлых грунтов / Н. А. Цытович. М.: Высшая школа, 1973. 447 с.
 15. Hirshberg A. J. Surface-casing strain capacity for North Slope operations / A. J. Hirshberg, M. C. Moyer, R. M. Rickenbach // SPE Drilling Engineering. 1988. Vol. 3. № 3. Pp. 289-295. DOI: 10.2118/16103-PA

Jacob B. GORELIK¹
Artur K. KHABITOV²

UDC 624.139

**THE INFLUENCE OF THE BOREHOLES' HEAT
INSULATION ON THE DETERMINATION
OF THE MINIMAL DISTANCE BETWEEN
ITS OUTFALLS AT PERMAFROST***

¹ Dr. Sci. (Geol.-Mineral.), Head of the Laboratory of Heat and Mass Transfer, Earth Cryosphere Institute, Tyumen Scientific Centre of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences gorelik@ikz.ru

² Postgraduate Student, Earth Cryosphere Institute, Tyumen Scientific Centre of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences; Engineer, Giprotyumenneftegaz prof.power@yandex.ru

Abstract

This article proposes a method for the calculation of the minimal distance between outfalls of boreholes at permafrost. Based on the analysis and comparison of calculation results, the authors show that the use of heat insulation in the borehole's construction essentially cuts the minimal distance between outfalls. In these cases, the economy of the construction materials in fill area may run up to 30-50%. For reasonable calculations of the thawed area parameters near the group of boreholes, it is necessary (as opposed to the current practice) to take into account the total heat of the boreholes. This factor is required for all permafrost regions; moreover, as the inaccuracy in the calculations, connected with disregard of this factor, will increase when moving to the North.

* This work was performed within the State Mission on the Program of Basic Research RAN IX.135.2 (project No IX.135.2.4).

Citation: Gorelik J. B., Khabitov A. K. 2019. "The influence of the boreholes' heat insulation on the determination of the minimal distance between its outfalls at permafrost". Tyumen State University Herald. Physical and Mathematical Modeling. Oil, Gas, Energy, vol. 5, no 2, pp. 10-26. DOI: 10.21684/2411-7978-2019-5-2-10-26

Keywords

Frozen soil, thawing soil, borehole, thawed area parameters, heat insulation, distance between outfalls.

DOI: 10.21684/2411-7978-2019-5-2-10-26

REFERENCES

1. Vasilevskiy V. V. 2002. "Improving the operation safety of oil and gas wells in permafrost". Cand. Sci. (Tech.) diss. Moscow. [In Russian]
2. Gorelik J. B., Shabarov A. B., Sysoyev Yu. S. 2008. "The dynamics of frozen ground melting in the influence zone of two wells". *Earth's Cryosphere*, vol. 12, no 1, pp. 59-65. [In Russian]
3. Gorelik J. B., Soldatov P. V., Seleznev A. A. 2015. "Engineering and geocriological conditions of the Yamburg gas and condensate reservoir and dynamics of the ground state of bore-holes". *Earth's Cryosphere*, vol. 19, no 1, pp. 58-69. [In Russian]
4. Gorelik J. B., Pazderin D. S. 2017. "Correctness of formulation and solution of thermotechnical problems in forecasting temperature field dynamics in the foundations of constructions on permafrost". *Earth's Cryosphere*, vol. 21, no 3, pp. 49-59. DOI: 10.21782/KZ1560-7496-2017-3(49-59) [In Russian]
5. Gorelik J. B., Soldatov P. V. 2018. "Method of calculation of axial load on the well's casing during thawing of frozen host sediments". *Earth's Cryosphere*, vol. 22, no 2, pp. 50-60. DOI: 10.21782/KZ1560-7496-2018-2(50-60) [In Russian]
6. Gorelik J. B., Soldatov P. V. 2016. "Loss of axial stability of casing in permafrost production wells with a lateral support on thawing ice-rich ground". *Earth's Cryosphere*, vol. 20, no 4, pp. 93-104. DOI: 10.21782/KZ1560-7496-2016-4(93-104) [In Russian]
7. Gorelik J. B., Dzik M. I. 1990. "Thermal interaction between a group of production wells with permafrost". *Izvestiya AN SSSR. Energetika i Transport*, vol. 36, pp. 143-152. [In Russian]
8. Gorelik J. B., Romanyuk S. N., Khabitov A. K. 2019. "Constraining thaw boundary around multiple wells with regard to their joint thermal effect". *Earth's Cryosphere*, vol. 23, no 2, pp. 79-87. DOI: 10.21782/KZ1560-7496-2019-2(79-87) [In Russian]
9. Isachenko V. P., Osipova V. A., Sukomel A. S. 1969. *Heat Transfer*. Moscow: Energiya. [In Russian]
10. RF Gosgortekhnadzor. 2013. *Safety Regulations in Petroleum Industry*. Moscow. [In Russian]
11. Samarsky A. A., Vabishchevich P. N. 2003. *Computational Heat Transfer*. Moscow: URSS. [In Russian]
12. Working Document SP 25.13330.2012. 2008. *Construction Regulations. Basements and Foundations on Permafrost*. Moscow: Minregionrazvitiya. [In Russian]
13. Working Document 16-2005. 2005. *Company Standard. Design of Production Wells for Permafrost Conditions*. Gazprom: Moscow. [In Russian]
14. Tsytovich N. A. 1973. *Mechanics of Frozen Soil*. Moscow: Vysshaya Shkola. [In Russian]
15. Hirshberg A. J., Moyer M. C., Rickenbach R. M. 1988. "Surface-casing strain capacity for North Slope operations". *SPE Drilling Engineering*, vol. 3, no 3, pp. 289-295. DOI: 10.2118/16103-PA