

УЧЕТ СОВМЕСТНОГО ТЕПЛОВОГО ДЕЙСТВИЯ СКВАЖИН В КУСТЕ ПРИ РАСЧЕТЕ ПАРАМЕТРОВ ОБЛАСТИ ПРОТАИВАНИЯ МЕРЗЛЫХ ГРУНТОВ

Я.Б. Горелик, С.Н. Романюк, А.Х. Хабитов

Институт криосферы Земли СО РАН, 625000, Тюмень, а/я 1230, Россия; gorelik@ikz.ru

Результаты расчетов параметров области протаивания вблизи скважин при кустовом способе разработки на многолетнемерзлых грунтах используются для определения минимально допустимого расстояния между устьями и учета дополнительных нагрузок на крепь при проектировании конструкций, обеспечивающих надежность их эксплуатации. Анализ выполненных расчетов для различных внешних условий работы скважин показал, что для адекватного определения параметров области протаивания необходимо (в отличие от существующей практики) учитывать совместное тепловое действие скважин в кусте. Этот фактор важен для всех районов распространения многолетнемерзлых грунтов, особенно его роль возрастает при освоении все более северных регионов.

Мерзлые грунты, оттаивающие грунты, скважина, параметры области протаивания, вертикальные нагрузки, расстояние между устьями

CONSTRAINING THAW BOUNDARY AROUND MULTIPLE WELLS WITH REGARD TO THEIR JOINT THERMAL EFFECT

J.B. Gorelik, S.N. Romanyuk, A.H. Khabitov

Earth Cryosphere Institute, SB RAS, P/O box 1230, Tyumen, 625000, Russia; gorelik@ikz.ru

Calculated parameters of permafrost thawing around a group of petroleum wells are used to estimate the closest allowable wellhead spacing and to account for additional load on casing support in multi-well pad design to ensure prolonged safe operation. Modeling for different operation conditions shows that due regard for the joint thermal effect of multiple wells, unlike current operating practices, is required for appropriate estimation of thawing dynamics. This warming effect works in all permafrost regions but errors caused by its neglect increase progressively as permafrost becomes colder, i.e., in oil and gas fields located farther northward.

Frozen ground, thawing ground, petroleum wells, thawing parameters, axial load, wellhead spacing

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 слабодистых пород может вызвать осадки значительной величины. В соответствии с замечаниями Н.А. Цытовича [1973, с. 222] в этом случае можно говорить о просадках мерзлых пород 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 вследствие этого потерей ее продольной устойчивости под действием нагрузок от веса конструкции [Василевский, 2002]. Это также может повлечь возникновение дополнительных осевых нагрузок, обусловленных негативным трением от оттаявшей массы грунта [СП 25.13330.2012, 2008]. Величина нагрузки достигает значений, способных привести к потере продольной устойчивости крепи при сохранении боковой опоры на оттаявшие грунты [Горелик, Сол-

датов, 2016], а также к значительным пластическим деформациям элементов конструкции, приводящим к ее разрушению [Горелик, Солдатов, 2018; Hirshberg et al., 1988].

Тепловое воздействие на вмещающие мерзлые грунты существенно возрастает при кустовом способе разработки месторождений вследствие совместного теплового влияния скважин. При слиянии таликов возникает опасность потери несущей способности мерзлого основания, перекрывающего область протаивания в приустьевой зоне, под действием веса эксплуатационного и ремонтного оборудования. Важными параметрами протаивания, определяющими прочность мерзлого основания и механические воздействия на крепь скважин, являются крутизна границы оттаивания в верхней части разреза и ее положение в конкретный момент времени.

Вопрос учета совместного действия скважин на величину возникающих дополнительных нагрузок на крепь в настоящее время остается практически неизученным, что, вероятно, служит главным элементом неопределенности при проектировании конструкций скважин при кустовом способе

разработки. Эта неопределенность вызывает необходимость довольно частых изменений в требованиях по ограничению минимального расстояния между устьями в соответствующих нормативных документах. На сегодняшний день принято максимальное ограничение в 40 м для газовых скважин и два радиуса протаивания для скважин иных типов [Правила..., 2013]. Расстояние 40 м представляется завышенным даже для весьма сложных геокриологических условий и приводит к значительному увеличению трудозатрат и стоимости строительства, но его применение оправдано отсутствием достаточных сведений о рассматриваемых негативных процессах. Условие же для других типов скважин (по радиусам протаивания) является физически противоречивым, поскольку существенно завышает расстояние между устьями для слабльдистых (малопрasadочных при оттаивании) и достаточно прочных грунтов по сравнению с сильнольдистыми и слабыми в механическом отношении оттаивающими грунтами [Горелик и др., 2015].

Чтобы избавиться от имеющихся в данном вопросе противоречий и наметить путь для обоснованного определения расстояний между устьями, необходимо создание и развитие методов решения задачи об определении дополнительных нагрузок на крепь при кустовом способе разработки. Первым этапом решения этой задачи является расчет параметров протаивания (в первом приближении – для двух скважин) и определение минимального расстояния между устьями из условия слияния таликов. Применяемый сейчас способ нахождения минимального расстояния заключается в расчете радиуса протаивания для одиночной скважины на срок ее эксплуатации. Расстояние между устьями принимается равным удвоенному значению вычисленного таким путем радиуса протаивания. При этом неявно предполагается, что наличие второй скважины никак не влияет на динамику протаивания вокруг каждой из них. Результаты расчетов, приведенные ниже в п. 4, показывают, что это предположение чаще всего не будет выполнено, и при проектировании кустовых площадок от него следует отказаться, используя более точные инструменты расчета. Соответствующий численный способ решения трехмерной задачи Стефана (применяемый в настоящей статье с некоторыми поправками) представлен в работе [Горелик и др., 2008]. Однако в ней сделан упор на обоснование самого метода решения, но отсутствует анализ совместного влияния скважин на параметры области протаивания в сравнении с результатами решения для отдельной скважины. Настоящая публикация имеет целью восполнить этот пробел.

Отметим, что необоснованное завышение расстояний между устьями (с учетом дефицита кон-

диционных строительных материалов в ряде северных регионов) может приводить к завышению стоимости строительства на десятки и сотни миллионов рублей по месторождению, а необоснованное занижение этого расстояния увеличивает риски возникновения аварийных ситуаций. Избежать лишних рисков и затрат можно при получении конкретного численного значения для расстояния между устьями с учетом совместного теплового влияния скважин. Авторам настоящей статьи не известны публикации, в которых были бы изложены сравнительные примеры таких расчетов. Вероятно, это обусловлено необходимостью выполнения довольно трудоемкой вычислительной процедуры для большого числа вариантов динамики трехмерных температурных полей (даже в простейшем случае двух скважин) с учетом фазового перехода в грунтовой влаге и итеративным подбором искомого расстояния. Однако без выполнения этой работы обоснованное определение данного расстояния невозможно. Выполненные авторами вычисления послужили, помимо прочего, основой для сравнения и обоснования более простой процедуры расчета (позволяющей выделить только два безразмерных теплофизических параметра, влияющих на результат вычислений), которая также приводится в настоящей статье.

1. Характеристика расчетных условий

Вклад совместного теплового влияния скважин на расчетное значение минимального расстояния наиболее ясно можно продемонстрировать на пространственно однородном массиве грунтов. При этом приведенные ниже примеры расчетов имеют чисто методическое значение и не привязаны к конкретному геологическому разрезу. Необходимо также отметить, что при проектировании и строительстве скважин изыскания с целью определения свойств грунтов на глубину прasadочной (при оттаивании) толщи почти никогда не проводятся, и эти свойства известны весьма приближенно. Несмотря на то что в используемых вычислительных программах можно 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 простейшего варианта постановки задачи. Полученные ниже результаты будут определенным ориентиром при ответе на вопрос о роли совместного влияния скважин на выбор минимального расстояния. Они 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 – индекс u , для мерзлого – индекс f): коэффициенты теплопроводности $\lambda_u = 1.75 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{С})$, $\lambda_f = 1.80 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{С})$; объемная теплоемкость $C_u = 2.68 \cdot 10^6 \text{ Дж}/(\text{м}^3 \cdot ^\circ\text{С})$, $C_f = 2.20 \cdot 10^6 \text{ Дж}/(\text{м}^3 \cdot ^\circ\text{С})$; 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 теплоты $\kappa_v = \kappa \gamma_s w$, где $\kappa = 3.34 \cdot 10^5 \text{ Дж}/\text{кг}$ ($\kappa_v = 10^8 \text{ Дж}/\text{м}^3$).

Расчетная область для отдельной скважины имеет цилиндрическую форму с внутренним вертикальным отверстием, соосным продольной оси скважины. Радиус внутреннего отверстия совпадает с радиусом внешнего цементного кольца крепи ($R = 0.2 \text{ м}$), а внешний радиус принят равным 80 м на основании оценок радиуса теплового влияния скважины за срок эксплуатации 30 лет [Горелик, Паздерин, 2017]. Расчетная область для двух скважин имеет форму прямоугольного параллелепипеда с двумя вертикальными отверстиями, соосными продольным осям скважин. Расстояние между скважинами считается заданным. Вдоль горизонтальной прямой, соединяющей скважины, расстояние от устья каждой из скважин до ближайшей внешней границы расчетной области принято равным 160 м , а от этой прямой в перпендикулярном направлении 120 м . Верхняя граница горизонтальная и совпадает с дневной поверхностью массива, глубина расчетной области (от поверхности) во всех случаях составляет 80 м . Начальная температура массива грунта t_0 принимается постоянной по разрезу и равной -2 и -4 $^\circ\text{С}$ в двух вариантах. Температура начала замерзания грунта $t_p = 0$ $^\circ\text{С}$. Предполагается, что рассматриваемый массив представлен супесчаными незасоленными грунтами (содержанием незамерзшей воды при отрицательных температурах пренебрегаем).

Температура внешней стенки скважины t_w принимается постоянной по длине и равной $+10$ и $+20$ $^\circ\text{С}$ в двух вариантах. Четыре варианта расчета: вариант I $t_0 = -2$ $^\circ\text{С}$, $t_w = +10$ $^\circ\text{С}$; вариант II $t_0 = -2$ $^\circ\text{С}$, $t_w = +20$ $^\circ\text{С}$; вариант III $t_0 = -4$ $^\circ\text{С}$, $t_w = +10$ $^\circ\text{С}$; вариант IV $t_0 = -4$ $^\circ\text{С}$, $t_w = +20$ $^\circ\text{С}$. Для анализа совместного влияния скважин на время до момента слияния таликов роль колебаний температуры на поверхности массива грунта оказывается незначительной, что позволяет задать на верхней границе расчетной области постоянную среднегодовую температуру (равную начальной температуре грунта t_0). На боковых и нижней границах расчетной области принимается нулевое значение теплового потока.

2. Сравнение методик расчета

Для определения степени влияния совместного действия скважин на величину минимально допустимого расстояния между устьями расчеты выполняются в следующем порядке. Прежде всего для каждого варианта (I–IV) определяется динамика движения фазовой границы на весь срок эксплуатации отдельной скважины. Пространственная форма фазовой границы в координатах Y, z (Y – радиальная координата, отсчитываемая от оси скважины; z – вертикальная координата, отсчитываемая в глубь массива от его поверхности) имеет искривление вблизи поверхности массива, обусловленное влиянием его отрицательной температуры. Протяженность участка искривления в глубину зависит от времени работы скважины, однако для любого момента имеется такая минимальная глубина, ниже которой фазовая граница принимает форму вертикальной прямой (рис. 1). То есть ниже этой глубины радиус протаивания принимает постоянное (максимальное) по глубине значение $\xi_1(\tau)$ для заданного момента времени τ . Способ определения расстояния между устьями по радиусу протаивания, согласно [Правила..., 2013], допускает однозначное толкование, если под радиусом протаивания подразумевается именно это максимальное значение. При этом минимально допустимое расстояние между устьями вычисляется как

$$l_0 = 2\xi_1(\tau_e),$$

где τ_e – расчетное время эксплуатации скважины.

Прямой способ определения минимального расстояния между устьями с учетом совместного теплового действия скважин заключается в его подборе путем последовательно выполняемых вариантов расчета (различающихся 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 . То есть с заданной точностью должно выполняться равенство $\tau_l = \tau_e$. Эта процедура может быть начата с заведомо большого расстояния между устьями (например, 40 м) и продолжена последовательным его уменьшением в последующих вариантах (например, с шагом 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.

В настоящей работе, следуя такой процедуре, приведем только окончательный результат расчета для каждого из рассматриваемых вариантов. Вместе с этими результатами для более наглядного представления о совместном влиянии скважин ниже приводятся результаты расчета интервала времени от начала эксплуатации скважин до мо-

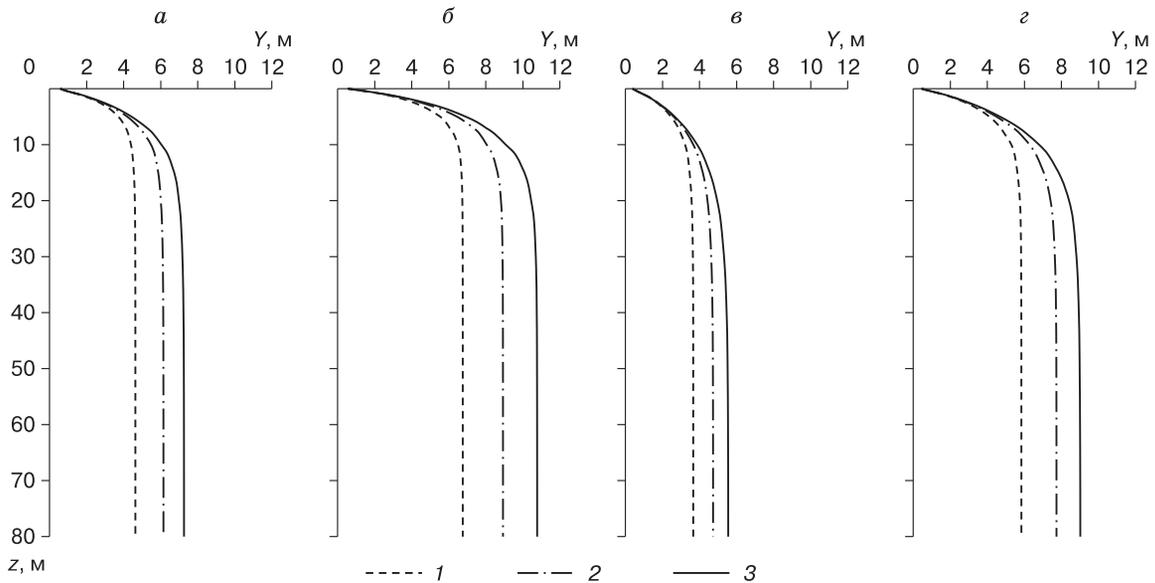


Рис. 1. Положение фазовой границы в зоне влияния отдельной скважины:

a – вариант I; *б* – вариант II; *в* – вариант III; *г* – вариант IV; 1 – 10 лет; 2 – 20 лет; 3 – 30 лет эксплуатации.

мента слияния таликов в том случае, когда расстояние между ними принято равным l_0 . Эти (дополнительные) результаты расчетов, помимо прочего, важны в процедуре тестирования вычислительной программы (например, должно выполняться предельное стремление $l \rightarrow l_0$ при $t_0 \rightarrow t_p$). Для оценки корректности применяемых расчетных процедур было использовано два вычислительных алгоритма решения задачи Стефана (разработанных независимо двумя соавторами настоящей статьи): первый – на основе энтропийной формулировки, второй – на основе разностной схемы со сглаженными коэффициентами [Самарский, Вабищевич, 2003]. Конечно-разностный аналог исходных уравнений, разбиение расчетной области на ячейки и другие детали вычислительной процедуры изложены в работе [Горелик и др., 2008]. Там же приведены примеры расчета трехмерных полей температуры для двух скважин. Кроме того, расчеты в трехмерной постановке задачи сопоставлены с результатами вычислений приближенным квазистационарным методом, применяемый вариант которого излагается в п. 3.

3. Упрощенный способ расчета

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 оправдан. В такой ситуации целесооб-

разно найти более простой путь решения расчетной проблемы, обладающий достаточной точностью и способный составить основу численных оценок. Предпосылки этого состоят в следующем. Если исключить из рассмотрения изменения температуры в приповерхностных слоях (важные для других задач эксплуатации скважин) и сосредоточиться только на определении минимального расстояния, то важными оказываются динамика движения вертикально падающего участка границы оттаивания и время до смыкания этих границ от соседних скважин. В этой части разреза тепловые потоки являются горизонтальными с высокой точностью, что означает возможность рассмотрения вопроса в условиях плоской задачи для двух параллельных труб в бесконечном пространстве. Однако, хотя вычислительная программа для такого случая более простая, сам алгоритм перебора вариантов и длительность вычислений сокращаются не очень существенно. Большее упрощение достигается при рассмотрении температуры и потоков тепла на линии пересечения двух плоскостей, одна из которых перпендикулярна осям трубопроводов, а вторая проходит через их оси. Вдоль этой линии происходит касание границ оттаивания вокруг трубопроводов при смыкании таликов. Рассмотрение теплопереноса вдоль этой прямой приводит к одномерной постановке задачи.

В этом случае достаточно хорошую точность могут дать приближенные (квазистационарные) методы решения задачи Стефана [Общее мерзлотоведение, 1978], один из которых (метод Лейбена) будет использован ниже. При этом в окру-

жающей каждый трубопровод талой зоне выбирается стандартное стационарное (логарифмическое) распределение температуры, а в мерзлой зоне, в силу сложного характера соответствующей функции [Карслоу, Егер, 1964], используется нестационарное распределение температуры, получаемое методами интегрального баланса [Баренблатт, 1954].

Для мерзлой зоны вводится понятие радиуса теплового влияния

$$L(\tau) = \sqrt{12\mu_f \tau},$$

где τ – время, отсчитываемое от момента начала работы трубопровода; $\mu_f = \lambda_f / C_f$ – температуропроводность мерзлого грунта. В итоге для отдельной трубы выражение для температуры в талой зоне $t_t(Y, \tau)$ принимает вид

$$t_t(Y, \tau) = t_w + (t_p - t_w) \frac{\ln(Y/R)}{\ln(\xi_1(\tau)/R)}, \quad R \leq Y \leq \xi_1 \quad (1)$$

и для мерзлой зоны $t_f(Y, \tau)$ с учетом обозначения $l_c(\tau) = \xi_1(\tau) + L(\tau)$:

$$t_f(Y, \tau) = t_p + (t_0 - t_p) \frac{l_c(\tau) \ln(Y/\xi_1(\tau)) - (Y - \xi_1(\tau))}{-L(\tau) + l_c(\tau) \ln(l_c(\tau)/\xi_1(\tau))},$$

$$\xi_1(\tau) \leq Y \leq l_c(\tau). \quad (2)$$

В талой зоне граничные значения температуры $t_t(R, \tau) = t_w$, $t_t(\xi_1, \tau) = t_p$, а для мерзлой зоны выполняются три граничных соотношения (обеспечивающие также непрерывность температуры на фазовой границе):

$$t_f(\xi_1, \tau) = t_p, \quad t_f(l_c, \tau) = t_0, \quad \left(\frac{\partial t_f(Y, \tau)}{\partial Y} \right)_{Y=l_c} = 0. \quad (3)$$

Условие Стефана, определяющее закон движения фазовой границы для одиночной скважины $\xi_1(\tau)$, получается на основе (1)–(3):

$$\frac{\lambda_u(t_w - t_p)}{\ln(\xi_1(\tau)/R)} - \frac{\lambda_f(t_p - t_0)}{-1 + (l_c(\tau)/L(\tau)) \ln(l_c(\tau)/\xi_1(\tau))} =$$

$$= \kappa_v \xi_1(\tau) \frac{\partial \xi_1}{\partial \tau}, \quad (4)$$

$$\xi_1(0) = R.$$

Обыкновенное дифференциальное уравнение (4) с приведенным начальным условием решается стандартными (численными) методами (например, в среде MathCad).

Для двух трубопроводов плоскость, перпендикулярная середине отрезка, соединяющего их продольные оси и параллельная им, является плоскостью симметрии температурного поля. Рассматриваемая задача может решаться для любой из симметричных половинок пространства с равным

нулю тепловым потоком на плоскости симметрии. До момента времени τ_c , когда тепловое влияние каждого трубопровода достигает этой плоскости, температурное поле каждого из них изменяется независимо от второго и описывается соотношениями (1) и (2), а движение отдельной фазовой границы – уравнением (4). Момент времени τ_c определяется уравнением $l_c(\tau) = l_0/2$. С этого момента начинается разогрев мерзлой части грунта с одновременным движением фазовой границы. Температура вдоль рассматриваемого отрезка в талой зоне по-прежнему описывается соотношением (1), где вместо функции $\xi_1(\tau)$ подставляется новая функция $\xi_2(\tau)$, а в мерзлой зоне (согласно уравнению интегрального баланса тепла) при $\tau \geq \tau_c$ она принимает следующий вид (при $\tau = \tau_c$ совпадает с распределением (2)):

$$t_f(Y, \tau) = t_p + (t_c - t_p) \times$$

$$\times \frac{(l_0/2) \ln(Y/\xi_1(\tau_c)) - (Y - \xi_1(\tau_c))}{-L(\tau_c) + (l_0/2) \ln(l_0/2\xi_1(\tau_c))} \exp(-\alpha_c(\tau - \tau_c)),$$

$$\xi_2(\tau) \leq Y \leq \frac{l_0}{2},$$

а уравнение движения фазовой границы (относительно новой функции $\xi_2(\tau)$) с этого момента времени записывается в безразмерном виде:

$$\beta_2 \left[1 - \beta_1 \frac{l_0 - \xi_1(\tau_c)}{\xi_1(\tau_c) \sigma_2(z_c)} \ln \frac{\xi_2(\vartheta)}{R} \exp(-\alpha_c(\tau - \tau_c)) \right] =$$

$$= \frac{\xi_2(\vartheta)}{R} \left(\ln \frac{\xi_2(\vartheta)}{R} \right) \frac{\partial \xi_2(\vartheta)}{R \partial \vartheta}; \quad (5)$$

$$\xi_2(\tau_c) = \xi_1(\tau_c), \quad z_c = \frac{l_0}{\xi_1(\tau_c)}, \quad \alpha_c = \frac{\mu_f \sigma_1(z_c^{-1})}{l_0^2}, \quad (6)$$

$$\sigma_1(x) = \frac{-2(1-x)}{\ln x - 7/6 + x + x^2/2 - x^3/3};$$

$$\sigma_2(x) = 1 + x \ln \frac{x}{e}, \quad \beta_1 = \frac{\lambda_f(t_p - t_c)}{\lambda_t(t_w - t_p)}, \quad (7)$$

$$\beta_2 = \frac{\lambda_t C_f l_0^2 (t_w - t_p)}{\lambda_f \kappa \gamma_s w R^2 \sigma_1(z_c^{-1})}, \quad \vartheta = \alpha_c \tau.$$

Обыкновенное дифференциальное уравнение (5) также решается численно стандартными методами. Далее нахождение минимального расстояния l осуществляется путем подбора, как описано в п. 2 для трехмерной постановки задачи.

4. Результаты расчета

На рис. 1 представлены результаты расчета положения фазовой границы вокруг отдельной

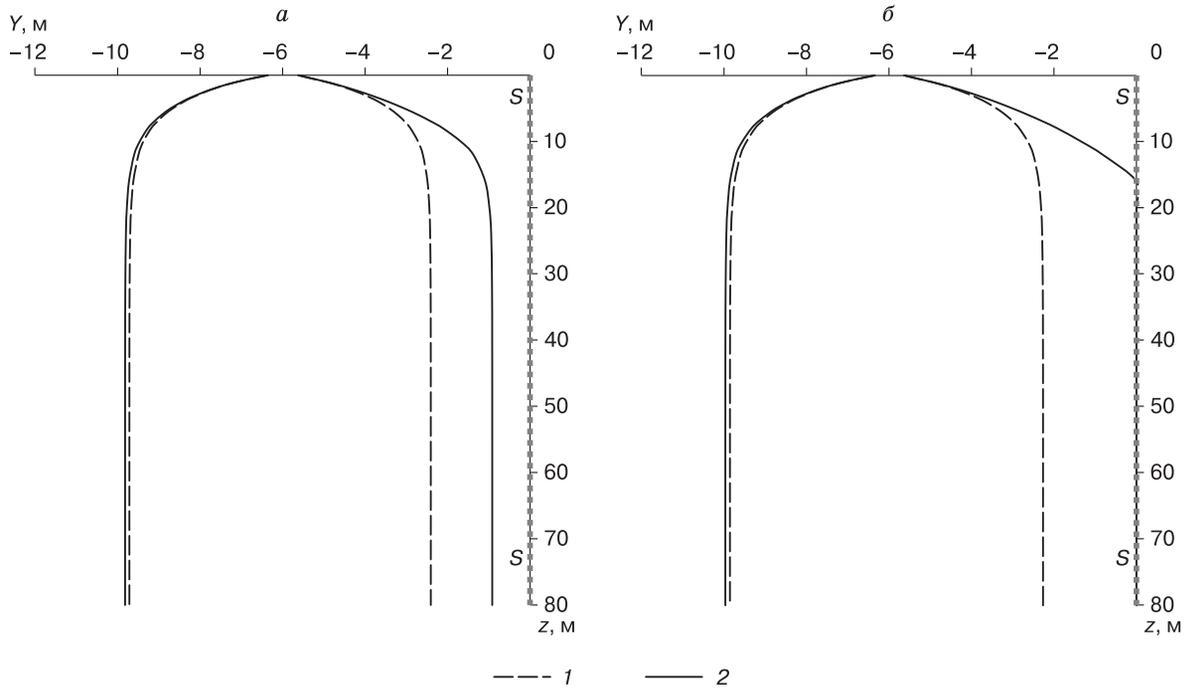


Рис. 2. Положение фазовой границы в зоне влияния двух скважин для варианта III.

a – 9 лет; *b* – 10 лет эксплуатации; 1 – без учета влияния второй скважины; 2 – с учетом влияния второй скважины. SS – положение плоскости симметрии расчетной области.

скважины на моменты времени 10, 20 и 30 лет эксплуатации для указанных четырех вариантов начальных и граничных условий задачи. На рис. 2 для примера показан характер сближения и слияние фазовых границ от соседних скважин (с учетом их совместного действия) для соответствующих моментов времени в расчетном варианте III при расстоянии между устьями $l_0 = 12$ м ($l_0/2 = 6$ м соответствует рис. 1, *b* при $\tau_e = 30$ лет). Здесь же для сравнения приведено положение фазовой границы для отдельной скважины в соответствующие моменты времени. На рис. 2 представлена левая половина (симметричная часть) разреза фазовой границы в плоскости, проходящей через устья обеих скважин. Горизонтальная координата *Y* в

данном случае откладывается от плоскости симметрии SS. Слияние таликов происходит гораздо раньше, чем при простой суперпозиции решений от отдельных скважин, и этот момент лежит в интервале $9 \text{ лет} \leq \tau_l \leq 10 \text{ лет}$ с запуска скважины. Результаты для остальных вариантов таковы: вариант I $l_0/2 = 7$ м, $12 \text{ лет} \leq \tau_l \leq 13 \text{ лет}$; вариант II $l_0/2 = 11$ м, $19 \text{ лет} \leq \tau_l \leq 20 \text{ лет}$; вариант IV $l_0/2 = 9$ м, $13 \text{ лет} \leq \tau_l \leq 14 \text{ лет}$. Отметим, что в момент слияния таликов верхняя (мерзлая) часть массива ограничена поверхностью с острым углом,

Результаты расчета расстояния между устьями двух скважин без учета (l_0) и с учетом (l) их совместного теплового действия

Вариант	$t_0, ^\circ\text{C}$	$t_w, ^\circ\text{C}$	τ_l , лет	l_0 , м	l , м
1	2	3	4	5	6
I	-2	+10	12-13	14/14/16	18/21/19
II	-2	+20	19-20	22/22/23	26/27/26
III	-4	+10	9-10	12/12/12	18/19/19
IV	-4	+20	13-14	18/18/20	24/25/25

Примечание. В двух последних колонках даны результаты расчета: энтальпийным методом, методом сглаженных коэффициентов и упрощенным методом.

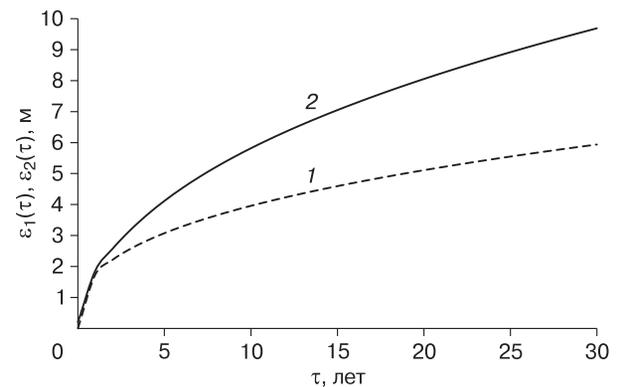


Рис. 3. Изменение во времени характеристик протаивания $\xi_1(\tau)$ (линия 1) и $\xi_2(\tau)$ (линия 2) для расчетного варианта III.

Упрощенный способ, $\tau_e = 0.06$ года; $\xi_1(\tau_e) = 0.7$ м; $l = 19$ м.

острием направленным вниз. Такая форма границы протаивания характерна только для нестационарных состояний. При достижении стационарной формы эта граница в окрестности своей нижней точки является гладкой [Горелик, Дзик, 1990]. Стационарные решения также могут служить важным ориентиром при тестировании вычислительных алгоритмов и программ.

Минимальное расстояние между устьями l , обеспечивающее время до слияния таликов 30 лет, а также другие параметры вариантов расчета представлены в таблице. Динамика фазовой границы $\xi_1(\tau)$ и $\xi_2(\tau)$ приведена на рис. 3.

5. Обсуждение результатов

В отличие от осесимметричной кривой для отдельной скважины (см. рис. 1), ее форма для двух скважин не является симметричной относительно оси скважины, как до момента слияния таликов, так и после (см. рис. 2). Для всех моментов времени до слияния хорошо различимо превышение радиуса протаивания со стороны расположения второй скважины (справа от показанной на рисунках) по сравнению с его значением слева, а также с кривой для отдельной скважины. Понятно, что в этом проявляется снижение влияния второго теплового источника (скважины) на скорость движения фазовой границы с увеличением расстояния до него. Аналогично тому, как это показано на рис. 2 для варианта III, во всех вариантах расчета (включающих и не представленные в настоящей работе) время до момента слияния таликов τ_l оказывается значительно меньше, чем проектный срок эксплуатации скважины ($\tau_e = 30$ лет). При фиксированной температуре стенки t_w величина l_0 уменьшается с понижением температуры t_0 . Вследствие этого в процедуре расчета времени τ_l влияние величин l_0 и t_0 является противоположным и характер зависимости $\tau_l(t_0)$ оказывается неочевидным.

Выполненные расчеты позволяют однозначно утверждать, что время τ_l монотонно уменьшается с понижением температуры грунта t_0 (что вряд ли может быть выведено на основе чисто интуитивных соображений). Это подтверждается попарным сравнением вариантов I и III, II и IV. Объяснение такой зависимости заключается в существенном влиянии теплоемкости грунта на интенсивность прогрева мерзлой зоны, характерная температура которой влияет на скорость движения фазовой границы (фактически здесь существенна роль нестационарности данного процесса). Соответственно, наибольшие отличия величины τ_l от значения τ_e будут наблюдаться для низкотемпературных мерзлых пород. Это означает, что с продвижением на север неточность в расчетах, связанная с исключением влияния совместного действия сква-

жин, будет возрастать. Отметим, что в приближенном методе расчета нестационарность проявляется в наличии множителя C_f (теплоемкость мерзлого грунта) при константе β_2 .

При фиксированной температуре мерзлых пород t_0 величина l_0 уменьшается с понижением температуры t_w . Как и в предыдущем случае, в процедуре расчета времени τ_l влияние величин l_0 и t_w является противоположным и характер зависимости $\tau_l(t_w)$ также неочевиден. Результаты расчетов позволяют утверждать, что время τ_l монотонно уменьшается с понижением температуры t_w (ср. варианты I и II; III и IV). Наибольшие отличия величины τ_l от τ_e будут наблюдаться для низких температур добываемого флюида.

Эти особенности расчетного промежутка времени до момента слияния показывают, что способ расчета минимального расстояния между устьями не может осуществляться без учета совместного действия скважин. В то же время приведенные выше результаты прямого расчета минимального расстояния l , выполненные с учетом этого фактора, показывают, что оно заметно превышает значение l_0 (см. таблицу). Поскольку на кустовой площадке расположено около десятка эксплуатационных скважин, суммарная неточность в определении объемов отсыпки будет существенной. При этом более точный расчет снижает риски возникновения аварийных ситуаций, а для газовых скважин экономия в объемах отсыпки оказывается значительной. Применительно к решению основного вопроса – обеспечения надежности крепи скважин при проектировании их конструкции в районах распространения мерзлых грунтов – главный вывод также состоит в необходимости учета совместного теплового действия скважин при расчете параметров области протаивания.

Результаты определения величины l_0 квазистационарным методом хорошо согласуются (с некоторым запасом в сторону увеличения) с результатами решения трехмерной задачи во всех приведенных выше вариантах расчета (см. таблицу, 5-я колонка). Минимальное расстояние l , полученное аналитическим способом, также близко к тем значениям, которые получены на основе решения трехмерной задачи (см. таблицу, 6-я колонка). При этом длительность процедуры вычислений сокращается на порядок. Однако основное достоинство рассмотренного здесь метода решения заключается в том, что в силу структуры уравнений (4) и (5) искомая функция $\xi_2(\tau)$ оказывается зависящей только от двух безразмерных параметров β_1 и β_2 . Это позволяет разрабатывать достаточно компактные номограммы для оценки величины l , значительно сокращающие трудоемкость и объем вычислений при проектировании кустовых площадок. Например, расчетное рассто-

яние между устьями будет одинаковым ($l = 19$ м) для двух вариантов исходных данных (при неизменных значениях величин β_1 и β_2): 1) $t_w = 10$ °С, $t_0 = -4$ °С, $w = 0.2$; 2) $t_w = 20$ °С, $t_0 = -8$ °С, $w = 0.4$, и при прочих равных параметрах.

ВЫВОДЫ

1. На основе 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 ошибка в расчетах оказывается существенной: смыкание таликов происходит значительно раньше принимаемого времени эксплуатации скважин (см. таблицу, 4-я колонка), а минимальное расстояние между устьями, обеспечивающее смыкание таликов в конце срока эксплуатации, заметно больше, чем определенное без учета совместного влияния скважин (см. таблицу, 5-я и 6-я колонки). Эти ошибки заметно возрастают со смещением (раздельно) начальной температуры мерзлых грунтов (см. таблицу, ср. варианты I, III и II, IV) или температуры теплоносителя (ср. варианты I, II и III, IV) в область низких значений. В этой связи фактор совместного влияния необходимо принимать во внимание для всех районов распространения многолетнемерзлых грунтов, при этом с продвижением на север неточность в расчетах минимального расстояния и времени до слияния таликов, связанная с его исключением, будет возрастать.

2. Учет совместного влияния скважин увеличивает минимальное расчетное расстояние между устьями (риски возникновения аварийных ситуаций снижаются). Для газовых скважин (при нормированном расстоянии между устьями 40 м) применение предлагаемого способа расчета приводит к существенной экономии в отсыпке (при гарантии отсутствия слияния таликов на весь срок эксплуатации скважин). Для месторождения средних размеров эта экономия в объемах насыпи оценивается в 150 тыс. м³ дефицитного материала.

3. При учете совместного теплового действия зависимость минимального расстояния между устьями от всей совокупности природных и технических факторов определяется двумя безразмерными комплексами β_1 и β_2 , что может служить основой для разработки достаточно простых номограмм по оперативной оценке этого расстояния.

4. Способ определения минимального расстояния между устьями, регламентируемый [Правила..., 2013], должен применяться с учетом совместного теплового влияния скважин. Вместе с тем необходимо иметь в виду, что заданный Правилами способ остается довольно формальным и не вскрывает реальных связей между минимальным расстоянием между устьями и величиной допол-

нительных нагрузок на крепь, которые являются определяющими при проектировании надежной конструкции. Для более строгого вычисления минимального расстояния между устьями в кусте необходимо продолжить исследования по установлению такой связи.

Работа выполнена согласно Госзаданию (проект IX.135.2.4) при поддержке гранта Президента РФ для ведущих научных школ (НШ-3929.2014.5).

Литература

- Баренблатт Г.И.** О некоторых приближенных методах в теории одномерной неустановившейся фильтрации жидкости при упругом режиме // Изв. АН СССР. Отд. техн. наук, 1954, № 9, с. 35–49.
- Barrenblatt, G.I., 1954. Some approximate methods in the theory of 1D transient liquid filtration in the elastic mode. *Izv. AN SSSR, Otd. Tekhn. Nauk*, No. 9, 35–49.
- Василевский В.В.** Повышение эксплуатационной надежности газовых и нефтяных скважин в многолетнемерзлых породах: Дис. ... канд. техн. наук. М., 2002, 163 с.
- Vasilevskiy, V.V., 2002. Improving the Operation Safety of Oil and Gas Wells in Permafrost. Candidate Thesis (Engineering). Moscow, 163 pp.
- Горелик Я.Б., Дзик М.И.** Тепловое взаимодействие куста добывающих скважин с вечномерзлыми грунтами // Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт, 1990, т. 36, с. 143–152.
- Gorelik, J.B., Dzik, M.I., 1990. Thermal interaction between a group of production wells with permafrost. *Izv. AN SSSR. Energetika i Transport* 36, 143–152.
- Горелик Я.Б., Паздерин Д.С.** Корректность постановки и решения задач по прогнозу динамики температурных полей в основании сооружений на многолетнемерзлых грунтах // Криосфера Земли, 2017, т. XXI, № 3, с. 49–59.
- Gorelik, J.B., Pazderin, D.S., 2017. Correctness of formulation and solution of thermotechnical problems of forecasting temperature field dynamics in the ground base of structures on permafrost. *Earth's Cryosphere XXI* (3), 45–54.
- Горелик Я.Б., Солдатов П.В.** О нарушении продольной устойчивости крепи эксплуатационных скважин при сохранении боковой опоры на оттаивающие мерзлые породы // Криосфера Земли, 2016, т. XX, № 4, с. 93–104.
- Gorelik, J.B., Soldatov, P.V., 2016. Instability of casing in permafrost production wells with a lateral support from thawing ice-rich soil. *Earth's Cryosphere XX* (4), 84–92.
- Горелик Я.Б., Солдатов П.В.** Метод расчета вертикальной нагрузки на крепь скважины при оттаивании вмещающих мерзлых пород // Криосфера Земли, 2018, т. XXII, № 2, с. 50–60.
- Gorelik, J.B., Soldatov, P.V., 2018. Method of calculation of axial load on the wellbore casing during thawing of frozen host sediments. *Earth's Cryosphere XXII* (2), 44–53.
- Горелик Я.Б., Солдатов П.В., Селезнев А.А.** Инженерно-геокриологические условия Ямбургского газоконденсатного месторождения и динамика состояния кустовых площадок эксплуатационных скважин // Криосфера Земли, 2015, т. XIX, № 1, с. 58–69.
- Gorelik, J.B., Soldatov, P.V., Seleznev, A.A., 2015. Thermal stability of frozen ground at sites of well clusters in the Yamburg gas-condensate field. *Earth's Cryosphere XIX* (1), 53–60.
- Горелик Я.Б., Шабаров А.Б., Сысоев Ю.С.** Динамика протаивания мерзлых пород в зоне влияния двух скважин // Криосфера Земли, 2008, т. XII, № 1, с. 59–65.

- 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 XII* (1), 59–65.
- Карслоу Г.** Теплопроводность твердых тел / Г. Карслоу, Д. Егер. М., Наука, 1964, 487 с.
- Carlaw, H.S., Jaeger, J.C., 1959. *Conduction of Heat in Solids*. Clarendon Press, New York, 510 pp.
- Общее** мерзлотоведение / Под ред. В.А. Кудрявцева. М., Изд-во Моск. ун-та, 1978, 463 с.
- Kudryavtsev, V.A. (Ed.), 1978. *General Permafrost Science*. Moscow University Press, Moscow, 463 pp. (in Russian)
- Правила** безопасности в нефтяной и газовой промышленности. М., Госгортехнадзор РФ, 2013, 157 с.
- Safety Regulations in Petroleum Industry, 2013. *Gosgortekhnadzor RF*, Moscow, 157 pp. (in Russian)
- Самарский А.А.** Вычислительная теплопередача / А.А. Самарский, П.Н. Вабищевич. М., Изд-во УРСС, 2003, 785 с.
- Samarsky, A.A., Vabishchevich, P.N., 2003. *Computational Heat Transfer*. URSS, Moscow, 785 pp. (in Russian)
- СП 25.13330.2012.** Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах. М., Минрегионразвития, 2008, 140 с.
- Construction Regulations, 2008. *Basements and Foundations on Permafrost*. Working Document SP 25.13330.2012. *Minregionrazvitiya*, Moscow, 140 pp. (in Russian)
- Цытович Н.А.** Механика мерзлых грунтов. М., Высш. шк., 1973, 447 с.
- Tsytovich, N.A., 1973. *Mechanics of Frozen Soil*. *Vyshshaya Shkola*, Moscow, 447 pp. (in Russian)
- Hirshberg, A.J., Moyer, M.C., Rickenbach, R.M.** Surface-casing strain capacity for North Slope Operations // *SPE Drilling Eng.*, 1988, Sept., p. 289–295.

*Поступила в редакцию 6 октября 2017 г.,
после доработки – 6 ноября 2018 г.,
принята к публикации 9 ноября 2018 г.*