

ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТА ТЕПЛООВОГО СОСТОЯНИЯ МЕРЗЛЫХ ГРУНТОВ В ОСНОВАНИИ ФАКЕЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Я.Б. Горелик, С.Н. Романюк, А.А. Селезнев

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

Приведено обоснование методов расчета динамики теплового состояния мерзлых грунтов основания факельной установки. Отличительная особенность расчета – наличие фронта кипения воды выше фронта оттаивания мерзлого грунта. Результаты расчетов показывают, что глубина оттаивания мерзлого основания факельной установки за плановый срок ее эксплуатации не является катастрофической и может быть минимизирована с помощью достаточно простых технических мероприятий (увеличение высоты размещения факела, применение слоя теплоизоляции по поверхности грунта и др.).

Факельная установка, мерзлое основание, излучение, фронт кипения, фронт оттаивания, температура поверхности

SOME CHARACTERISTICS OF THE CALCULATION METHODS OF THE FROZEN SOIL'S THERMAL STATE IN THE FLARE FACILITY FOUNDATION

J.B. Gorelik, S.N. Romanyuk, A.A. Seleznev

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

The substantiation of methods for calculating the dynamics of the thermal state of frozen soils in the flare foundation is presented. A distinctive feature of this problem is the presence of the water boiling front higher than the thawing front in the frozen soil. The calculation results show that the depth of thawing of frozen grounds flare for the planned term of its operation is not catastrophic and it can be minimized by using relatively simple technical measures (increasing the height of flare placement, using insulation layer on the surface of the soil etc.).

Flare facility, frozen foundation, radiation, boiling front, thawing front, surface temperature

ВВЕДЕНИЕ

В технологическом процессе подготовки и транспортировки углеводородного сырья в настоящее время нельзя полностью исключить сжигание части попутного газа на факельных установках. Современные технологии предполагают использование как небольших факельных установок (обслуживающих отдельные скважины), так и весьма мощных устройств (с расходом сжигаемого газа порядка нескольких миллионов кубометров в сутки), предназначенных для вывода на проектный режим значительной части месторождения. Хотя время непрерывной эксплуатации таких устройств обычно не более года, температура в зоне горения может превышать 1000 °С. Мощное тепловое излучение пламени оказывает существенное воздействие на окружающую земную поверхность (в радиусе около 100 м погибает растительность), на обслуживающий персонал, прилегающие сооружения и технику. При проектировании факельных установок это приводит к необходимости выделения (в плане сооружения) опасных и безопасных зон, протяженность которых регулируется такими проектными параметрами, как высота мачты, диаметр горелки и длина пламени факела [Стрижевский, 1979]. При размещении подобных

устройств в зоне распространения многолетне-мерзлых грунтов становится очевидной еще одна проблема, связанная с оттаиванием грунтов основания и потерей устойчивости фундаментами установок, что должно учитываться при их проектировании. Кроме того, в условиях мерзлых грунтов экологический аспект процесса строительства и эксплуатации установки усиливается и затрагивает проблему ресурсосбережения в криологии [Мельников, 2005]. Решение этих вопросов должно опираться на расчет динамики теплового состояния грунтов в основании факельной установки. Однако в настоящее время практически отсутствуют результаты каких-либо исследований процесса оттаивания мерзлого грунта при столь мощных тепловых воздействиях. Отдельные публикации [Ракова и др., 2012], посвященные данному вопросу, хотя и перечисляют основные влияющие факторы данного процесса, но весьма лаконичны и не позволяют оценить адекватность применяемых методов расчета. При все возрастающем количестве техногенных катастроф такое положение не может быть удовлетворительным. Изложение расчетных методик и их результатов должно быть достаточно подробным, чтобы специалисты и по-

тенциальные потребители имели возможность провести тестирование и оценить корректность полученных результатов. При этом следует отметить, что известная процедура сертификации вычислительных программ не затрагивает вопроса экспертизы самой вычислительной процедуры, а лишь требует удовлетворения некоторым формальным критериям.

ХАРАКТЕРИСТИКА ПРОЦЕССОВ И ПРИНЯТЫЕ ДОПУЩЕНИЯ

При интенсивном тепловом воздействии на массив мерзлого грунта (считаем, что температура на его поверхности в рабочем режиме факельной установки достигает сотен градусов Цельсия) в самом массиве должны происходить процессы таяния льда и кипения воды. Предполагая, что строение массива и его состояние в начальный момент времени однородны, можно описать пространственную локализацию этих процессов внутри массива следующим образом. Грунтовое основание по вертикали в каждый момент времени может быть разбито на три слоя, находящихся в различном состоянии: самый нижний слой – мерзлый грунт; над ним – талый грунт с температурой от $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ (на контакте с мерзлым) до $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ (точка кипения воды); еще выше (до верхней поверхности массива) – слой, где вода находится только в парообразном состоянии. Пар движется в направлении поверхности массива и выносится за его пределы. В двух нижних слоях влага находится в неподвижном состоянии (влияние процессов массопереноса воды в жидком состоянии на динамику движения фазовых границ предполагается незначительным). Во времени все границы между слоями непрерывно смещаются вниз по разрезу, а мощность двух верхних слоев увеличивается. Теплоперенос в двух нижних слоях осуществляется кондуктивным путем, а в верхнем слое определенный дополнительный вклад может вносить конвекция пара. На несущую способность фундамента важное влияние оказывает положение верхней границы мерзлого грунта (фронта оттаивания) в определенный момент времени [Цытович, 1973; Хрусталева, Давыдова, 2007].

В отсутствие результатов экспериментальных исследований об одновременно протекающих процессах таяния и испарения первоначально мерзлого грунта, такая структура основания при рассматриваемом воздействии не является бесспорной. Не исключено, в частности, что кипение жидкости не локализовано на изотерме $100\text{ }^{\circ}\text{C}$, а занимает некоторый слой конечной толщины выше этой изотермы (при этом температура кипения может изменяться по глубине этого слоя). Некоторые особенности кипения жидкости в пористой среде приведены в монографии [Лыков, 1978], где при

анализе этого процесса в вакууме отмечается возможность возникновения двух дополнительных (по отношению к вязкой составляющей) факторов увеличения сопротивления движению пара в направлении к внешней поверхности. Значение коэффициента теплопроводности для верхнего слоя также не является определенным и может быть принято весьма приближенно. По этим причинам приведенная выше структурная схема оттаивающего основания должна рассматриваться как некоторое приближение к реально протекающим процессам. Наиболее важное отличие данных процессов заключается в наличии фронта кипения выше фронта оттаивания, что приводит к необходимости рассмотрения двухфронтной задачи Стефана (отличающейся от многофронтных задач, например из [Основы..., 1974], тем, что в последней работе образование нескольких фронтов связано с цикличностью процессов промерзания–оттаивания). Отметим, что при математическом описании таких процессов термин “слой” традиционно заменяется на “зона”, чему мы будем следовать в дальнейшем (мерзлая зона, талая зона, зона паросодержания).

Начать следует с простейших одномерных постановок задачи с постоянной температурой на поверхности массива. Аналогичный подход для однофронтных задач при некоторых упрощающих предположениях позволяет получить достаточно простые аналитические решения, которые служат для оценки интенсивности протекающего процесса и могут рассматриваться в качестве некоторого эталона для тестирования более точных (и одновременно более сложных, использующих также численные методы) решений. Кроме того, такие решения в силу их относительной простоты часто используются при выборе технических решений фундаментов на разных стадиях проектирования сооружений.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И СПОСОБЫ РЕШЕНИЯ

Массив мерзлого грунта представляется как однородное полупространство с постоянной по разрезу начальной температурой $t_0 < 0$. Начало координат выбирается в плоскости верхней границы, ось Oz направлена вертикально вниз. В момент времени $\tau = 0$ на верхней поверхности массива ($z = 0$) температура скачком принимает постоянное положительное значение t_s , превышающее температуру кипения воды t_b : $t_s > t_b$ ($t_b = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$). Требуется найти распределение температуры в каждый момент времени $\tau = 0$ для каждой выделенной зоны грунта, а также закон движения границ между ними: $z_w(\tau)$ для границы между талой и паросодержащей зонами (фронт кипения) и $z_{th}(\tau)$ для границы между мерзлым основанием и талым

грунтом (фронт оттаивания). Присвоим следующие индексы: f – для мерзлой зоны, лежащей в основании рассматриваемого массива; th – для талой зоны, расположенной выше мерзлой; w – для верхней паросодержащей зоны.

Для однофронтной задачи ее математическая формулировка достаточно подробно изложена в работе [Общее мерзлотоведение, 1978]. Для двухфронтной задачи список уравнений вполне аналогичен, поэтому остановимся здесь на описании только главных моментов. Внутри каждой зоны решение задачи в виде соответствующих функций температуры и времени $t_w(z, \tau)$, $t_{th}(z, \tau)$, $t_f(z, \tau)$ должно удовлетворять уравнению теплопроводности с постоянными коэффициентами (с учетом только кондуктивной составляющей теплопереноса внутри слоя). На подвижных границах между зонами выполняется условие Стефана (включая постоянство температуры):

$$q_w - q_{th} = \kappa_w \omega_g \gamma_s \frac{dz_w(\tau)}{d\tau}, \quad (1)$$

$$t_w = t_{th} = t_b \text{ при } z = z_w(\tau) \quad (2)$$

для границы между паросодержащей и талой зонами и

$$q_{th} - q_f = \kappa_{th} \omega_g \gamma_s \frac{dz_{th}(\tau)}{d\tau}, \quad (3)$$

$$t_{th} = t_f = t_t \text{ при } z = z_{th}(\tau) \quad (4)$$

для границы между талой и мерзлой зонами.

В соотношениях (1)–(4): κ_w , κ_{th} – удельные теплоты парообразования воды и таяния льда; ω_g – весовая влажность грунта; γ_s – объемный вес скелета грунта; t_t – температура плавления льда (0 °C); t_w , t_{th} , t_f – граничные значения температур $t_w(z, \tau)$, $t_{th}(z, \tau)$, $t_f(z, \tau)$ в соответствующих зонах; q_w , q_{th} , q_f – граничные значения тепловых потоков в соответствующих зонах (определяются через градиенты соответствующих температур на границах зон). Отметим также, что принимаемые для расчетов температуры оттаивания (0 °C) и кипения (100 °C) справедливы, строго говоря, только для незасоленных крупнодисперсных грунтов основания, однако предлагаемые ниже решения легко могут быть обобщены для случая достаточно произвольных значений этих величин при условии сохранения фронтной постановки задачи (т. е. без учета фазовых переходов в спектре температур для любой рассматриваемой зоны).

Как и в однофронтном случае, эта задача допускает получение простых решений в двух вариантах. Наиболее простое из них является аналогом формулы Стефана [Общее мерзлотоведение, 1978]. Его вывод основан на допущении об относительной малости роли теплоемкости грунта по сравнению с теплотой фазовых переходов в исследуемом процессе. Это дает возможность записать распре-

деление температуры в двух верхних зонах в стационарном виде (линейные функции координаты z). Кроме того, для данного варианта решения предполагается, что начальная температура грунта t_0 совпадает с температурой плавления льда t_t , что влечет постоянство этой температуры для подстилающего мерзлого слоя в течение всего процесса протаивания. Представление законов движения фронтов кипения и оттаивания в виде

$$z_w(\tau) = \alpha \sqrt{\tau}, \quad z_{th}(\tau) = \beta \sqrt{\tau} \quad (5)$$

позволяет получить из уравнений (1) и (3) для определения неизвестных α и β систему двух трансцендентных уравнений. Окончательное решение этой системы можно получить с помощью обычной вычислительной процедуры (например, Mathcad):

$$f(\alpha) = \frac{\theta_3}{\theta_2} (\theta_1 + \theta_2 - \alpha^2), \quad \beta = \sqrt{f(\alpha)}, \quad (6)$$

$$\theta_3 = f(\alpha) - \alpha \sqrt{f(\alpha)}, \quad (7)$$

где

$$\theta_1 = \frac{\lambda_w (t_s - t_b)}{\kappa_w \omega_g \gamma_s}, \quad \theta_2 = \frac{\lambda_{th} (t_b - t_t)}{\kappa_w \omega_g \gamma_s}, \quad \theta_3 = \frac{\lambda_{th} (t_b - t_t)}{\kappa_{th} \omega_g \gamma_s}, \quad (7)$$

λ_w , λ_{th} – коэффициенты теплопроводности паросодержащего и талого слоев грунта соответственно. После нахождения величин α и β решение этой задачи в форме соотношений (5) будем отмечать дополнительным индексом 1: $z_{w1}(\tau) = \alpha_1 \sqrt{\tau}$, $z_{th1}(\tau) = \beta_1 \sqrt{\tau}$.

Второе простое решение задачи позволяет учесть влияние теплоемкости грунта и основано на возможности записи распределения температуры в каждой из трех зон в автомоделном виде через интеграл вероятности, аналогично тому, как сделано в однофронтной постановке задачи для двух зон [Общее мерзлотоведение, 1978]. Представляя закон движения границ в форме, аналогичной (5), из соотношений (1) и (3) также можно получить два трансцендентных уравнения для определения величин α и β (которые здесь не выписываются ввиду громоздкости выражений). Эта система также разрешается численным методом. Закон движения фазовых границ в данном решении будем отмечать индексом 2: $z_{w2}(\tau) = \alpha_2 \sqrt{\tau}$, $z_{th2}(\tau) = \beta_2 \sqrt{\tau}$.

Динамика положений границ парообразования и оттаивания для двух простых решений при одинаковых характеристиках грунтов и граничных условиях показаны на рис. 1. Пример расчета выполнен при следующих исходных данных (дополнительное количество параметров отнесется только к решению 2): $t_s = 370$ °C; $t_0 = -0,1$ °C;

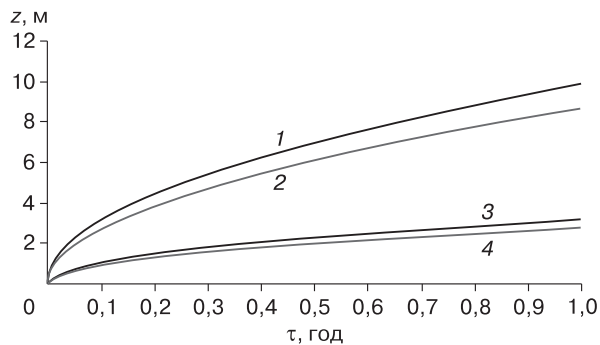


Рис. 1. Динамика положения границ оттаивания z_{th1} (линия 1), z_{th2} (линия 2) и парообразования z_{w1} (линия 3), z_{w2} (линия 4).

1, 3 – без учета теплоемкости грунта; 2, 4 – с учетом теплоемкости.

$\lambda_w = 0,8 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{С})$; $\lambda_{th} = 1,4 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{С})$; $\lambda_f = 1,6 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{С})$; $C_w = 1180 \text{ Дж}/(\text{м}^3\cdot^\circ\text{С})$; $C_{th} = 1180 \text{ Дж}/(\text{м}^3\cdot^\circ\text{С})$; $C_f = 1660 \text{ Дж}/(\text{м}^3\cdot^\circ\text{С})$; $w_g = 0,3$; $\gamma_s = 2800 \text{ кг}/\text{м}^3$ (C_w, C_{th}, C_f – объемные теплоемкости паросодержащего, талого и мерзлого слоев соответственно).

Поскольку при ненулевой теплоемкости требуются дополнительные энергетические затраты на нагрев грунта, учет этого фактора приводит к некоторому замедлению движения фронтов в решении с индексом 2. При теплоемкости, стремящейся к нулю, оба решения совпадают.

В рассматриваемой постановке задачи может быть оценен вклад конвективной составляющей движения пара в верхней зоне на динамику фронта оттаивания. В настоящей работе эта оценка основана только на законе сохранения массы воды во всей паросодержащей зоне: масса испаряющейся в единицу времени воды на изотерме t_b с такой же массовой скоростью проходит через любое горизонтальное сечение этой зоны (постоянный массовый расход пара). Такая посылка означает, что никаких структурных преобразований со скелетом грунта в этом процессе не происходит, а также отсутствует влияние сопротивления движению пара и соответствующего повышения давления на изотерме t_b на скорость испарения на этой изотерме. Из принятой посылки определяется массовый расход пара в верхней зоне: $j_w(\tau) = w_g \gamma_s (dz_w(\tau)/d\tau)$. Вклад паропереноса учитывается включением конвективного члена (содержащего полученное выше выражение для массового расхода) в уравнение теплопроводности для этой зоны, которое может быть представлено в следующем виде [Чекалюк, 1965]:

$$\frac{\partial t_w}{\partial \tau} = a_w \frac{\partial^2 t_w}{\partial z^2} + b \frac{dz_w(\tau)}{d\tau} \frac{\partial t_w}{\partial z}, \quad (8)$$

где $b = c_w w_g \gamma_s / C_w$; $a_w = \lambda_w / C_w$ – температуропроводность паросодержащего слоя; c_w – удельная

теплоемкость пара. Необходимо отметить, что в это уравнение, вообще говоря, должны быть включены члены, учитывающие дроссельный эффект движения пара (пропорционален градиенту давления вдоль движения пара) и эффект его адиабатических деформаций (пропорционален изменению давления во времени). Однако очевидно, что для рассматриваемых здесь крупносkeletalных грунтов указанные изменения давления малы и (в первом приближении) ими можно пренебречь. Тем не менее влияние этих эффектов на исследуемые процессы в дальнейшем должно быть проанализировано более детально.

Уравнение (8) допускает получение точного решения в автоматическом виде:

$$t_w(z, \tau) = t_w(\zeta), \quad \zeta = z / \sqrt{\tau}.$$

Подстановка последних соотношений в (8) приводит к обыкновенному дифференциальному уравнению относительно функции $t_w(\zeta)$, решение которого (с учетом первого соотношения в (5)) в исходных переменных имеет следующий вид:

$$t_w(z, \tau) = t_b + (t_s - t_b) \left[\operatorname{erf} \left(\frac{z + b\alpha\sqrt{\tau}}{2\sqrt{a_w}\sqrt{\tau}} \right) - \operatorname{erf} \left(\frac{\alpha(1+b)}{2\sqrt{a_w}} \right) \right] \times \\ \times \left[\operatorname{erf} \left(\frac{b\alpha}{2\sqrt{a_w}} \right) - \operatorname{erf} \left(\frac{\alpha(1+b)}{2\sqrt{a_w}} \right) \right]^{-1}, \quad (9)$$

$$0 < z < \alpha\sqrt{t}.$$

(Аналогичная подстановка при получении автоматических решений использована Т.П. Пустовойтом [Основы..., 1999]).

Нетрудно проверить, что выражение (9) удовлетворяет также условиям на верхней границе паросодержащего слоя ($t_w(0, \tau) = t_s$) и условию (2) на его нижней границе. При $b = 0$ (отсутствие конвекции) распределение (9) переходит в рассмотренное выше решение без конвекции и соответствует выражению для температуры внутри верхней зоны в однофронтной задаче с соответствующими условиями на ее границах [Общее мерзлотоведение, 1978, с. 65].

Для талой и мерзлой зон решения уравнения теплопроводности при принятых выше предпосылках и с учетом (5) имеют вид

$$t_{th}(z, \tau) = t_b \left[\operatorname{erf} \left(\frac{z}{2\sqrt{a_{th}}\sqrt{\tau}} \right) - \operatorname{erf} \left(\frac{\beta}{2\sqrt{a_{th}}} \right) \right] \times \\ \times \left[\operatorname{erf} \left(\frac{\alpha}{2\sqrt{a_{th}}} \right) - \operatorname{erf} \left(\frac{\beta}{2\sqrt{a_{th}}} \right) \right]^{-1}, \quad (10)$$

$$\alpha\sqrt{\tau} < z < \beta\sqrt{\tau}.$$

$$t_f(z, \tau) = t_0 \left\{ 1 - \left[\operatorname{erfc} \left(\frac{z}{2\sqrt{a_f \sqrt{\tau}}} \right) \right] \left[\operatorname{erfc} \left(\frac{\beta}{2\sqrt{a_f}} \right) \right]^{-1} \right\},$$

$$\beta \sqrt{\tau} < z < \infty. \quad (11)$$

Подставляя распределения (9)–(11) в соотношения (1) и (3), получим два трансцендентных уравнения (здесь не выписываются в силу их громоздкости) для определения двух неизвестных величин (α , β), которые решаются численными методами.

На рис. 2 приведены расчетные значения для величины β_2 (определяющей закон движения границы оттаивания по формуле (5)) в зависимости от температуры на поверхности массива для двух случаев: с учетом (b определено выше) и без учета конвективного движения пара ($b = 0$). На рис. 2 видно, что в первом приближении движением пара можно пренебречь в широком диапазоне температур поверхности.

Полученные в данном разделе решения являются базой для сравнения физически (и математически) более сложных постановок задачи.

ЛОКАЛЬНЫЕ ИСТОЧНИКИ ТЕПЛА И ЧИСЛЕННЫЕ РЕШЕНИЯ

Задание постоянной температуры на поверхности массива грунта не учитывает важные особенности воздействия факельного пламени на подстилающую поверхность – ограниченность размеров источника тепла и его мощности, а также размещение его на некотором удалении от этой поверхности (на высоте H). В случае применения горизонтальных факельных установок необходимо также принимать во внимание горизонтальную протяженность горячей струи (для вертикальных устройств влияние этого фактора менее важно в силу большего удаления точек струи от поверхности грунта при одинаковой высоте размещения горелки).

Простой способ учета этих особенностей состоит в представлении факела в виде точечного источника тепла заданной мощности, размещенного на заданной высоте H над поверхностью. Мощность источника вычисляется по расходу подаваемого газа и его теплотворной способности (предполагается, что газ не содержит примесей и сгорает полностью). Излучение от источника рассеивается от него равномерно по всем направлениям, а его интенсивность падает обратно пропорционально квадрату расстояния до источника. Отсюда определяется интенсивность воздействия излучения от точки поверхности грунта. Если начало координат разместить на вертикальной оси, проходящей через источник, то эта интенсивность $J(r)$ будет центрально-симметричной функцией

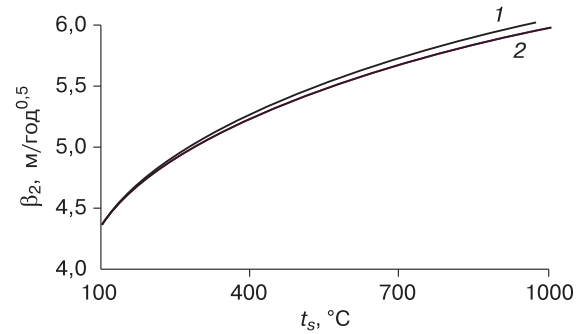


Рис. 2. Зависимость коэффициента β_2 от температуры на поверхности массива t_s :

1 – без учета движения пара; 2 – с учетом движения пара.

удаления r от начала координат в плоскости поверхности грунта. Считая, что эта поверхность излучает как абсолютно черное тело, получим граничное условие на этой поверхности в следующем виде [Лыков, 1967]:

$$J(r) = \sigma T_s^4(r) - \sigma T_a^4 - \lambda_w \left. \frac{\partial t_w}{\partial z} \right|_{z=0}, \quad (12)$$

где σ – постоянная Больцмана; $T_s(r) = t_s(r) + 273$, $T_a = t_a + 273$ – соответственно температуры точек поверхности и температура воздуха (константа) вдали от факела, К.

Условие (12) определяет осесимметричный характер распределения температуры в массиве грунта при условии однородности и изотропности его свойств по разрезу. Вообще говоря, правая часть (12) должна быть дополнена слагаемым $\mu(t_s - t_a)$, учитывающим влияние конвективного теплообмена по поверхности грунтового основания при ветровом движении воздуха (с температурой t_a вдали от факельной установки; μ – коэффициент конвективного теплообмена). Однако для мощных факельных установок, параметры которых приведены ниже, характерные значения функции $J(r)$ имеют порядок 10^5 Вт/м² и выше. При среднем значении коэффициента $\mu = 23$ Вт/(м²·К) [Лукьянов, 1957] и максимальном 30 Вт/(м²·К) [Павлов, 1984] для температуры поверхности t_s даже порядка 1000 °С вклад конвективного слагаемого будет на порядок ниже радиационного члена. Еще меньше должно быть влияние аналогичного слагаемого при естественной конвекции воздуха [Гребер, 1958]. Поэтому в первом приближении он может быть отброшен. Относительно конвективного теплообмена между движущейся струей пламени и подстилающей поверхностью можно утверждать, что в силу максимальной температуры горящие газы имеют тенденцию непрерывно отклоняться вверх (по ходу движения), и их непосредственное взаимодействие с поверхнос-

тью должно быть относительно слабым. Тем не менее этот вопрос заслуживает более внимательного изучения.

В качестве начального условия принимается постоянная отрицательная температура грунта. При использовании численных методов постановка задачи включает уравнение теплопроводности для полупространства, которое записывается в энтальпийной форме [Самарский, 2003]. В вычислительной процедуре это позволяет избежать трудоемких способов явного учета условий на подвижных границах типа (1) и (3). Выбор границ расчетной области осуществляется из соображений относительной малости тепловых потоков на ограничивающих боковых и нижней поверхностях, где принимается равенство нулю нормальных к этим поверхностям тепловых потоков.

Как отмечено выше, радиус влияния факела может достигать 100 м, что приводит к высокой трудоемкости и длительности вычислений (хотя и не представляет принципиальной сложности), если принять этот размер за радиус расчетной области. Такой уровень трудоемкости вычислений может быть оправдан при разработке конкретных проектов факельных установок. Приведенные ниже примеры расчета носят методический характер и призваны проследить тенденции в динамике изменения теплового состояния грунтов основания установки. При этом уменьшение радиуса расчетной области в сравнении с реальным идет в "запас" при вычислении глубин протаивания, т. е. расчетные глубины протаивания увеличиваются (поскольку равенство нулю тепловых потоков на ограничивающих поверхностях означает поглощение одинаковой мощности источника в меньшем объеме).

При численном решении задачи принято, что вертикальная ограничивающая поверхность имеет форму кругового цилиндра с удалением от оси Oz на расстояние $R = 30$ м, нижняя ограничивающая



Рис. 3. Зависимость температуры поверхности грунта от удаления до оси размещения источника тепла, расположенного на высотах H :

1, 2 — $H = 40$ м; 3, 4 — $H = 20$ м; 1, 3 — без теплоизоляции по поверхности; 2, 4 — с теплоизоляцией по поверхности; $\lambda_{iz} = 0,1$ Вт/(м·°C), $h_{iz} = 1,0$ м.

поверхность параллельна поверхности массива и удалена от нее на 50 м вглубь. Расчетная область разбита на ячейки с учетом симметрии задачи. Использована явная расчетная схема с шагом по времени и координате, обеспечивающим выполнение условия устойчивости вычислительной процедуры. Разработанный алгоритм позволяет определять температурное поле внутри расчетной области, в том числе температуру на поверхности грунта и динамику фронтов испарения и оттаивания в основании факельной установки в виде точечного источника постоянной мощности. Положение подвижных границ в каждый момент времени находится методом интерполяции. Кроме того, алгоритм учитывает возможность размещения на поверхности грунта слоя теплоизоляции с заданной толщиной h_{iz} и коэффициентом теплопроводности λ_{iz} .

В качестве примера рассмотрим распределение температуры и динамику движения фронтов при действии точечного источника мощностью 185 МВт (расход газа 89 000 м³/ч). Для сравнения на рис. 3 приведено распределение температуры на поверхности грунта (как без теплоизоляции, так и с ней) при размещении источника на высотах 40 и 20 м от поверхности.

Соответствующие этим случаям размещения источника положения фронтов испарения и оттаивания для 1 года непрерывной эксплуатации установки представлены на рис. 4.

Можно отметить, что в первом варианте (без теплоизоляции) температура на поверхности непосредственно под источником (см. рис. 3, кривая 1) практически совпадает с той, что принята выше в качестве граничного условия для простых постановок задачи. Сравнение результатов расчета динамики фронтов, представленных на рис. 1 (решение с индексом 2) и рис. 4 (кривые 1, 2), для этих двух случаев показывает их хорошее числен-

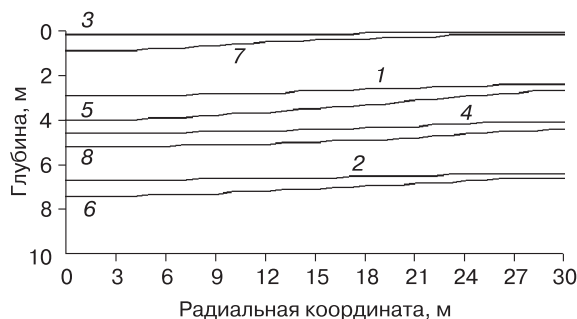


Рис. 4. Положение фронтов кипения и оттаивания в основании факельной установки в виде точечного источника, размещенного над поверхностью грунта на высотах H :

1–4 — $H = 40$ м; 5–8 — $H = 20$ м; 1, 3, 5, 7 — фронт кипения; 2, 4, 6, 8 — фронт плавления; 1, 2, 5, 6 — без теплоизоляции по поверхности; 3, 4, 7, 8 — с теплоизоляцией по поверхности.

ное соответствие, что указывает на корректность разработанных численных процедур. Некоторое замедление движения фронтов для точечного источника объясняется рассеянием тепла в латеральном направлении (по сравнению с одномерным решением).

Изменение высоты размещения источника (примерно в 2 раза) существенно влияет на температуру поверхности грунта (см. рис. 3, кривые 1, 3), однако изменение (примерно в 1,5 раза) глубины оттаивания при этом не является радикальным (см. рис. 4, кривые 2, 4). Причина слабой зависимости глубины оттаивания от температуры поверхности состоит в высокой энергоемкости процесса испарения (теплота парообразования примерно на порядок превосходит теплоту таяния), который экранирует влияние температуры поверхности массива на процесс оттаивания.

Несмотря на то что теплоизоляция существенно (примерно в 3,5 раза) снижает температуру подстилающей поверхности грунта (см. рис. 3, кривые 1 и 2, кривые 3 и 4), соответствующее снижение глубины оттаивания не превышает полуторакратного значения (см. рис. 4, кривые 2 и 4, кривые 6 и 8). Такая зависимость также является следствием преобладающего влияния процесса испарения в общей картине теплопереноса.

Из представленных здесь результатов расчета следует, что максимальная глубина оттаивания основания не превышает 7,5 м даже при минимальной высоте размещения факела и при отсутствии теплоизоляции поверхности (см. рис. 4, кривая 6). Можно предполагать, что оттаивание основания будет продолжаться еще некоторое время после отключения факельной установки. Величину этого дополнительного оттаивания довольно легко оценить из общего теплосодержания массива, оно не превосходит примерно 0,5 м. С учетом приведенных выше результатов это позволяет сделать



Рис. 5. Зависимость температуры поверхности грунта от удаления до начала координат.

Расположение линейного источника на высотах 20 м (1, 2) и 40 м (3, 4) в плоскости, содержащей струю пламени (1, 3), и в плоскости, перпендикулярной струе и проходящей через центр ее отрезка (2, 4).

вывод о реальности создания надежных фундаментов факельной установки (например, свайных), заглубленных в мерзлое (не оттаявшее в течение работы установки) основание.

Рассмотренное численное решение задачи может быть использовано в качестве эталона для сравнения с решением задачи, описывающей воздействие на основание горизонтальной факельной струи, имеющей конечную протяженность (такая модель факела является более реалистичной, чем точечный источник). В пределе, при стремлении длины факельной струи к нулю (при постоянной мощности источника), мы должны получить представленные выше результаты. Длина факельной струи может достигать нескольких десятков метров и определяется диаметром факельной горелки и расходом газа из условий устойчивости процесса горения [Стрижевский, 1979]. Постановка задачи с протяженным (в виде горизонтального линейного отрезка с заданной суммарной мощностью) источником тепла вполне аналогична таковой для точечного источника. Здесь приведем только результаты ее решения для примера линейного источника с длиной струи пламени 20 м, размещенного на высоте (в двух вариантах) 20 и 40 м и той же суммарной мощностью, что и в случае точечного источника. В примере радиус расчетной области по горизонтали принят равным 50 м.

На рис. 5 приведены результаты расчета температуры поверхности массива грунта в двух взаимно перпендикулярных плоскостях (содержащей отрезок струи и перпендикулярной к нему). На рис. 6 показаны положения фронтов кипения и оттаивания для данного случая. Можно отметить, что протяженность источника практически не влияет на положение фронтов под центром отрезка факельной струи, но более заметно искривляет их линию в радиальном направлении (см. рис. 4, 6). Заметим также, что при сокращении длины

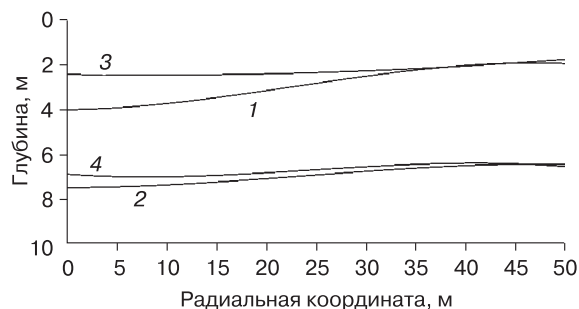


Рис. 6. Положение фронтов кипения и оттаивания в основании факельной установки в виде линейного источника, размещенного над поверхностью грунта на высотах H , в плоскости, содержащей струю пламени.

1, 2 — $H = 20$ м; 3, 4 — $H = 40$ м; 1, 3 — фронт кипения; 2, 4 — фронт плавления.

струи до нуля (при постоянной суммарной мощности источника) результаты расчетов достаточно хорошо соответствуют полученным выше результатам для точечного источника.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Современные факельные установки, обеспечивающие процесс добычи и подготовки углеводородного сырья, являются мощными источниками теплового воздействия, которое необходимо учитывать не только при проектировании защитных мероприятий по обеспечению безопасности обслуживающего персонала и техники, но и при проектировании фундаментов этих сооружений в районах распространения многолетнемерзлых грунтов. В расчете динамики теплового состояния мерзлого массива при воздействии факела следует учитывать важную особенность – наличие фронта кипения выше фронта оттаивания. В силу высокой энергоемкости процесса парообразования фронт кипения экранирует тепловое воздействие факела на мерзлые грунты и существенно тормозит скорость движения фронта оттаивания (по сравнению со случаем, когда процесс парообразования в расчете не учитывается).

На основе разработанных методов расчета динамики теплового состояния грунтов основания факельной установки в процессе ее эксплуатации и приведенных примеров расчета могут быть сформулированы следующие выводы.

1. Глубина оттаивания мерзлого основания факельной установки за плановый срок ее эксплуатации (до 1 года) не является катастрофической и может быть минимизирована применением достаточно простых технических мероприятий (увеличение высоты размещения факела, применение слоя теплоизоляции по поверхности грунта). Обеспечение устойчивости и надежности факельной установки на мерзлых грунтах может быть достигнуто применением свайных фундаментов с заглублением в мерзлое (не оттаявшее) основание.

2. Показано, что влиянием конвекции пара на теплоперенос и движение фазовых границ в оттаивающем массиве в первом приближении можно пренебречь.

3. Вместе с тем необходимо отметить, что в настоящее время отсутствуют материалы сколь угодно завершённых исследований процесса кипения воды в грунтах при соответствующих тепловых нагрузках. Для завершения разработки ме-

тодов расчета теплового воздействия факельной установки на мерзлые грунты основания такие исследования должны быть проведены, а их результаты – опубликованы.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента РФ (НШ-5582.2012.5), а также Программы научных исследований Тюменской области “Воздействие климатических изменений и техногенеза на экосистемы Западной Сибири. Сохранение и использование криогенных ресурсов”.

Литература

- Гребер Г.** Основы учения о теплообмене / Г. Гребер, С. Эрк, У. Григуль. М., Изд-во иностр. лит., 1958, 567 с.
- Лукьянов В.С.** Расчет глубины промерзания грунтов / В.С. Лукьянов, М.Д. Головкин. М., Трансжелдориздат, 1957, 164 с.
- Лыков А.В.** Теория теплопроводности / А.В. Лыков. М., Высш. шк., 1967, 599 с.
- Лыков А.В.** Тепломассоперенос / А.В. Лыков. М., Энергия, 1978, 480 с.
- Мельников В.П.** Актуальность ресурсного подхода в криологии // Криосфера Земли, 2005, т. IX, № 1, с. 3–6.
- Общее мерзлотоведение** / Под ред. В.А. Кудрявцева. М., Изд-во Моск. ун-та, 1978, 464 с.
- Основы геокриологии.** Ч. 5. Инженерная геокриология / Под ред. Э.Д. Ершова. М., Изд-во Моск. ун-та, 1999, 517 с.
- Основы мерзлотного прогноза при инженерно-геологических исследованиях** / Под ред. В.А. Кудрявцева. М., Изд-во Моск. ун-та, 1974, 432 с.
- Павлов А.В.** Энергообмен в ландшафтной сфере Земли / А.В. Павлов. Новосибирск, Наука, 1984, 256 с.
- Ракова А.И., Кутвицкая Н.Б., Магомедгаджиева М.А.** Тепловое состояние системы “Вертикальная факельная установка – многолетнемерзлые грунты основания” с учетом процессов излучения и парообразования // Тр. 10-й Международной конф. по мерзлотоведению (Салехард, 2012). Тюмень, Печатник, 2012, т. 5, с. 259–260.
- Самарский А.А.** Вычислительная теплопередача / А.А. Самарский, П.Н. Вабищевич. М., Едиториал УРСС, 2003, 784 с.
- Стрижевский И.И.** Факельные установки / И.И. Стрижевский, А.И. Эльнатанов. М., Химия, 1979, 180 с.
- Хрусталев Л.Н., Давыдова И.В.** Прогноз потепления климата и его учет при оценке надежности оснований зданий на вечномерзлых грунтах // Криосфера Земли, 2007, т. XI, № 2, с. 68–75.
- Цытович Н.А.** Механика мерзлых грунтов / Н.А. Цытович. М., Высш. шк., 1973, 445 с.
- Чекалок Э.Б.** Термодинамика нефтяного пласта / Э.Б. Чекалок. М., Недра, 1965, 239 с.

*Поступила в редакцию
20 марта 2013 г.*