

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТАЯНИЯ СНЕЖНОГО ПОКРОВА ВОКРУГ ФАКЕЛЬНЫХ УСТАНОВОК

Ю.В. Романовский
ООО «НТЦ «Симмэйкерс»
e-mail: yuriy.ramanowski@simmakers.ru

Предложена математическая модель системы «вертикальная факельная установка – снежный покров – грунт» в условиях вечной мерзлоты. В модели учитывается образование проталины под влиянием излучения пламени и загрязнения снега сажей. Представлены результаты численного и приближенного аналитического прогноза площади проталины и объема оттаивания грунта под факельной установкой.

В процессе добычи нефти выделяется попутный нефтяной газ (ПНГ), который обычно контролируемо сжигается на вертикальной (высотной) факельной установке (ВФУ). Факельное сжигание – простой способ обезвреживания сбросов, но ВФУ – мощный источник теплового загрязнения. Высокий факельный ствол необходим, чтобы энергетическая освещенность облучаемой поверхности (в полдень при безоблачном небе) не превышала предела [1, с. 43]. Экстремальное нагревание факельным пламенем увеличивает эффективную теплопроводность влажного грунта до 3–5 (!) раз [2], что в условиях вечной мерзлоты усиливает поток тепла к мерзлоте основания. После 100 °С в порах грунта происходит кипение сначала свободной, а затем и связанной воды. Ситуацию усугубляет загрязнение облучаемой поверхности сажей. Очевидно, факельное сжигание может стать причиной термокарста и усадки грунта.

Далеко не вся теплота, выделяющаяся при сжигании (высшая теплота сгорания), поглощается грунтом, значительная часть теплоты распределяется следующим образом:

- рассеивается в атмосфере при помощи конвекции и радиации;
- излучается в космическое пространство, в том числе как отраженное излучение, особенно от снежного покрова;
- затрачивается на таяние снега, испарение воды из снежного покрова и с поверхности талых вод, «сухое» испарение (возгонку) снега.

Данная работа посвящена количественной оценке вклада снежного покрова в сдерживание оттаивания вечномерзлого основания ВФУ.

Рассмотрим нефтяное месторождение с ВФУ для сжигания ПНГ, которое расположено в зоне вечной мерзлоты и пребывает на стадии стабилизации добычи. Для этой стадии характерны не постоянные, а периодические сбросы газа в факельную систему [3]. Пример режима работы ВФУ при периодических сбросах: время непрерывной работы ВФУ – 24 часа [3, 4], пуск ВФУ – 10–12 раз в год [4, 5]. Предположим, что в период устойчивого снежного покрова происходит факельный сброс. Исследуем тепловое влияние пламени на снежный покров и грунт в течение непрерывной работы ВФУ после пуска.

Факельная площадка – обозначенная и огороженная опасная зона вокруг факельного ствола – в нашей модели предполагается ровной и горизонтальной. Проталиной будем называть бесснежную поверхность факельной площадки. Облучаемой поверхностью в модели является совокупность проталины и поверхности снега, лежащего на площадке.

Предположим, что условия сжигания газа подходящие для моделирования:

- скорость истечения газа из факельного оголовка составляет как минимум 20% от скорости звука в сбрасываемом газе (интенсивный сброс [6, с. 7]);
- химический состав и массовый расход сбросного газа, а также его температура перед сжиганием постоянны во времени;
- метеоусловия – температура воздуха, давление, относительная влажность – постоянны во времени (полярная ночь: нет суточного хода метеоэлементов).

В этом случае можно считать, что:

- пламя не отклоняется от вертикали [1, с. 44] и положение центра пламени над факельной горелкой постоянно во времени [1, с. 43];

– скорость лучистого тепловыделения пламени постоянна во времени [6].

Важно понимать, что поверхность тающего снега влажная и в этом случае поглощение излучения в несколько раз (!) сильнее, чем для сухого снега [7, с. 118–120, 122–136]. Аналогично влажный грунт поглощает больше лучистой энергии, чем сухой. Положим также, что снег и факельная площадка дополнительно зачернены сажевым налетом, образующимся как из-за эксплуатации данной ВФУ, так и из-за растущего фоновом уровня загрязнения окружающей среды черным углеродом (ЧУ) [8, 9].

Если снег засолен, то температура его таяния значительно ниже $0\text{ }^{\circ}\text{C}$. Строго говоря, таяние снега происходит не при одной температуре, а в протяженном диапазоне температур, но в основном вблизи точки ликвидуса (полного плавления) [10, с. 458].

Условимся об отсутствии атмосферных осадков. Величину естественного снеготаяния положим нулевой (низкая температура воздуха, бессумеречная полярная ночь, низкая условная температура неба).

Вода в снеге ведет себя следующим образом [10, с. 459]: капиллярная вода, составляющая обычно 15–30% от общей массы снега, удерживается, а гравитационная вода просачивается вниз. В разгар снеготаяния (при естественных условиях) водоотдача снежного покрова в почву почти равна величине снеготаяния, если отсутствуют жидкие осадки [10, с. 69] (выше мы условились о полном отсутствии осадков). Поэтому положим для удобства, что перед пуском ВФУ гравитационная вода в снеге отсутствует, а затем при появлении – мгновенно просачивается сквозь снег в факельную площадку. Теперь можно считать, что влажность снега на факельной площадке быстро достигает водоудерживающей способности (максимальной влажности за счет капиллярной воды) и более не растет.

Примем еще ряд упрощений:

- пламя – точечный ламбертовский (изотропный) излучатель;
- среда между пламенем и облучаемой поверхностью прозрачная и однородная;
- поглощенный лучистый поток от пламени, затраты тепла на таяние снега и поток теплового накопления под облучаемой поверхностью – единственно значимые составляющие теплового баланса облучаемой поверхности;
- снег – непрозрачная воздухонепроницаемая однородная изотропная среда;
- увеличение влажности снега – скачкообразное и происходит в начальный момент времени; плотность и теплопроводность снега постоянны во времени, при этом плотность – низкая, а теплопроводность – максимально возможная при отсутствии гравитационной воды в снеге (делаем прогноз теплоступлений в грунт с запасом);
- испарение и возгонка отсутствуют (делаем прогноз с запасом);
- начальное температурное распределение снежной толщи – равновесное и без градиента по горизонтали;
- геотермическое тепло отсутствует;
- температура грунта на глубине проникновения суточных колебаний одинакова в пространстве и постоянна во времени; сама глубина при этом может расти;
- коэффициент теплопередачи от поверхности факельной площадки к грунту одинаков по всей площадке и постоянен во времени.

Введем цилиндрическую осесимметричную систему координат (r, z) и отсчет времени t , где $r \geq 0$ – расстояние до оси факельного ствола, м; z – высота над поверхностью факельной площадки, м; $t \geq 0$ – время с момента пуска ВФУ, ч. Будем решать однофазную (см. упрощения 4–6) задачу типа Стефана для температурного поля снежной толщи $T = T(r, z, t)$ ($^{\circ}\text{C}$) в области, ограниченной в пространстве радиусом факельной площадки $r_{\max} > 0$ (м), а также поверхностями факельной площадки $z = 0$ и снега $z = h(r, t)$, где $h = h(r, t) \geq 0$ – неизвестный закон изменения высоты снежного покрова, м. Горизонт прогнозирования – время непрерывной работы ВФУ после пуска $t_1 > 0$, ч.

Начальные условия имеют вид (см. упрощение 7)

$$T|_{t=0} = T_{\text{н}} + \Gamma_{\text{н}} \cdot (z - h_{\text{н}}), \quad h|_{t=0} = h_{\text{н}},$$

где T_n – начальная температура поверхности снега, °С; $\Gamma_n = (\partial T/\partial z)|_{t=0}$ – начальный вертикальный градиент температуры (°С/м), который можно найти, используя нижнее граничное условие (см. ниже); $h_n > 0$ – высота нетаявшего снежного покрова, м.

Зафиксируем момент времени t , ч. Пусть $P = (r, z)$ – точка на поверхности снега, т. е. $z = h(r, t)$; $\mathbf{n} = (n_r, n_z)$ единичный вектор внутренней нормали к поверхности снега в точке P , $n_z < 0$. Локальный коэффициент растяжения площади равен секансу ($\sec = 1/\cos$) уклона поверхности, т. е. $|\mathbf{n}|/|n_z| = 1/|n_z|$. Верхнее граничное условие – условие типа Стефана: скорость движения фронта таяния (м/ч) в точке P вдоль \mathbf{n} пропорциональна $q_T \geq 0$ (Вт/м²) – локальным затратам тепла на таяние, удовлетворяющим условию теплового баланса (см. упрощение 3)

$-\lambda \cdot (\partial T/\partial n)|_P + q_T = (1-A)(\mathbf{n} \cdot \mathbf{q})$, $T|_P \leq T_0$, $q_T = 0$ до зарождения фронта: пока $T|_P < T_0$, где $\lambda > 0$ – теплопроводность снега, Вт/(м×°С); A – альbedo поверхности снега, д. е.; $\mathbf{q} = (q_r, q_z)$ – вектор (плотности потока) излучения в точке $P = (r, z)$, Вт/м²; T_0 – температура таяния снега, °С. Облучение точки P – прямое, из центра пламени $F = (0, h_\phi)$ (см. упрощения 1, 2). Поэтому вектор излучения \mathbf{q} коллинеарен вектору $FP = (r, z-h_\phi)$. Согласно закону обратных квадратов, $|\mathbf{q}| = Q_\phi/|FP|^2 = Q_\phi/(r^2 + (h_\phi-z)^2)$, где Q_ϕ – сила (мощность на единичный телесный угол; полный телесный угол – 4π стерадиан) излучения пламени, Вт/ср. Таким образом,

$$\mathbf{q} = (q_r, q_z) = \frac{Q_\phi}{(r^2 + (h_\phi-z)^2)^{3/2}}(r, z-h_\phi).$$

На нижней границе снежного покрова задано граничное условие теплопередачи в грунт (см. упрощения 8–10), на боковых границах – условие теплового равновесия, которое на внутренней боковой границе можно трактовать как условие симметрии, а на внешней – как адиабатическую стенку (идеальную теплоизоляцию):

$$-\lambda \cdot (\partial T/\partial z)|_{z=0} = \alpha \cdot (T_r - T|_{z=0}),$$

$-\lambda \cdot (\partial T/\partial r)|_{r=0} = 0$ до зарождения проталины: пока $h(0, t) > 0$, $\lambda \cdot (\partial T/\partial r)|_{r=r_{\max}} = 0$, где α – коэффициент теплопередачи от поверхности факельной площадки в грунт, Вт/(м²×°С); T_r – температура грунта на глубине проникновения суточных колебаний, °С.

Поглощаемая проталиной мощность $Q_n = Q_n(t)$ (Вт) равна (см. упрощения 3, 4)

$$Q_n(t) = (1-A_n)Q(R_n(t)),$$

где A_n – альbedo проталины, д. е.; $Q(R)$ – лучистый теплоприток (Вт) к горизонтальному кругу радиуса R (м) с центром в точке $(0, 0)$; $R_n(t)$ – неизвестный закон изменения радиуса проталины (м) во времени. Имеем $Q(R) = \Omega(R, h_\phi)Q_\phi$, где $\Omega(R, h_\phi)$ – телесный угол (ср) при вершине прямого кругового конуса с радиусом основания R и высотой h_ϕ . Найдя $\Omega(R, h_\phi)$ по известной в стереометрии формуле, получим

$$Q(R) = \left(1 - \frac{h_\phi}{\sqrt{R^2 + h_\phi^2}}\right) Q_\phi.$$

В табл. 1, 2 приведены входные и выходные переменные модели. В табл. 1 имеются тестовые данные.

Таблица 1

Входные переменные, их тестовые значения и участие в аналитическом расчете

Название	Обозн.	Тестовое значение	Ед. изм.	В ан. расчете
Альbedo поверхности снега	A	0,29 (пропитан водой и загрязнен [7, с. 119])	д. е.	+
Альbedo проталины	A_n	0,01 (сажа: ВФУ эксплуатируется давно)	д. е.	+
Время работы ВФУ	t_1	24	ч	+
Высота нетаявшего снежного покрова	h_n	0,3	м	только для нахождения запаса воды W (см. ниже)

Высота центра пламени над поверхностью факельной площадки	h_{ϕ}	10	м	+
Коэффициент теплопередачи от поверхности факельной площадки к грунту	α	0,1 (в конструкции факельной площадки – теплоизолирующие слои)	Вт/(м ² ×°С)	только для нахождения $\Gamma_{\text{н}}$
Начальная температура поверхности снега	$T_{\text{н}}$	-15	°С	+
Плотность снега	ρ	185,4 (минимальная по формуле Абэ [11, с. 43] – см. упрощение 5)	кг/м ³	+
Радиус факельной площадки	r_{max}	30 (по правилам 2003–2013 гг. [12, с. 193]: ≥ 30 м и ≥ 1 выс. факельного ствола)	м	+
Сила излучения пламени	Q_{ϕ}	200 000 (допустимая [1, с. 43], влияние пламени доминирует над природным потоком тепла – см. упрощение 3)	Вт/ср	+
Температура грунта на глубине проникновения суточных колебаний	$T_{\text{г}}$	-5	°С	только для нахождения $\Gamma_{\text{н}}$
Температура таяния снега	T_0	0 (не засолен)	°С	+
Теплопроводность снега	λ	0,3 (влажный – см. упрощение 5)	Вт/(м×°С)	

Таблица 2

Выходные переменные (по группам) и их участие в аналитическом расчете

Группа	Название	Обозначение	Ед. изм.	В ан. расчете
Картина оттаивания	Высота снежного покрова	$h = h(r, t)$	м	
	Температура снежной толщи	$T = T(r, z, t)$	°С	
Кривые оттаивания	Возможный объем оттаявшей воды в грунте	$V_w = V_w(t)$	м ³	+
	Теплопоступления в грунт	$Q_{\text{г}} = Q_{\text{г}}(t)$	Вт	
	Площадь проталины	$S_{\text{п}} = S_{\text{п}}(t)$	м ²	
	Радиус проталины	$R_{\text{п}} = R_{\text{п}}(t)$	м	

Среди выходных переменных есть кривые оттаивания: радиус $R_{\text{п}} = R_{\text{п}}(t)$ (м) и площадь $S_{\text{п}} = S_{\text{п}}(t) = \pi R_{\text{п}}(t)^2$ (м²) проталины; теплопоступления в грунт $Q_{\text{г}} = Q_{\text{г}}(t)$ (Вт) – такую мощность необходимо отвести от вечной мерзлоты в рамках мероприятий по термостабилизации основания ВФУ, если оттаивание вечномерзлого основания не допускается; возможный объем оттаявшей в воды в грунте $V_w = V_w(t)$ (м³) – столько воды получилось бы из подземного льда, если бы вся лучистая энергия, аккумулированная в грунте с момента пуска ВФУ, пошла только на оттаивание мерзлого грунта. Грунтовой массив объема V (м³) может оттаять при условии $\rho_w V_w \geq LV$, где ρ_w – плотность воды, кг/м³; L – концентрация льда в массиве, кг/м³.

В рамках исследования были проведены прогнозные расчеты двумя методами: численным и приближенным аналитическим. Результаты расчетов на тестовых данных (табл. 1) представлены на рис. 1, 2.

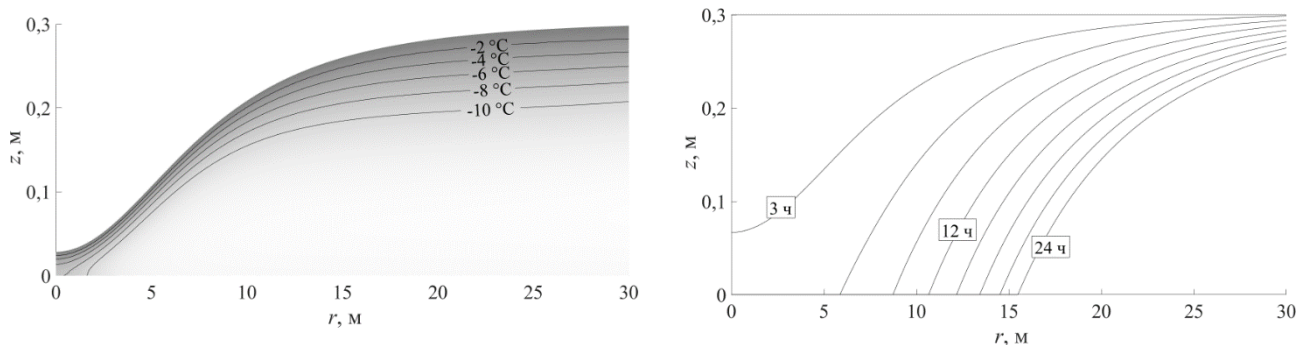


Рис. 1. Картина оттаивания (численный прогноз): слева – форма и тепловое состояние снежной массы через 3,5 ч после пуска ВФУ; справа – радиальные профили высоты снежного покрова с шагом в 3 ч

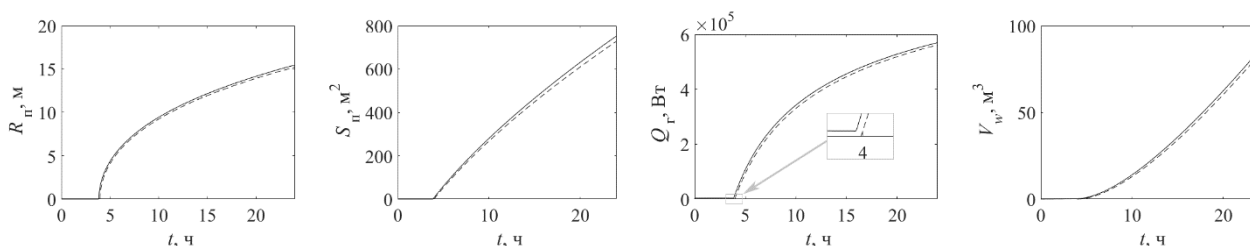


Рис. 2. Кривые оттаивания (слева направо): радиус и площадь проталины, теплоступления в грунт, возможный объем оттаявшей воды в грунте; сплошная линия – численный метод, штриховая – приближенный аналитический метод

Численный метод – метод конечных (контрольных) объемов (МКО), явная схема. Расчетная область – динамическая, дискретизирована неконформной (несогласованной) прямоугольной сеткой: граничные ячейки, по мере продвижении фронта таяния, уменьшаются по высоте и в момент своего полного «таяния» удаляются. Шаг по времени берется адаптивный, с ограничением на величину таяния за один шаг, с «ловлей» моментов полного таяния ячейки, насколько это позволяет минимальный шаг. Постобработка сеточной картины оттаивания представляет собой интерполяцию с центров ячеек на узлы.

Приближенный аналитический метод использует входные данные не в полной мере (см. табл. 1) и предоставляет только кривые оттаивания (см. табл. 2), но зато интегралы в расчетных формулах берутся в элементарных функциях. Для аналитического метода приняты дополнительные упрощения, которые едва ли искажают результат (см. рис. 2):

1. Наличие снежного покрова не влияет на энергетическую освещенность и площадь облучаемой поверхности;

2. Нижняя граница снежного покрова теплоизолирована (параметры α и T_r служат лишь для нахождения Γ_n), поэтому лучистая энергия проникает в грунт только через проталину, откуда $Q_r(t) = Q_n(t)$;

3. Время образования проталины радиуса R (м) равно времени, необходимому пламени для нагревания и плавления тонкой прямоугольной нетаявшей колонки снега в точке $r = R$ при изоляции боковой поверхности колонки.

В численном расчете, чтобы получить гладкие изотермы и плавные переходы на теплокарте-подложке (рис. 1, слева), а также кривые оттаивания, гладкие правее точки зарождения проталины (рис. 2), потребовалась густая расчетная сетка: ось r разбивалась с шагом в 5 см, ось z – 3 мм. Преимуществом численного метода является учет теплопереноса внутри снежного покрова в радиальном направлении.

Приближенный аналитический метод показал хорошую точность: отклонение от численных кривых оттаивания (см. рис. 2) в финале ($t = t_1 = 24$ ч) – менее 3,3%. Оказалось оправданным, что аналитический расчет обходится без λ и использует h_n , только чтобы найти запас воды в снеге $W = h_n(\rho/\rho_w)$ (м): как выявили тесты чувствительности модели, входные

переменные A , A_p , h_f , Q_f и промежуточная переменная W являются определяющими, а λ и h_n (при $W = \text{const}$ за счет выбора ρ) – второстепенными.

Выводы

1. Построена математическая модель системы «ВФУ – снежный покров – грунт». В рамках модели картина оттаивания может быть найдена численно, как решение задачи типа Стефана, а кривые оттаивания – еще и аналитически.

2. Согласно модели, точка зарождения проталины – это точка перехода системы в состояние активной аккумуляции лучистой энергии в грунте.

3. Кривые оттаивания для простых и стабильных условий (гидрометео- и сброса газа) предпочтительнее находить аналитически: в сравнении с численным методом возможен молниеносный расчет, что важно при многовариантном моделировании, и требуется меньше входных данных.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Руководство по безопасности факельных систем. Серия 03. Выпуск 68. – М., 2013. – 48 с.
2. Campbell G.S. et al. Predicting the effect of temperature of soil thermal conductivity // Soil Sci. – Vol. 158. – №5. – P. 307–313.
3. Filimonov M.Yu., Vaganova N.A. Flare Systems Exploitation and Impact on Permafrost // J. Phys.: Conf. Series. – 2017. – Vol. 899. – № 092004.
4. Дмитриева С.П., Кутвицкая Н.Б., Магомедгаджиева М.А. Тепловое влияние излучения горящего газа факельной установки на многолетнемерзлые грунты // Криосфера Земли как среда жизнеобеспечения: Материалы Междунар. конф., посвящ. 95-летию со дня рождения П.И. Мельникова (Пушино, 26–28 мая 2003 г.). – М., 2003. – С. 88–89.
5. Ракова А.И., Кутвицкая Н.Б., Магомедгаджиева М.А. Тепловое взаимодействие системы «Вертикальная факельная установка – многолетнемерзлые грунты основания» с учетом процессов излучения и парообразования // Десятая Междунар. конф. по мерзлотоведению (ТКСОР): Ресурсы и риски регионов с вечной мерзлотой в меняющемся мире. – Том 5: Расширенные тезисы на русском языке. – Тюмень, 2012. – С. 259–260.
6. Методика расчета выбросов вредных веществ в атмосферу при сжигании попутного нефтяного газа на факельных установках. – СПб., 1997. – 42 с.
7. Кузьмин П.П. Физические свойства снежного покрова. – Л.: Гидрометеиздат, 1957. – 180 с.
8. Winiger P. et al. Siberian Arctic black carbon sources constrained by model and observation // Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A. – 2017. – Vol. 114. – № 7. – P. E1054–E1061.
9. Hadley O.L., Kirchstetter T.W. Black-carbon reduction of snow albedo // Nature Climate Change. – Vol. 2. – № 6. – P. 437–440.
10. Котляков В.М. и др. Гляциологический словарь. – Л.: Гидрометеиздат, 1984. – 527 с.
11. Беховых Л.А., Макарычев С.В., Шорина И.В. Основы гидрофизики: учебное пособие. – Барнаул: Изд-во АГАУ, 2008. – 172 с.
12. Правила безопасности в нефтяной и газовой промышленности (ПБ 08-624-03). Серия 08. Выпуск 4. – 3-е изд., испр. – М., 2013. – 310 с.