

8. Новиков Д. А. Гидродинамика нефтегазоносных отложений неокома переходной области от Западно-Сибирского артезианского бассейна к Хатангскому // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. – 2014. – № 2. – С. 24–33.
9. Новиков Д. А. Перспективы нефтегазоносности среднеюрских отложений полуострова Ямал по гидрогеологическим данным // Геология нефти и газа. – 2013. – № 6. – С. 65–74.
10. Сесь К. В., Новиков Д. А. Гидродинамические особенности нефтегазоносных отложений центральной части полуострова Ямал // Бурение и нефть. – 2017. – № 5. – С. 30–35.
11. Новиков Д. А. Геолого-гидрогеологические условия палеозойского фундамента Новопортовского нефтегазо-конденсатного месторождения // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. – 2005. – № 5. – С. 14–20.
12. Новиков Д. А. Геохимия подземных вод апт-альб-сеноманского гидрогеологического комплекса Надым-Тазовского междуречья // Отечественная геология. – 2005. – № 3. – С. 73–82.
13. Новиков Д. А., Лепокуров А. В. Гидрогеологические условия нефтегазоносных отложений на структурах южной части Ямало-Карской депрессии // Геология нефти и газа. – 2005. – № 5. – С. 21–30.
14. Геология и полезные ископаемые России. Т. 2. Западная Сибирь / Под ред. А. Э. Конторовича, В. С. Суркова. – СПб.: ВСЕГЕИ, 2000. – 477 с.
15. Особенности геологического строения и разработки уникальных залежей газа Крайнего Севера Западной Сибири / О. М. Ермилов [и др.]. – Новосибирск: СО РАН, 2004. – 141 с.
16. Кох А. А., Новиков Д. А. Гидродинамические условия и вертикальная гидрогеохимическая зональность подземных вод в западной части Хатангского артезианского бассейна // Водные ресурсы. – 2014. – Т. 41, № 4. – С. 375–386.
17. Шварцев С. Л., Новиков Д. А. Гидрогеологические условия Харампурского метавала // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. – 1999. – № 3. – С. 21–29.
18. Шварцев С. Л., Новиков Д. А. Природа вертикальной гидрогеохимической зональности нефтегазоносных отложений (на примере Надым-Тазовского междуречья, Западная Сибирь) // Геология и геофизика. – 2004. – Т. 45, № 8. – С. 1008–1020.
19. Тектоническое строение и история развития Западно-Сибирской геосинеклизы в мезозое и кайнозое / В. А. Конторович [и др.] // Геология и геофизика. – 2001. – Т. 42, № 11–12. – С. 1832–1845.
20. Novikov D. A., Sukhorukova A. F. Hydrogeology of petroleum deposits in the northwestern margin of the West Siberian Artesian Basin // Arabian Journal of Geosciences. – 2015. – Vol. 8, Issue 10. – P. 8703–8719.

Сведения об авторе

Новиков Дмитрий Анатольевич, к. г.-м. н., заведующий лабораторией гидрогеологии осадочных бассейнов Сибири, Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, доцент кафедры геологии месторождений нефти и газа, Новосибирский национальный исследовательский государственный университет, г. Новосибирск, тел. 8(383)3638036, e-mail: NovikovDA@ipgg.sbras.ru

Information about the author

Novikov D. A., Candidate of Geology and Mineralogy, Head of the Laboratory of Siberian Sedimentary Basins, Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, Associate Professor at the Department of Geology of Oil and Gas Fields, Novosibirsk State University, phone: 8(383)3638036, e-mail: NovikovDA@ipgg.sbras.ru

УДК 551.34

**ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОПРЕДЕЛЕНИЯ
УСТОЙЧИВОСТИ СКЛОНОВ КРИОЛИТОЗОНЫ**

**THERMOMECHANICAL MODEL FOR DETERMINING THE STABILITY
OF THE PERMAFROST ZONE SLOPES**

И. Л. Хабибуллин, Г. А. Нигаметьянова

I. L. Khabibullin, G. A. Nigametuanova

Башкирский государственный университет, г. Уфа

Ключевые слова: мерзлый грунт; радиационный баланс; протаивание; талый слой; устойчивость склона

Key words: frozen ground; radiation balance; thawing; thawed layer; slope stability

Для районов Крайнего Севера являются актуальными исследования устойчивости на поверхности слоя криолитозоны, на котором проявляются процессы термоэрозии и термокарста грунтов. Эти процессы сопровождаются протаиванием и размывом многолетнемерзлых грунтов склона потоками воды. Для определения устойчивости оттаивающего склона, сложенного из мерзлых грунтов, рассматривается термомеханическая модель, включающая механическую и теплофизическую составляющие. Механическая составляющая модели построена на основе баланса сил, действующих на элемент грунта и в процессе его протаивания. Разработанная модель определения устойчивости склонов в процессе протаивания мно-

голетнемерзлых пород позволяет оценить коэффициент устойчивости склонов в зависимости от времени и множества параметров: теплофизических и механических свойств слагающих склон грунтов, составляющих радиационного баланса, экспозиции и угла наклона склона и т. д.

Рассмотрим механическую часть модели. Допустим, что на поверхности склона имеется талый слой, толщиной l . При оттаивании мерзлого грунта исчезает цементирующее действие льда, существенно снижается устойчивость грунта, и становится возможным сползание талого слоя вниз по склону. При этом можно считать, что поверхность скольжения совпадает с поверхностью нижележащих мерзлых пород, то есть потенциальная толщина области сползания грунта равна толщине талого слоя l .

На поверхности склона выделим объем талого грунта толщиной l , единичной длины и ширины. Силы, действующие на этот объем, показаны на рисунке.

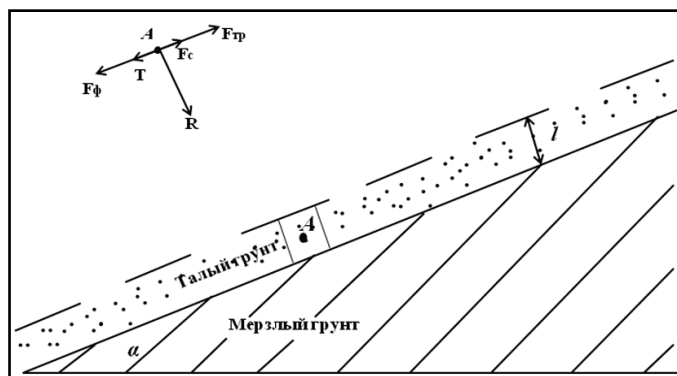


Рисунок. Схема для определения устойчивости склона

Будем считать, что талый слой насыщен водой. В результате действия взвешивающей силы поровой воды нормальная R и касательная T , составляющие веса грунта, уменьшаются.

$$R = (\rho - \rho_B)g \cdot l \cdot \cos \alpha, \quad T = (\rho - \rho_B)g \cdot l \cdot \sin \alpha,$$

где ρ — плотность грунта; ρ_B — плотность воды; α — угол склона; g — ускорение свободного падения.

Тогда сила трения, действующая на выделенный объем, равна

$$F_{тр} = (\rho - \rho_B)g \cdot l \cdot \cos \alpha \cdot \operatorname{tg} \varphi,$$

где φ — угол внутреннего трения частиц грунта.

В общем случае сопротивление объема грунта сдвигу, в соответствии с законом Кулона — Мора, определяется следующим выражением [1]:

$$\tau = F_{тр} + C = (\rho - \rho_B)g \cdot l \cdot \cos \alpha \cdot \operatorname{tg} \varphi + C, \quad (1)$$

где C — сцепление частиц грунта.

Поскольку грунт водонасыщенный, в талом слое возможна фильтрация воды вниз по склону за счет гравитационного напора. Выражение для фильтрационного давления, действующего на выделенный объем грунта, определяется из выражения

$$F_{\phi} = \rho_B \cdot g \cdot i \cdot l = \rho_B \cdot g \cdot l \cdot \sin \alpha,$$

при этом фильтрационный гидравлический градиент i определяется углом откоса. Скорость фильтрации воды вдоль талого слоя определяется по закону Дарси $V = K_{\phi} \cdot \sin \alpha$, где K_{ϕ} — коэффициент фильтрации грунта.

Таким образом, суммарная сдвигающая сила равна

$$F_C = T + F_{\phi} = \rho \cdot g \cdot l \cdot \sin \alpha. \quad (2)$$

Приравнявая (1) и (2), получаем условие равновесия выделенного объема талого грунта

$$F_C \equiv \rho \cdot g \cdot l \cdot \sin \alpha = (\rho - \rho_B) g \cdot l \cdot \cos \alpha \cdot \operatorname{tg} \varphi + C \equiv \tau,$$

Условие устойчивости оттаивающего склона имеет вид

$$\eta = \tau / F_C = \frac{\rho - \rho_B}{\rho} \cdot \operatorname{ctg} \alpha \cdot \operatorname{tg} \varphi + \frac{C}{\rho \cdot g \cdot l \cdot \sin \alpha} \geq 1. \quad (3)$$

Формула (3) позволяет оценить устойчивость склона в зависимости от мощности талого слоя l и прочностных свойств оттаивающего грунта φ и C . Методика определения этих параметров, определяющих сопротивление сдвигу на границе оттаивания, предложена в [2, 3]. Там же рассмотрены их величины с учетом и без учета порового давления.

Формула (3) также позволяет учитывать влияние водонасыщенности грунтов на устойчивость откосов. Так, для несвязанных грунтов $C = 0$ и

$$\eta = \frac{\rho - \rho_B}{\rho} \cdot \operatorname{ctg} \alpha \cdot \operatorname{tg} \varphi.$$

Взвешивающее действие воды снижает нормальное давление вдоль поверхности скольжения и силу трения, в результате уменьшается сопротивление сдвигу.

Из (3) следует, что коэффициент устойчивости склона зависит от толщины талого слоя l , которая постепенно увеличивается в течение теплого периода года. В начале теплого периода $l \rightarrow 0$ и $\eta \rightarrow \infty$, этот предельный случай соответствует склону, сложенному мерзлыми грунтами, который является абсолютно устойчивым.

С увеличением толщины талого слоя устойчивость склона уменьшается. Из условия $\eta = 1$ ($\tau = F_C$) определяется минимальная толщина талого слоя l_{min} , при которой склон теряет устойчивость.

$$l_{min} = \frac{C}{\rho g [\sin \alpha - \cos \alpha \cdot \operatorname{tg} \varphi]}.$$

Склоны, для которых в летний период выполняется условие $l(t) > l_{min}$, становятся неустойчивыми в том смысле, что оттаявший поверхностный слой грунта становится подвижным, и происходит движение этого слоя вниз (оползание, скольжение, спływ). Рассматриваемая выше модель не относится к процессу со-лифлюкции. Очевидно, что в зависимости от температурного режима склона, теплофизических и механических свойств, влажности слагающих склон грунтов время достижения критической толщины талого слоя может варьироваться в достаточно широких пределах и может быть намного меньше продолжительности теплого периода. Поскольку, как правило, время сползания оттаявшего слоя намного

меньше времени протаивания на глубину l_{min} , то в течение летнего периода на склоне может развиваться циклический процесс оттаивание — снос.

В результате суммарная за теплый период мощность сносимого с откоса слоя будет больше, чем глубина сезонного — талого слоя на ненарушенной поверхности. Отметим, что такая ситуация наблюдается на ранней стадии развития термоэрозионных оврагов, когда происходит интенсивное увеличение поперечного сечения оврагов за счет отступания бортов [4, 5].

Рассматриваемая модель коррелируется с результатами работы [6], в которой показана возможность развития циклических процессов оттаивание — снос на основе представлений о термомеханическом оттаивании грунтов.

Рассмотрим теплофизическую часть модели для определения толщины талого слоя l . Тепловой поток в оттаивающий мерзлый грунт за теплый период года определяется из выражения

$$q = \lambda_T \frac{\partial T}{\partial z} = \lambda_T \frac{T_{II} - T_{\Phi}}{l(t)}, \quad (4)$$

где T_{II} — температура на дневной поверхности; T_{Φ} — температура плавления льда; $l(t)$ — поверхность оттаивания грунта (толщина талого слоя); λ_T — теплопроводность талого грунта. Движение поверхности протаивания грунта в приближении Лейбензона определяется из уравнения теплового баланса [7]

$$\lambda_T \frac{T_{II} - T_{\Phi}}{l(t)} - \lambda_M \frac{T_{\Phi} - T_0}{\sqrt{\pi a_M t}} = Q_{\Phi} \frac{dl}{dt}, \quad Q_{\Phi} = \rho_L LG, \quad (5)$$

где ρ_L, L — плотность и удельная теплота плавления льда; G — льдистость грунта; λ_M, a_M и T_0 — теплопроводность, температуропроводность и начальная температура мерзлого грунта.

Для нахождения температуры на дневной поверхности T_{II} используем условие радиационно-теплового баланса на этой поверхности [8]

$$R - LE - q = \alpha(T_{II} - T_B), \quad (6)$$

где R — радиационный баланс; LE — затраты тепла на испарение; q — тепловой поток в грунт; α — коэффициент конвективного теплообмена на границе грунт — атмосфера. Из (6) имеем

$$\beta = 5,26 \cdot 10^{-10} \left(\frac{M}{\sqrt{c}} \right).$$

Преобразуем это выражение с учетом (3, 4)

$$T_{II} = T_B + \frac{R - LE}{\alpha} - \frac{\lambda_T (T_{II} - T_{\Phi})}{\alpha \cdot l(t)}.$$

Отсюда находим температуру на поверхности грунта

$$T_{II} = \frac{T_B + \frac{R - LE}{\alpha} + \frac{\lambda_T T_{\Phi}}{\alpha \cdot l(t)}}{1 + \frac{\lambda_T}{\alpha \cdot l(t)}}. \quad (7)$$

Если тепловой поток в грунт не учитывается ($\lambda_T = 0$), из (7) следует выражение для приведенной температуры поверхности

$$T_{II}^* = T_B + \frac{R - LE}{\alpha}. \quad (8)$$

Выражение (8) показывает отличие температуры поверхности грунта и температуры воздуха за счет радиационной поправки и предлагается как граничное условие на поверхности [9, 10].

Для определения величины среднемесячных или среднелетних значений коэффициента конвективного теплообмена можно использовать ряд эмпирических уравнений:

уравнение А. В. Павлова [8]: $\alpha = 1,16\sqrt{U} \left(7 + \frac{7,2}{U^2}\right);$

уравнение Бютнера [8]: $\alpha = 2,67 + 5,68\sqrt{U};$

формулы Юргенса [8]: $\alpha = 6,16 + 4,19U, 0 < U < 5;$
 $\alpha = 7,56 \cdot U^{0,78}, 5 < U < 30.$

В этих уравнениях U — скорость ветра (м/с) на высоте 1 м, коэффициент теплообмена α имеет размерность Вт/м²·К.

Подставляя (7) в (5), получим уравнение для определения $l(t)$

$$\frac{\lambda_T(T_{II}^* - T_\Phi)}{l(t) + \frac{\lambda_T}{\alpha}} - \frac{\lambda_M(T_\Phi - T_0)}{\sqrt{\pi a_M t}} = Q_\Phi \frac{dl}{dt}. \quad (9)$$

Уравнение (9) является нелинейным и может быть решено только численно, при этом температура воздуха T_B и величина радиационного баланса R принимаются в виде непрерывной или кусочно-линейной функции времени на основе аппроксимации данных метеорологических наблюдений.

Уравнение (9) допускает аналитическое решение при следующих частных случаях [11]. Если не учитывается тепловой поток в области мерзлого грунта ($T_0 = T_\Phi$), из (9) следует уравнение для $l(t)$

$$l^2 + \frac{2\lambda_T l}{\alpha} - \frac{2\lambda_T(T_{II}^* - T_\Phi)t}{Q_\Phi} = 0. \quad (10)$$

Решение этого уравнения имеет вид

$$l(t) = \sqrt{N t + M^2} - M, \quad M = \frac{\lambda_T}{\alpha}, \quad N = \frac{2\lambda_T(T_{II}^* - T_\Phi)}{Q_\Phi}. \quad (11)$$

Отметим, что при $M = 0$ выражение (11) совпадает с формулой, приведенной в СНИП 2.02.04–88 [10], если еще принять $T_{II} = T_B$, то есть не учитывать радиационную поправку, из (11) следует классическая формула Стефана [7].

Очевидно, что расчет по формуле (11) предполагает осреднение температуры T_B в (8) за теплый период или ее представления в виде кусочно-линейной функции времени (осреднение по месяцам или декадам).

Уравнение (9) при $T_\phi = T_0$ допускает решение и в случае задания температуры воздуха в виде непрерывной функции времени, например в виде положительной ветви синусоидального профиля годовой температуры воздуха $T_B(t)$. При этом годовой ход температуры воздуха задается функцией

$$T_B(t) = T_C + A_O \sin\left(\frac{2\pi}{365}t + \varphi_O\right),$$

где t — время в сутках; T_C — среднегодовая температура воздуха; A_O — амплитуда колебаний температуры воздуха; φ_O — сдвиг фаз колебаний во времени. Данная аппроксимация предполагает, что в течение года выделяется три периода: холодные периоды (среднесуточная температура отрицательная) — в начале и в конце года, теплый период (среднесуточная температура положительна) — в середине года.

В общем случае, когда учитывается тепловой поток в область мерзлого грунта $T_0 \neq T_\phi$, решается уравнение (9), в котором T_{II}^* определяется согласно уравнению

$$T_{II}^* = T_B + \frac{R - LE}{\alpha} = T_C + (A_O + A_O') \sin\left(\frac{2\pi}{365}t + \varphi_O\right), \quad (12)$$

где $A_O' = \frac{\pi}{2}T_C'$, T_C' — осредненная за теплый период года величина $\frac{R - LE}{\alpha}$.

Таким образом, на основе предложенной модели составлена программа для ЭВМ расчета коэффициента устойчивости склонов, реализация которой позволяет дать оценку устойчивости склоновых поверхностей, подстилающих многолетне-мерзлые грунты, в зависимости от региональных теплофизических и гидрометеорологических параметров. Эти оценки, в свою очередь, служат для обоснования технических и проектных решений при строительстве различных объектов в криолитозоне.

Предложенная модель может быть уточнена за счет учета экспозиции и угла наклона склона. При этом можно использовать аналитические зависимости и справочные данные, приведенные в работах [12, 13]. Дальнейшее обобщение рассмотренной выше модели при наличии слоя несливающейся мерзлоты можно провести на основе модели, развитой в [14, 16], в которой рассматривается влияние снегонакопления на склоне на динамику талой зоны.

Библиографический список

1. Калинин Э. В. Инженерно-геологические расчеты и моделирование. — М.: Изд-во МГУ, 2006. — 256 с.
2. Царапов М. Н. Оценка устойчивости откосов, сложенных оттаивающими грунтами // Геоэкология. — 2011. — № 1. — С. 63–74.
3. Царапов М. Н. Формирование прочностных характеристик грунтов в процессе оттаивания // Вестник МГУ. Серия 4: Геология. — 2007. — № 6. — С. 31–34.
4. Экологические основы землепользования при освоении и разработке газовых и газоконденсатных месторождений Крайнего Севера / А. Г. Ананенков [и др.]. — М.: Наука, 2000. — 316 с.
5. Термозрозия дисперсных пород. — М.: Изд-во Моск. ун-та, 1982. — 193 с.
6. Марахтанов В. П. Термомеханическое оттаивание грунтов (понятие и методика расчета) // Криосфера Земли. — 2006. — Т. X, № 4. — С. 59–67.
7. Основы геокриологии. Ч. 4. Динамическая геокриология. — М.: Изд-во МГУ, 2001. — 688 с.
8. Павлов А. В. Теплофизика ландшафтов. — М.: Наука, 1979. — 283 с.
9. Перлыштейн Г. З. Теплообмен деятельного слоя с атмосферой: теоретические и прикладные аспекты // Криосфера Земли. — 2002. — Т. VI, № 1. — С. 25–29.
10. СНиП 2.02.04–88 Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах.

11. Хабибуллин И. Л., Закирова Г. А. Моделирование протаивания мерзлого грунта под теплоизоляционными слоями // Вестник Башкирского университета. – 2014. – Т. 19, № 4. – С. 1131–1139.
12. Кондратьев К. Я., Пивоварова З. И., Федорова Н. И. Радиационный режим наклонных поверхностей. – Л.: Гидрометеониздат, 1982. – 215 с.
13. Справочник по климату СССР. Ч. 1. Радиация. Выпуски 1–34. – Л.: Гидрометеоиздат, 1968–1970.
14. Хабибуллин И. Л., Солдаткин М. В. Динамика промерзания сезонно-талого слоя криолитозоны с учетом наличия снежного покрова // Вестник Башкирского университета. – 2012. – Т. 17, № 2. – С. 843–846.
15. Хабибуллин И. Л., Хусаинова З. Р., Лобастова С. А. Термогидрадинамическое моделирование процесса термомозрозии грунтов криолитозоны // Обозрение прикладной и промышленной математики. – 2005. – Т. 12, № 4. – С. 1118.
16. Хабибуллин И. Л., Нигаметьянова Г. А. Термомеханическая модель определения устойчивости многослойных склонов криолитозоны // Фундаментальная математика и ее приложения в естествознании. Сб. тезисов докладов VIII Междунар. школы-конференции для студентов, аспирантов и молодых ученых. – Уфа: БашГУ, 2015. – 316 с.

Сведения об авторах

Хабибуллин Ильдус Лутфурахманович, д. ф.-м. н., профессор кафедры прикладной физики, Башкирский государственный университет, г. Уфа, тел. 8(347)2735162, e-mail: habibi.bsu@mail.ru

Нигаметьянова Гузель Аниловна, аспирант кафедры прикладной физики, Башкирский государственный университет, г. Уфа, тел. 89603984026, e-mail: gyzelua@mail.ru

Information about the authors

Khabibullin I. L., Doctor of Physics and Mathematics, Professor at the Department of Applied Physics, Bashkir State University, Ufa, phone: 8(347)2735162, e-mail: habibi.bsu@mail.ru

Nigmatjanova G. A., Postgraduate at the Department of Applied Physics, Bashkir State University, Ufa, phone: 89603984026, e-mail: gyzelua@mail.ru

Бурение скважин и разработка месторождений

УДК 622.691.553

ПОДЗЕМНЫЕ ХРАНИЛИЩА ГАЗА, ОБЩАЯ КЛАССИФИКАЦИЯ GENERAL CLASSIFICATION OF UNDERGROUND GAS STORAGES

Ш. А. Арсан, А. К. Ягафаров, Ю. В. Ваганов

Sh. A. Arsan, A. K. Yagafarov, Yu. V. Vaganov

Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень

*Ключевые слова: хранение газа; подземное хранилище газа; объем; классификация
Key words: gas storing; Underground Gas Storage; size; classification*

Подземные хранилища природного газа (Underground Gas Storage) являются неотъемлемой составляющей энергетической системы страны. В настоящее время не только добыча, но и хранение газа — вопрос довольно проблемный [1]. Большую часть газа потребляют города и промышленность, удаленные от газовых месторождений, поэтому от мест добычи газа до потребителей прокладывают газопроводы континентальных масштабов. Добыча газа происходит постоянно, но в медленном темпе. Таким образом, количество добываемого газа не может удовлетворить потребности населения в летний и зимний периоды в равной степени.

В мире насчитывается более 600 подземных хранилищ газа (ПХГ) с рабочим объемом газа более 340 млрд м³, из них 200 млрд м³ от общего рабочего объема газа находятся в Европе и Центральной Азии.

Количество подземных хранилищ газа возросло после Второй мировой войны. Для того чтобы удовлетворить увеличение сезонного спроса, производительность трубопроводов (и, соответственно, их размер), пришлось бы резко увеличить.