



ВЛИЯНИЕ КОНВЕКЦИИ ВОЗДУХА В СНЕЖНОМ ПОКРОВЕ НА ПРОМЕРЗАНИЕ ЛЕЖАЩЕГО ПОД НИМ ГРУНТА

✉Богородский П.В., Сидорова О.Р.

ФГБУ «ААНИИ», Санкт-Петербург, Россия

✉bogorodski@aari.ru

Рассмотрена задача промерзания грунта, учитывающая конвекцию воздуха в его снежном покрове под влиянием температурного градиента. С использованием термодинамической модели получены количественные характеристики процесса при средних значениях входных параметров задачи. Показано, что влияние движений воздуха в снежных порах соизмеримо должно учитываться при расчётах наряду с метеорологическими факторами и теплофизическими свойствами замерзающих сред. Исползованная модель может использоваться для расчёта образования плавучих льдов на поверхности водоёмов.

Ключевые слова: промерзание грунта, снежный покров, термическая конвекция

Общепринятый подход к математическому моделированию промерзания грунта не учитывает конвективный механизм теплопереноса в порах напочвенных покровов, несмотря на то, что реальные градиенты температур в снежном и растительном слоях могут превышать значения, необходимые для начала конвекции более, чем на порядок [Жекамухов и Жекамухова, 2002]. Исключение составляет исследование [Жекамухова, 2006] в котором в предположении постоянной глубины снега с использованием метода малого параметра было получено приближённое аналитическое решение задачи.

В настоящей работе для анализа эффективности конвективного теплопереноса в растущем снежном покрове использована постановка задачи, аналогичная [Жекамухова, 2006]. Уравнение для расчёта основной характеристики процесса, движения фронта промерзания грунта с учётом конвекции может быть записано в виде

$$\frac{d\xi(t)}{dt} = -\frac{Q}{\rho_g LW} + \frac{\lambda_g}{\rho_g LW} \frac{T_a}{\xi(t) + (\lambda_g h_s / \lambda_s)[(\exp(b) - 1)/b]}. \quad (1)$$

Здесь $\xi(t)$ – глубина промерзания грунта; t – время; Q – поток тепла к нижней поверхности мёрзлого слоя; ρ_g – плотность мёрзлого грунта; L – объёмная теплота фазовых превращений; W – влажность грунта; $\lambda_s = 0.138 - 1.01\rho_s + 3.233\rho_s^2$; и λ_s и ρ_s – плотность и коэффициент теплопроводности снега, соответственно; T_a – температура воздуха; $h_s = n\xi(t)$ – глубина снега; n – постоянная; $b = Mu h_s / \chi_s^*$ – коэффициент, характеризующий соотношение между конвективным и молекулярным переносом тепла (число Пекле); $M = (\varepsilon\rho_a c_a / \rho_s c_s)(1 + L_w^2 \rho_{w0} / R_w \Theta_0^2 \rho_a c_a)$ – коэффициент, учитывающий процессы конденсации и испарения пара при движении воздуха; $\varepsilon = 1 - \rho_s / \rho_i$ – пористость снега; c_a и c_s – коэффициенты удельной теплоёмкости воздуха и снега; ρ_a – плотность воздуха; R_w – газовая постоянная водяного пара; $\Theta_0 = 273.15\text{K}$ – константа; L_w – удельная теплота испарения льда; ρ_{w0} – насыщающая плотность пара при 0°C ; $u = \varepsilon\beta g K(T_0 - T_a)/\nu$ – средняя скорость движения воздуха в снежном покрове; ν и β – коэффициенты кинематической вязкости и теплового расширения воздуха, соответственно; g – ускорение силы тяжести; $\chi_s^* = (\lambda_s / \rho_s c_s)(1 + L_w^2 \rho_{w0} \lambda_s / R_w D_w \Theta_0^2)$ – эффективный коэффициент температуропроводности; $K = 0.77d^2 \exp(-0.078\rho_s)$ – проницаемость снега; d – диаметр частиц снега; оводности снега; D_w – коэффициент диффузии водяного

пара в воздухе; $T_0 = \xi(t)\lambda_s T_a / (\lambda_g h_s + \xi(t)\lambda_s)$ - температура границы «снег-лёд» [Жекамухов и Шухова, 1999; Sommerfeld and Rocchio, 1993; Sturm et al., 1997]. Нетрудно заметить, в отсутствии снега соотношение (1) переходит в классическое уравнение Стефана для определения глубины промерзания пород.

Рассматривая, для определённости, условия прибрежной зоны о. Западный Шпицберген, в качестве средних значений входных параметров задачи можно выбрать величины $T_a = -10^\circ\text{C}$; $\rho_s = 300 \text{ кг/м}^3$; $W = 0.2$; $\rho_g = 2000 \text{ кг/м}^3$; $n = 0.1$; $d = 0.001 \text{ м}$; $Q = 0.1 \text{ Вт/м}^2$ [Осокин и Сосновский, 2014]. Незначительный растительный покров грубодисперсных пород, типичных для данного района, из-за своего малого влияния на темпы промерзания, полагался отсутствующим. Для принятых аппроксимаций теплофизических характеристик снега и грунта средние значения параметров задачи составили $\chi_s^* \approx 7.16 \times 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$; $M \approx 2.641 \times 10^{-3}$; $u \approx 9.51 \times 10^{-4} \text{ м/с}$; $\varepsilon \approx 0.673$; $K \approx 7.417 \times 10^{-9} \text{ м}^2$, что достаточно близко к данным измерений, приведённых в [Жекамухов и Шухова, 1999].

Представление о глубине промерзания в течение первых 30 сут. в зависимости от скорости воздуха при средних значениях других входных параметров задачи даёт Табл. 1. В отличие от работы [Жекамухова, 2006], для их расчёта разложения в ряды не использовалось

Таблица 1. Динамика глубины промерзания грунта, м на 5, 10, 15, 20, 25 и 30-ые сутки с начала льдообразования

t , сутки u , м/с	5	10	15	20	25	30
0	0.254	0.360	0.441	0.509	0.569	0.624
10^{-4}	0.255	0.360	0.441	0.510	0.570	0.624
10^{-3}	0.256	0.363	0.445	0.515	0.576	0.632
10^{-2}	0.267	0.384	0.475	0.553	0.623	0.686

и уравнение (1) решалось численно. Как видно, зависимости темпов промерзания от скорости частиц u имеют нелинейный характер, причём скоростям воздуха до 10^{-3} м/с соответствуют темпы льдообразования, практически равные её нулевым значениям. Влияние конвекции начинает проявляться примерно при $u \geq 10^{-2} \text{ м/с}$. Следует отметить, что из-за принятой параметризации снегонакопления, более адекватно описывающих его динамику чем [Жекамухова, 2006], разброс глубин снега на 30-ые сут. достигал 7 мм. Несмотря на сравнительно малую величину, наличие таких вариаций можно отнести к издержкам принятой постановки задачи, не имеющих, впрочем, принципиального значения, однако затрудняющих сравнение полученных результатов, особенно при высоких скоростях воздуха. Принципиально важный вопрос о максимальных величинах u остаётся открытым; пока можно лишь предположить, что при понижении температуры воздуха они могут превосходить значение 10^{-2} м/с и, следовательно, оказывать ещё большее влияние на движение фазового фронта, соизмеримое с влиянием других внешних и внутренних параметров задачи [Хабибуллин, Солдаткин, 2012]. Таким образом, наряду с метеорологическими факторами и теплофизическими свойствами снега и грунта, на промерзание грунта может оказывать и конвективное движение воздуха в порах снежного покрова.

Использованный подход может быть также применён для расчёта эволюции плавучих льдов, нахождение которых на поверхности водоёмов обеспечивает существование необходимого для движения воздуха температурного градиента.

ЛИТЕРАТУРА

Жекамухов М.К., Жекамухова И.М. О конвективной неустойчивости воздуха в снежном покрове // Инженерно-физический журнал. 2002. Т. 75. № 4. С. 65–72.

Жекамухов М.К., Шухова Л.З. Конвективная неустойчивость воздуха в снеге // Прикладная механика и техническая физика. 1999. Т. 40. № 6. С. 54–59.

Жекамухова И.М. Расчет глубины промерзания почвы под снежным покровом с учётом конвекции воздуха в толще снега // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2006. № 2 (16). С. 28–36.

Осокин Н.И., Сосновский А.В. Экспериментальные исследования коэффициента эффективной теплопроводности снежного покрова на Западном Шпицбергене // Лёд и Снег. 2014. № 3 (127). С. 50–58. doi: 10.15356/2076-6734-2014-3-50-58

Хабибуллин И.Л., Солдаткин М.В. Динамика промерзания сезонного-талого слоя криолитозоны с учетом наличия снежного покрова // Вестник Башкирского университета. 2012. Т. 17 (2). С. 843–846.

Sommerfeld R.A., Rocchio J.E. Permeability measurements on new and equitemperature snow // Water Resources Research. 1993. Vol. 29. Is. 8. P. 2485–2490. doi: 10.1029/93WR01071

Sturm M., Holmgren J., Konig M., Morris K. The thermal conductivity of seasonal snow // Journal of Glaciology. 1997. Vol. 43. Is. 143. P. 26–41. doi:10.3189/S0022143000002781

THE IMPACT OF AIR CONVECTION IN SNOW COVER ON THE UNDERLYING GROUND FREEZING

Bogorodskiy P.V., Sidorova O.R.

Arctic and Antarctic Research Institute, St. Petersburg, Russia

The problem of soil freezing was examined with consideration of air convection within the snow cover driven by temperature gradients. Quantitative characteristics of the process were derived using a thermodynamic model. The results show that the impact of convective air motion in snow pores on the freezing depth is comparable to that of another input parameters of problem. Consequently, this effect should be included in calculations alongside meteorological factors and the thermal properties of the freezing media. It is also demonstrated that the proposed model can be applied to simulate the freezing of floating ice on the surfaces of water bodies.

Keywords: *ground freezing, snow cover, thermal convection*

REFERENCES:

Zhekamuhov M.K., Zhekamuhova I.M. On convective instability of air in snow cover // J. Engineering Physics and Thermophysics. 2002. Vol. 75. № 4. P. 65–72 (in Russian).

Zhekamuhov M.K., Shukhova L.Z. Convective instability of air in snow // J. Applied Mechanics and Technical Physics. 1999. Vol. 40. № 6. P. 54–59 (in Russian).

Zhekamuhova I.M. Estimation of the depth of the soil freezing under the layer of snow considering the air convection in the mass of the snow // News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of the RAS. 2006. № 2 (16). P. 28–36. (in Russian).

Osokin N.I., Sosnovsky A.V. Field investigation of efficient thermal conductivity of snow cover on Spitsbergen // Ice and Snow. 2014. № 3 (127). P. 50–58. doi: 10.15356/2076-6734-2014-3-50-58 (in Russian).

Khabibullin I.L., Soldatkin M.V. Dynamics of freezing of the seasonal-thyawed layer of the cryolithozone taking into account the presence of snow cover // Bulletin of the Bashkir University. 2012. Vol. 17 (2). P. 843–846 (in Russian).

Sommerfeld R.A., Rocchio J.E. Permeability measurements on new and equitemperature snow // Water Resources Research. 1993. Vol. 29. Is. 8. P. 2485–2490. doi: 10.1029/93WR01071

Sturm M., Holmgren J., Konig M., Morris K. The thermal conductivity of seasonal snow // Journal of Glaciology. 1997. Vol. 43. Is. 143. P. 26–41. doi:10.3189/S0022143000002781