

УДК 551.341

DOI 10.17513/use.38207

ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ТОРФОВ И ЗАТОРФОВАННЫХ ПЕСЧАНЫХ ГРУНТОВ

Протодияконова Н.А., Степанов А.В., Тимофеев А.М.,
Кравцова О.Н., Таппырова Н.И.

*ФГБУН ФИЦ «Якутский научный центр» Сибирского отделения Российской академии наук,
Институт физико-технических проблем Севера имени В.П. Ларионова Сибирского отделения
Российской академии наук, Якутск, e-mail: o.n.kravtsova@iptpn.yasn.ru*

Большое количество заторфованных грунтов на территории Российской Федерации, особенно в Арктической зоне, обуславливает необходимость изучения их температурного режима и теплофизических свойств. В этой работе приводятся экспериментальные данные по определению пористости, теплопроводности и количества незамерзшей воды песчаных грунтов с различной степенью содержания торфа. Экспериментальные исследования проводились на образцах с нарушенной структурой, которые были представлены слабо разложившимся торфом, среднезернистым речным песком и их различными смесями. Установлено, что степень заторфованности влияет на такие физические величины, как пористость, теплопроводность и количество незамерзшей воды. Для талых заторфованных песчаных грунтов при увеличении степени заторфованности значение пористости увеличивается. Как для талых, так и для мерзлых заторфованных песчаных грунтов теплопроводность с увеличением степени заторфованности уменьшается. При этом теплопроводность для мерзлых грунтов выше, чем для талых. Количество незамерзшей воды также зависит от степени заторфованности грунта и при ее увеличении уменьшается. Измеренные теплофизические свойства заторфованного песчаного грунта могут быть использованы при моделировании температурного режима в зоне распространения мерзлых и талых торфяных грунтов.

Ключевые слова: мерзлые грунты, талые грунты, песчаный заторфованный грунт, количество незамерзшей воды, теплопроводность, пористость, степень заторфованности

THERMOPHYSICAL PROPERTIES OF PEAT AND PEATY SAND SOILS

Protodyakonova N.A., Stepanov A.V., Timofeev A.M.,
Kravtsova O.N., Tappyrova N.I.

*Yakutsk Science Center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
V.P. Larionov Institute of Physical-Technical Problems of the North of the Siberian Branch
of the Russian Academy of Sciences, Yakutsk, e-mail: o.n.kravtsova@iptpn.yasn.ru*

The large amount of peaty soils on the territory of the Russian Federation, especially in the Arctic zone, necessitates the study of their temperature regime and thermophysical properties. The paper presents the results of an experimental study of the thermal conductivity and amount of unfrozen water in sandy soils with varying degrees of peat content. Experiments were carried out on samples with a damaged structure, which were represented by slightly decomposed peat, medium-grained river sand and their various mixtures. It has been established that the degree of peat content affects such physical values as porosity, thermal conductivity and the amount of unfrozen water. For thawed peaty sandy soils, as the degree of peat content increases, the porosity value increases. For both thawed and frozen peaty sand soils, thermal conductivity decreases with increasing degree of peat content. Moreover, the thermal conductivity for frozen soils are higher than for thawed soils. The amount of unfrozen water also depends on the degree of peat in the soil and decreases as it increases. The measured thermophysical properties of peaty sand soil can be used to model the temperature regime in the area of frozen and thawed peat soils.

Keywords: frozen soils, thawed soils, peaty sand soil, amount of unfrozen water, thermal conductivity, porosity, degree of peat

В Российской Федерации широко распространены торфяные грунты, причем на территории криолитозоны расположено более 80% таких грунтов. В этой зоне идет интенсивное освоение месторождений полезных ископаемых, строительство газопроводов, также эксплуатируется большое количество зданий и инженерных сооружений. Предугадать изменение теплофизических свойств торфяных грунтов довольно сложно. Основные трудности при освоении

заторфованных территорий обусловлены высокой степенью их обводненности, сжимаемости и недостаточными сведениями о физико-механических свойствах, температурном режиме протекания мерзлотных процессов. Поэтому целью данной работы является экспериментальное изучение теплофизических свойств талых и мерзлых заторфованных песчаных грунтов.

Торфяные грунты в талом и мерзлом состоянии в последнее время изучались

такими российскими исследователями, как Р.И. Гаврильев, Л.Т. Роман, а также зарубежными учеными [1–4]. В работах Р.И. Гаврильева приводится модель расчета теплопроводности четырехкомпонентной оболочечной системы, которая учитывает содержание органического вещества и позволяет сделать прогноз теплофизических характеристик в талом и мерзлом состояниях при полном влагонасыщении грунта [1]. Результаты многолетних исследований Л.Т. Роман мерзлых заторфованных грунтов обобщены в монографии [2], где приводятся экспериментально полученные данные физико-механических и тепловых свойств. На основе полученных данных делается предложение для использования мерзлых заторфованных грунтов в качестве оснований зданий и сооружений.

В работе [3] были получены экспериментальные данные теплофизических свойств шести почвенных торфяно-минеральных смесей, охватывающих широкий диапазон влажности и объемной плотности. На основе этих данных была предложена новая обобщенная модель определения теплопроводности. Модель учитывает влияние пористости, степени насыщения, содержания органического вещества и дисперсности грунта на теплопроводность.

Авторы работы [4] на основе лабораторных экспериментов на илисто-органических почвенных смесях проанализировали влияние температуры грунта, его влагосодержания и содержания органического вещества на теплопроводность грунта в талом и мерзлом состояниях. На основе экспериментального и теоретического анализа авторы установили эмпирическую формулу теплопроводности почвы с учетом вышеперечисленных факторов.

В работе [5] рассматривается изменение тепловых свойств заторфованных песчаных грунтов от степени загрязнения нефтепродуктами.

Материалы и методы исследования

Ранее авторами были проведены исследования теплопроводности в талом и мерзлом состояниях для мелкодисперсных и крупнодисперсных грунтов, а также была разработана методика расчета теплопроводности с учетом количества незамерзшей воды и засоленности [6]. Дальнейшее изучение грунтов было вызвано необходимостью исследования торфяных грунтов. Поэтому целью данной работы являются лабораторные исследования теплофизи-

ческих свойств заторфованных песчаных грунтов в талом и мерзлом состояниях. Для этого были взяты образцы с нарушенной структурой, которые были представлены слаборазложившимся торфом, среднезернистым речным песком и их различными смесями. Заторфованность N грунтов задавалась различным содержанием торфа в песчаном грунте:

- чистый речной песок $N = 0$;
- речной песок с добавлением торфа $N = 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,6$;
- торф $N = 1$.

Теплофизические характеристики определялись на установке, разработанной в лаборатории теплофизики ИФТПС СО РАН. Принципиальная схема установки приведена в работе [7]. Измерительная ячейка, заполненная исследуемым материалом, помещается в холодильную установку, где охлаждается до нужной отрицательной температуры и выдерживается в ней более суток. За это время влага, находящаяся в образце, практически приходит в равновесное состояние. Далее, измерительная ячейка с грунтом помещается в охлажденный сосуд Дьюара. Затем сосуд переносится на стенд установки, где разогревается постоянным тепловым потоком. При этом снимается термограмма (рис. 1).

Из рис. 1 видно, что в начальной стадии (I) имеется нестационарный участок нагрева. В этой стадии нагрева наступает квазистационарный режим. Затем по мере повышения температуры квазистационарный режим превращается в монотонный (II) в связи с таянием порового льда. Эта стадия зависимости от вида материала начинается при различной температуре. Далее, в образцах, увлажненных выше молекулярной влагоемкости, при малой мощности подводимого тепла на поверхности образца наступает стационарный режим, т.е. все тепло, подводимое на поверхность образца, расходуется только на фазовый переход льда. Позднее в образце появляется граница раздела талой и мерзлой зон. В этой стадии образец нельзя уже считать термоизотропным телом (III). Затем образец полностью оттаивает, и спустя некоторое время опять наступает квазистационарный режим (IV).

Такое дифференцированное рассмотрение процесса оттаивания образца дает возможность применить существующий метод определения теплофизических характеристик влажных дисперсных материалов для каждой стадии нагрева.

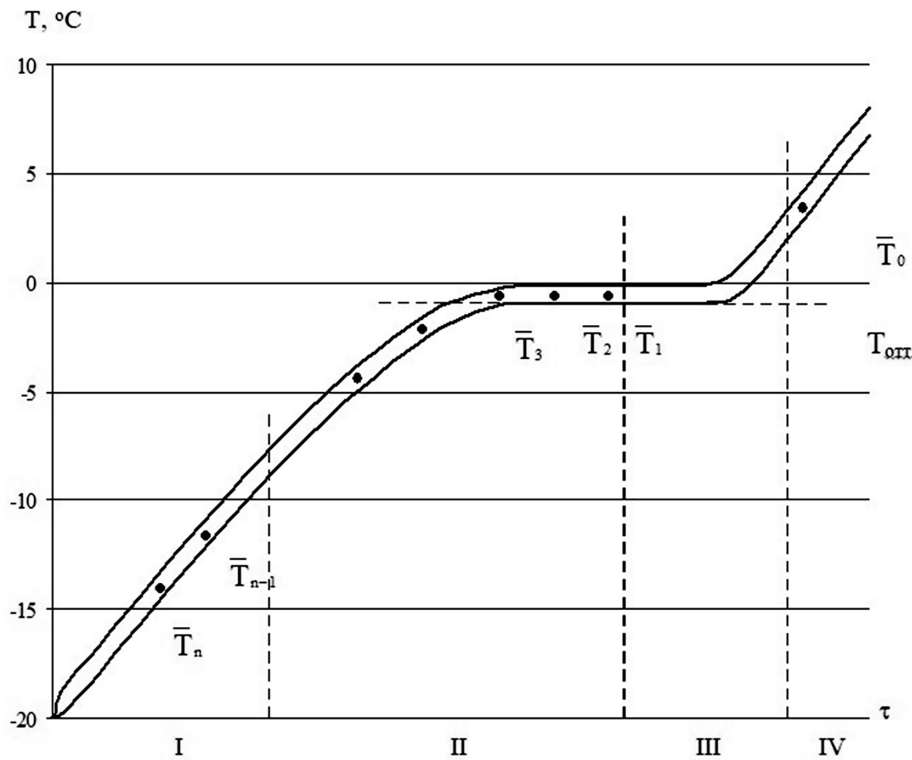


Рис. 1. Термограмма процесса замораживания – оттаивания
 \bar{T}_n – среднеобъемная температура; $T_{отт}$ – температура оттаивания

На квазистационарных участках нагрева теплопроводность вычисляется по формуле

$$\lambda = \frac{qR}{2\Delta T}(1 - \Delta\varepsilon), \quad (1)$$

где q – удельная мощность нагрева на единицу поверхности; R – радиус образца; ΔT – разность температуры между поверхностью и осью образца; $\Delta\varepsilon$ – поправка на теплоемкость нагревателя и измерительной ячейки.

Для определения теплопроводности в II-й стадии предлагается использовать

решение нелинейного уравнения теплопроводности, учитывая теплоту фазовых переходов воды в виде стоков тепла:

$$\nabla^2 t + \frac{1}{\lambda} \frac{d\lambda}{dt} \left(\frac{\partial t}{\partial \tau} \right)^2 = \frac{1}{a} \frac{\partial t}{\partial \tau} - \frac{\omega}{\lambda}, \quad (2)$$

где ω – удельная мощность объемных стоков тепла.

При решении уравнения (2) использован метод последовательных приближений и получена следующая расчетная формула для коэффициента теплопроводности [7]:

$$\lambda_0 = \frac{qR}{2\Delta T}(1 - \varepsilon_0) \left(1 + \frac{1 - K - 2\varepsilon_0}{1 - \varepsilon_0} \Delta\sigma_c \right) (1 + \Delta\sigma), \quad (3)$$

$$\text{где } \varepsilon_0 = \frac{\omega_0 AR^2}{Bq}; \quad K = \frac{\omega_0 R}{2q}; \quad \Delta\sigma_c = -\frac{1}{2}(k_{Br} + k_c)\Delta T; \quad A = \frac{\omega(R, \tau) - \omega(0, \tau)}{\omega(0, \tau)R^2};$$

$$\Delta\sigma = \left[\frac{1 - K - 2\varepsilon_0}{(1 - \varepsilon_0)} \left((k_{Br} - k_c) 2k_\lambda \right) \frac{1}{4} + \frac{(1 - 2\varepsilon_0)\varepsilon_0 k_\lambda}{9(1 - \varepsilon_0)^2} \right] \Delta T,$$

где k_c , k_λ , k_{Br} – относительные температурные коэффициенты теплоемкости, теплопроводности и скорости нагрева по радиусу образца соответственно.

Для нахождения фазового состояния поровой влаги при температурах ниже 0 °С термограмма опыта разбивается на температурные интервалы и составляется уравнение теплового баланса для каждого ин-

тервала. Из уравнения теплового баланса для интервала среднеобъемных температур $T_0 - T_1$ (рис. 1) находится расчетная формула определения доли льда в общем влагосодержании образца при температуре T_1 :

$$i(\bar{T}_1) = \frac{Q - C_T(\bar{T}_a - \bar{T}_1)}{m_e \left[L(T_{omm}) - \frac{C_e - C_l}{2}(T_{omm} - \bar{T}_1) \right]}, \quad (4)$$

где Q – количество тепла, выделяемое нагревателем в диапазоне температур $T_0 - T_1$; C_T – теплоемкость образца с измерительной ячейкой в талом состоянии; m_e – масса воды, находящаяся в образце; C_l – удельная теплоемкость льда; C_e – удельная теплоемкость воды; $L(T_{omm})$ – теплота фа-

зового перехода льда; T_{omm} – температура оттаивания. Для последующих интервалов составляется новое уравнение теплового баланса, учитывающее переход лед – вода в пределах интервала разбивки. Льдистость при среднеобъемной температуре образца \bar{T}_n находится по формуле

$$i(\bar{T}_n) = \frac{Q - C_T(\bar{T}_{n-1} - \bar{T}_n) + i(\bar{T}_{n-1})m_e \left[L(\bar{T}_n) + \frac{C_e - C_l}{2}(\bar{T}_{n-1} - \bar{T}_n) \right]}{m_e \left[L(T_{omm}) - \frac{C_e - C_l}{2}(T_{omm} - \bar{T}_1) \right]}. \quad (5)$$

Удельная мощность объемных стоков тепла находится по формуле

$$\omega = L(\bar{T}_n) \frac{m_e}{V} \frac{\partial i}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial \tau}, \quad (6)$$

где V – объем образца.

Результаты исследования и их обсуждение

На рис. 2 представлены результаты экспериментального определения теплопроводности заторфованного песчаного грунта в зависимости от пористости

$$\Pi = \left(1 - \frac{\gamma_{ск}}{\rho_{m.n}} \right), \quad (7)$$

где $\gamma_{ск}$ – объемная плотность образца; ρ_n – удельная плотность песка – 2,65 г/см³; ρ_m – удельная плотность торфа – 1,5 г/см³.

Удельная плотность заторфованного песчаного грунта определяется по формуле

$$\rho_{m.n} = \left(\frac{N}{\rho_m} + \frac{(1-N)}{\rho_n} \right)^{-1}, \quad (8)$$

где N – заторфованность, которая равна отношению массы сухого торфа к массе всего сухого грунта в единице объема.

Как видно из рис. 2, теплопроводность для песчаных грунтов с разной степенью заторфованности зависит от пористости и опре-

деляется содержанием песка в грунте. Чем больше содержание песка, тем выше значения теплопроводности. Теплопроводность торфа изменяется от 0,069 до 0,14 Вт/м·К, а для песка теплопроводность повышается от 0,25 до 0,35 Вт/м·К. Теплопроводность заторфованного песчаного грунта ($N = 0,4$) изменяется от 0,106 до 0,17 Вт/м·К.

На рис. 3 представлена зависимость теплопроводности исследуемого грунта от степени заторфованности. Эксперименты проводились в талом состоянии при +18 °С, в мерзлом – при температуре –15 °С.

Из рис. 3 видно, что теплопроводность зависит от степени заторфованности. Наибольшие значения теплопроводности для песка как в талом, так и в мерзлом состоянии. При малой степени заторфованности теплопроводность грунта определяется теплопроводностью песчаной составляющей. По мере добавления торфа в образец происходит резкое уменьшение значений теплопроводности до $N = 0,3$. При $N > 0,3$ начинает сказываться присутствие торфа и теплопроводность медленно уменьшается. Начиная с $N > 0,6$ теплопроводность заторфованного грунта практически равна теплопроводности торфа. Для заторфованного песчаного грунта в талом состоянии значения λ ниже, чем в мерзлом, так как теплопроводность мерзлого грунта определяется присутствием льда.

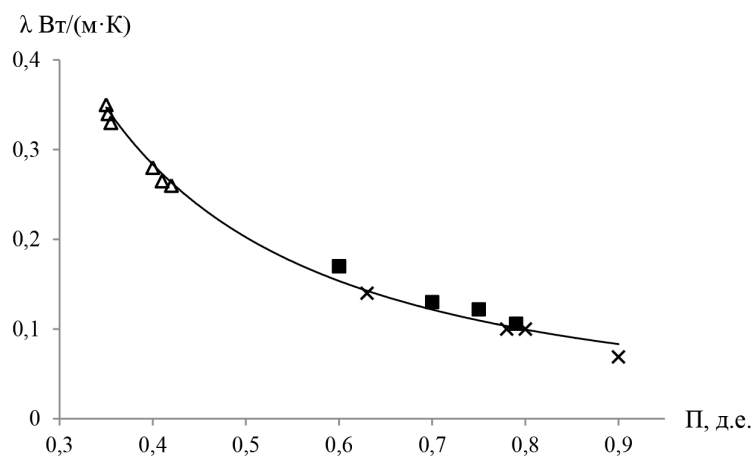


Рис. 2. Теплопроводность заторфованного песчаного грунта от пористости ($N = 0 - \Delta$; $N = 0,4 - \blacksquare$; $N = 1 - \times$)

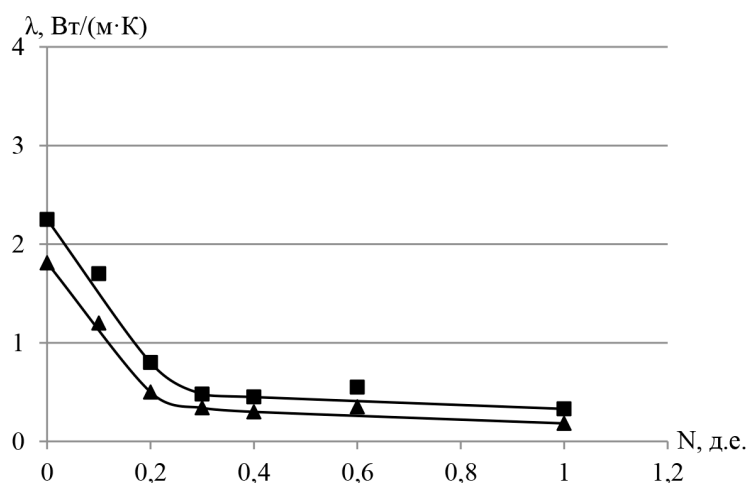


Рис. 3. Зависимость теплопроводности заторфованного песчаного грунта от степени заторфованности. ■ – мерзлое состояние, ▲ – талое состояние

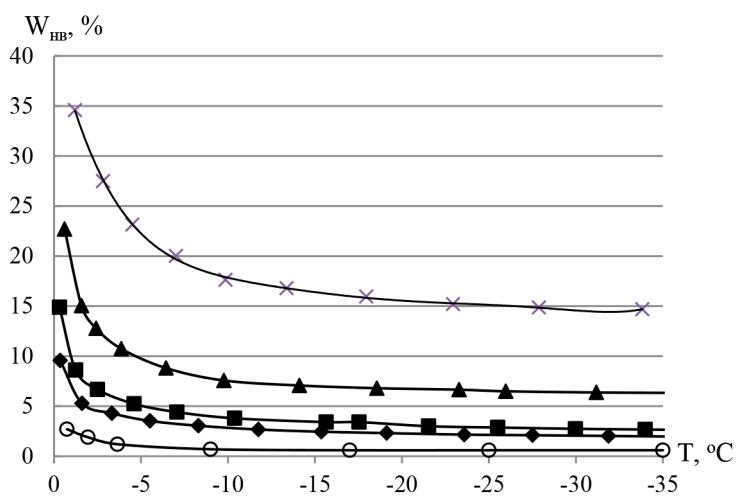


Рис. 4. Зависимость количества незамерзшей воды заторфованного песчаного грунта от температуры. $\circ - N = 0, W = 16,5\%$; $\blacklozenge - N = 0,2, W = 18,5\%$; $\blacksquare - N = 0,3, W = 27,8\%$; $\blacktriangle - N = 0,4, W = 38,6\%$; $\times - N = 1,0, W = 57,6\%$

На рис. 4 представлены результаты исследования влияния заторфованности на количество незамерзшей воды для чистого песка и песчаного грунта с разной степенью заторфованности.

Видно, что с увеличением заторфованности содержание количества незамерзшей воды увеличивается и достигает максимума для грунта с $N = 1$, то есть присутствие торфа в грунте влияет на количество незамерзшей воды, так как с повышением торфяной составляющей увеличивается дисперсность грунта. Для песчаного грунта ($N = 0$) при $T = -5$ °С количество незамерзшей воды равно 0,91 % и увеличивается до 3,53 % при заторфованности $N = 0,2$. Дальнейшее увеличение содержания торфа в грунте приводит к повышению количества незамерзшей воды и при $N = 1$ достигает 20 %.

Меньшее количество незамерзшей воды в торфе по сравнению с результатами работ [1, 2] можно объяснить низкими значениями начальной влажности, при которых проведены эксперименты.

Заключение

Проведены экспериментальные исследования теплопроводности, пористости и содержания незамерзшей воды для песчаных заторфованных грунтов при изменении степени заторфованности N от 0 до 1.

При исследовании влияния пористости на теплопроводность установлено, что с увеличением заторфованности значения λ уменьшаются. При этом чем выше заторфованность, тем выше значения пористости.

Для мерзлых заторфованных грунтов значения теплопроводности выше, чем у талых, и зависят от степени заторфованности. Количество незамерзшей воды с повышением степени заторфованности увеличивается. Самые высокие значения количества незамерзшей воды наблюдаются у торфа.

В данной работе миграция влаги при промерзании в торфе не изучалась, и это будет являться предметом дальнейших исследований.

Список литературы

1. Гаврильев Р.И. Теплофизические свойства компонентов природной среды в криолитозоне: справочное пособие. Новосибирск: Наука, 2004. 146 с.
2. Роман Л.Т. Мерзлые торфяные грунты как основания сооружений. Новосибирск: Наука, 1987. 224 с.
3. Y. Zhao, B. Cheng Si, Zh. Zhang, M. Li, H. He, R. Hill A new thermal conductivity model for sandy and peat soils // Agricultural and Forest Meteorology. 2019. Vol. 274 (6). DOI: 10.1016/j.agrformet.2019.04.004.
4. He R., Jia N., Jin H., Wang H., Li X. Experimental Study on Thermal Conductivity of Organic-Rich Soils under Thawed and Frozen States // Hindawi Geofluids. 2021. Article ID 7566669. DOI: 10.1155/2021/7566669.
5. Мотенко Р.Г., Власенко Д.В., Давлетова Р.Р., Калошина Ю.С., Михайлова А.А. Теплофизические свойства мерзлых нефтезагрязненных заторфованных песчаных грунтов // Материалы XVII Общероссийской научно-практической конференции и выставки «Перспективы развития инженерных изысканий в строительстве в Российской Федерации», 2022. С. 272–282.
6. Kravtsova O.N., Protodyakonova N.A., Timofeev A.M., Malyshev A.V., Tappyrova N.I. Calculation of Thermal Conductivity of Fine Soils Taking into Account the Quantity of Unfrozen Water // Soil Mechanics and Foundation Engineering. 2023. Vol. 60 (3). P. 223–228. DOI: 10.1007/S11204-023-09885-0.
7. Степанов А.В., Попенко Ф.Е., Рожин И.И. Основы инженерной защиты объектов строительства в криолитозоне. Новосибирск: Наука, 2014. 448 с.