

Арктика и Антарктика

*Правильная ссылка на статью:*

Галкин А.Ф., Плотников Н.А. — Расчет коэффициента теплопроводности снежного покрова // Арктика и Антарктика. — 2023. — № 3. DOI: 10.7256/2453-8922.2023.3.43733 EDN: VMDOVA URL: [https://nbpublish.com/library\\_read\\_article.php?id=43733](https://nbpublish.com/library_read_article.php?id=43733)

## Расчет коэффициента теплопроводности снежного покрова

Галкин Александр Фёдорович

ORCID: 0000-0002-5924-876X

доктор технических наук

профессор, главный научный сотрудник Института мерзлотоведения им. П.И.Мельникова СО РАН  
677010, Россия, г. Якутск, ул. Мерзлотная, 36, ИМЗ СО РАН. Лаборатория геотермии криолитозоны



✉ afgalkin@yandex.ru

Плотников Николай Афанасьевич

ORCID: 0000-0001-6013-931X

аспирант, лаборатория геотермии криолитозоны , Институт мерзлотоведения им.П.И.Мельникова СО РАН



677010, Россия, республика Саха(Якутия), г. Якутск, ул. Мерзлотная, 36

✉ plotnikov-nikolay96@mail.ru

[Статья из рубрики "Природные ресурсы Арктики и Антарктики"](#)

**DOI:**

10.7256/2453-8922.2023.3.43733

**EDN:**

VMDOVA

**Дата направления статьи в редакцию:**

07-08-2023

**Аннотация:** Цель работы – получение обобщенных простых формул для расчета коэффициента теплопроводности снежного покрова при расчетах его термического сопротивления. Для достижения цели было проведено сравнение формулы Н. И. Осокина, полученной на основе обобщения и корреляционного анализа существующих зависимостей для расчета коэффициента теплопроводности, имеющей дробные коэффициенты, с ее упрощенным вариантом с целыми коэффициентами. На основе

линеаризации базовой функциональной зависимости были также получены простые линейные формулы для определения коэффициента теплопроводности в зависимости от плотности снега для двух характерных диапазонов плотности (200-300) и (300-400) кг/м<sup>3</sup>. Определены процентные ошибки в расчетах коэффициента теплопроводности снега, которые возможны при упрощении коэффициентов и линеаризации базовой параболической зависимости коэффициента теплопроводности от плотности снежного покрова. Установлено, что возникающие при линеаризации базовой функции ошибки не превышают 4,5%, что является вполне допустимым в инженерных расчетах. Расхождение результатов расчетов по базовой и упрощенной формуле (с округленными до целых значений первого порядка коэффициентами) не превышает 2,3% во всем рассмотренном диапазоне изменения плотности снега. Результаты численных расчетов представлены в виде графиков, которые позволяют наглядно оценить влияние упрощения расчетной формулы и ее линеаризации на точность определения коэффициента теплопроводности снежного покрова.

#### **Ключевые слова:**

снежная мелиорация, термическое сопротивление, ошибка, точность, расчет, упрощение, аппроксимация, линеаризация функции, снег, грунт

**Введение.** Снежный покров играет важную роль в формировании температурного режима деятельного слоя гелиотермозоны [1,2,3,4,5]. Управление тепловым режимом деятельного слоя грунта с помощью снега, так называемая «снежная мелиорация» широко применяется в различных областях промышленности и сельского хозяйства [6,7,8,9,10,11]. Например: при строительстве зимников и переправ через реки в сезонном дорожном строительстве на Севере и обеспечении их надежной эксплуатации; для сохранения горных полигонов от глубокого промерзания пород при открытой разработке россыпных месторождений; при восстановлении нарушенных термокарстом сельскохозяйственных земель криолитозоны; для обеспечения плодородия почвы за счет снижения зимнего промерзания и эффективного весеннего увлажнения. Хотя, в более узкой трактовке этого термина, принятой в сельском хозяйстве, под снежной мелиорацией обычно понимают «управление водно-тепловым режимом деятельного слоя грунта с целью улучшения его характеристик и обеспечения необходимых функций путем воздействия на снежный покров» [2,6]. В конечном итоге, суть снежной мелиорации заключается в оптимальном управлении термическим сопротивлением снежного покрова, которое достигается, в зависимости от цели проведения снежной мелиорации, либо накоплением, либо трамбованием снега на определенном участке поверхности земли или инженерного объекта. Важность точного определения термического сопротивления снежного покрова для устойчивости грунтовых оснований подробно описана в работах [11,12,13,14]. Авторы отмечают, что основная сложность в расчетах термического сопротивления снежного покрова заключается в широком диапазоне изменения коэффициента теплопроводности снега, который существенно зависит от таких непостоянных климатических характеристик, как оттепели и заморозки, ветровая нагрузка, солнечная радиация, суточные колебания температуры и т.п. Это вызывает «пространственно-временную изменчивость термического сопротивления снежного покрова», которую исследовали авторы работ [16,17,18,19] для ряда районов Красноярского края и Республики Коми. В этих же работах оценено влияние текстуры снежного покрова и слоев глубинной изморози на термическое сопротивление (на

примере Западного Шпицбергена и Подмосковья). Показано, что без учета стратиграфии снежного покрова значение термического сопротивления может быть в полтора раза ниже реального. При этом большинство исследователей комплексным показателем всех воздействий на снежный покров считают среднюю плотность снега за рассматриваемый период существования снежного покрова, отдельно выделяя периоды таяния.

**Целью** настоящей работы было получение простых формул для расчета коэффициента теплопроводности снежного покрова при определении его термического сопротивления.

**Метод.** Для достижения цели используем обобщенную формулу Н.И.Осокина [\[16\]](#),

полученную путем обобщения данных и функциональных зависимостей, которые были приведены в открытых литературных источниках (по информации авторов указанной работы ими использовано при анализе более двадцати имеющихся расчетных формул). Формула имеет следующий вид

$$\lambda = 9,165 * 10^{-2} - 3,814 * 10^{-4} \rho + 2,905 * 10^{-6} \rho^2,$$

которую представим в более удобной, на наш взгляд, форме

$$k = (9,165 - 3,814j + 2,905j^2)/100 \quad j = \rho/100, \quad (1)$$

здесь  $\lambda, k$  - коэффициент теплопроводности снега, Вм/ мК;  $\rho$  – средняя плотность снега, кг/м<sup>3</sup>.

Диапазон изменения средней плотности снега, т.е. диапазон применения формулы, составляет от 200 до 400 кг/м<sup>3</sup>. Плотность снега обычно считается средней по толщине снежного покрова. Обратим внимание, что не только в данной работе, но и во многих работах-первоисточниках используются коэффициенты регрессионной зависимости при аппроксимации экспериментальных данных с точностью до третьего знака. При этом авторы забывают, что в действительности, третьим знаком после запятой, является первый знак в уравнении (1), т.к. значение коэффициента теплопроводности снега определяется до второго знака после запятой. Поэтому без потери точности можно ограничиться только первым знаком в коэффициентах параболы и записать формулу, приведенную в работе [\[16\]](#) в следующем простом и удобном для запоминания виде

$$k = (9 - 4j + 3j^2)/100, \quad j = \rho/100, \quad (2)$$

Иногда, для оценочных расчетов удобно пользоваться линейными функциями, поэтому формулу (1) разобьем на два интервала по плотности снега (200 - 300) и (300 - 400), кг/м<sup>3</sup>. Линеаризация параболической функции в данных пределах приводит к следующим линейным соотношениям для определения коэффициента теплопроводности снежного покрова

$$k = (11j - 90)/100, \quad 2,0 \leq j \leq 3,0 \quad (3)$$

$$k = (16j - 24)/100, \quad 3,0 \leq j \leq 4,0 \quad (4)$$

Ошибку вычисления коэффициента теплопроводности по приближенным формулам (2) - (4), по сравнению с основной базовой формулой (1), определим из известного соотношения [\[20,21\]](#)

$$e = 100(1 - k_f/k), \% \quad (5)$$

Здесь  $k_f$  - коэффициент теплопроводности, определенный по одной из формул (2), (3) или (4), соответственно.

**Результаты и обсуждение.** Для наглядности все количественные результаты, полученные при вариантовых расчетах по предлагаемым формулам, представлены в виде графиков на рисунках 1-3. На рис. 1 показано сравнение значений коэффициента теплопроводности, вычисленных по формулам (1) и (2).

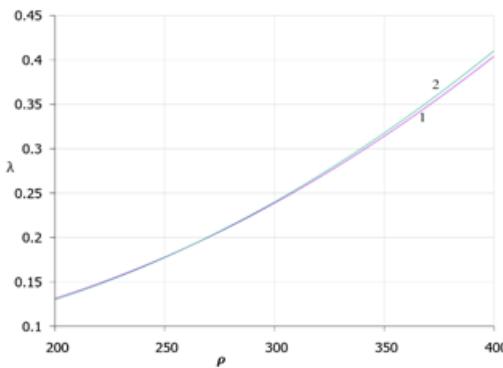


Рис. 1. Значение коэффициента теплопроводности снега в зависимости от его плотности:  
1- вычисленные по формуле (1); 2 - вычисленные по формуле (2).

Как видно из графиков на рисунке, кривые, практически, сливаются. То есть разность в расчетах, учитывая, что коэффициент теплопроводности снега определяется с точностью до второго знака, незначительна. Действительно, если рассмотрим крайнюю точку на графике, где плотность снега ( $400 \text{ кг/м}^3$ ) максимальна и соответствует визуально максимальному расхождению кривых, то получим следующие значения коэффициент теплопроводности: по базовой формуле (кривая 1) -  $0,4039 \text{ Вт/мК}$ ; по предлагаемой формуле (кривая 2) –  $0,41 \text{ Вт/мК}$ . Разность составляет  $0,0061 \text{ Вт/мК}$  или  $1,5\%$ . На всех остальных участках шкалы плотности эти значения будут еще меньше. Таким образом, становится очевидным, что использование предлагаемой формулы (2) в расчетах является целесообразным с инженерной точки зрения. Более того, такая формула легка для запоминания студентами и специалистами и не требует обращений к первоисточникам. Формула отличается от известных зависимостей своей компактностью и простотой. В дальнейшем будем данную формулу называть «модифицированной формулой Н.И.Осокина».

На рисунке 2 приведены графики сравнения базовой формулы (1) с линейными формулами для двух характерных диапазонов изменения плотности снега: А) - (200-300)  $\text{кг/м}^3$  и Б) - (300-400)  $\text{кг/м}^3$ .

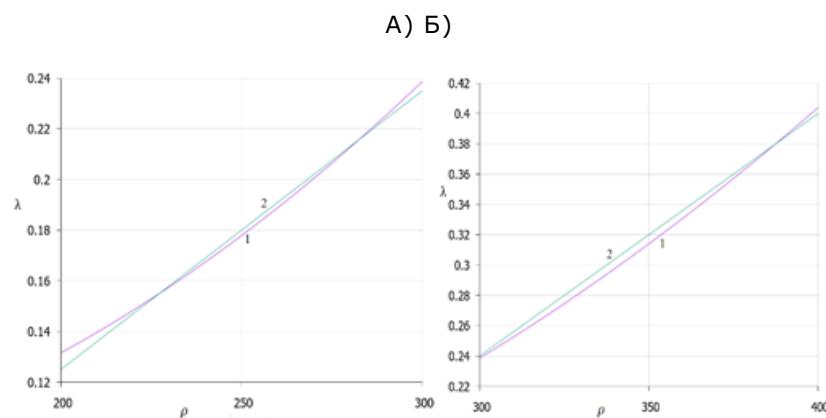


Рис.2. Значения коэффициента теплопроводности снега в зависимости от его плотности:

1- вычисленные по формуле (1);

2 - вычисленные по формуле А) - (3) и Б) - (4).

Из графиков видно, что в этом случае расхождение линий (1) и (2) более значительно. Однако степень их расхождения визуально не очень велика. Обычно линеаризация считается успешной, если ошибка в расчетах по базовой и линеаризованной функциями не превышает значений, допустимой в инженерной практике, что обычно составляет%. На рис. 3 приведены кривые, характеризующие процентные ошибки вычисления значений коэффициента теплопроводности по предлагаемым формулам по сравнению со значениями, определенными по базовой формуле. Рисунок также подтверждает целесообразность разбиения шкалы плотности на два характерных участка линеаризации. Без разбиения на два участка ошибки вычисления по линейным зависимостям могут быть значительными и превышать кратно допустимую в инженерной практике ошибку вычисления проектных величин (кривые 1 и 2 на рис. 3).

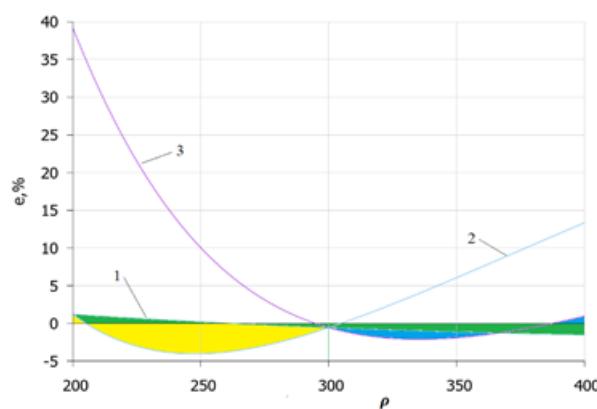


Рис. 3. Процентная ошибка вычисления коэффициента теплоотдачи по сравнению с базовой формулой (1): 1 – при вычислении по формуле (2); 2 – при вычислении по формуле (3); 3 – при вычислении по формуле (4).

В то же время при линеаризации базовой функции на двух отдельных участках, максимальная ошибка не превышает 4,5%. Области изменения ошибки от линеаризации базовой параболической функции выделены желтым и голубым цветом на рисунке. Зеленым цветом выделена область ошибки, возникающей от замены дробных коэффициентов в уравнении (1) целыми значениями и представления уравнения для определения коэффициента теплопроводности снежного покрова в виде формулы (2). Анализ показывает, что максимальная ошибка не превышает 1,5%. Это является основанием для рекомендации использования формулы Н.И.Осокина в предлагаемом виде для практических целей.

**Заключение.** Исследовано влияние точности задания коэффициентов в параболической функции для определения коэффициента теплопроводности снега в зависимости от его плотности. Показано, что замена дробных коэффициентов целыми значениями приводит к значительному упрощению вида функциональной зависимости без потери точности получаемого результата. Предложена модифицированная формула Н.И.Осокина, которая легка для запоминания и оперативных оценок влияния плотности снега на коэффициенты теплопроводности и термического сопротивления снежного покрова. На основе линеаризации базовой функциональной зависимости были также получены простые линейные формулы для определения коэффициента теплопроводности в зависимости от плотности снега для двух характерных диапазонов плотности (200-300) и

(300-400) кг/м<sup>3</sup>. Определены процентные ошибки в расчетах коэффициента теплопроводности снега, которые возможны при упрощении коэффициентов и линеаризации базовой параболической зависимости коэффициента теплопроводности от плотности снежного покрова. Установлена, что возникающие при линеаризации базовой функции ошибки не превышают 4,5%, что является вполне допустимым в инженерных расчетах. Расхождение результатов расчетов по базовой и упрощенной формуле (с округленными до целых значений первого порядка коэффициентами) не превышают 2,3% во всем рассмотренном диапазоне изменения плотности снега. Результаты численных расчетов представлены в виде графиков, которые позволяют наглядно оценить влияние упрощения расчетной формулы и ее линеаризации на точность определения коэффициента теплопроводности снежного покрова. Статья имеет не только научное, но и прикладное методическое значение и будет полезна студентам и аспирантам, обучающимся по направлению 1.6.7. «Инженерная геология, мерзлотоведение и грунтоведение». Дальнейшие исследования в данной области должны быть направлены на исследование влияния точности определения средней плотности снега на расчет термического сопротивления снежного покрова.

## Библиография

1. Осокин Н.И., Сосновский А.В. Влияние термического сопротивления снежного покрова на устойчивость многолетнемерзлых пород // Криосфера Земли, 2016, т. XX, № 3, с. 105–112. DOI: 10.21782/KZ1560-7496-2016-3(105-112)
2. Шульгин, А. М. Климат почвы и его регулирование. Л.: Гидрометеоиздат, 1967. 300 с.
3. Балобаев В.Т. Геотермия мерзлой зоны литосферы севера Азии. Новосибирск: Наука, 1991. 193 с.
4. Павлов А.В. Расчет и регулирование температурного режима почвы. Новосибирск: Наука, 1980. 240с.
5. 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.
6. Шульгин, А. М. Снежная мелиорация и климат почвы. Л. :Гидрометеоиздат, 1986. 70 с.
7. Железняк И. И., Сакисян Р. М. Методы управления сезонным промерзанием грунтов в Забайкалье. Новосибирск: Наука. 1987. 128 с.
8. Galkin A.F., Pankov V.Yu. Thermal Protection of Roads in The Permafrost Zone // Journal of Applied Engineering Science. 2022. Vol. 20, №2, P. 395-399. DOI: 10.5937/jaes0-34379
9. Zhirkov, A., Sivtsev, M., Lytkin, V., Séjourné, A., Wen, Z. An Assessment of the Possibility of Restoration and Protection of Territories Disturbed by Thermokarst in Central Yakutia, Eastern Siberia // Land, 2023, 12(1), 197
10. Park H., Fedorov A.N., Zheleznyak M.N., Konstantinov P.N., Walsh J.E. Effect of snow cover on pan-Arctic permafrost thermal regimes // Climate Dynamics, 2015, vol. 44, p. 2873–2895, doi: 10.1007/s00382-014-2356-5
11. Жирков А.Ф., Сивцев М.А.Оценка возможности восстановления защитного слоя в условиях Центральной Якутии//В сб.: Мониторинг в криолитозоне. Сборник докладов Шестой конференции геокриологов России с участием российских и зарубежных ученых, инженеров и специалистов. М., 2022. С. 444-450.
12. Galkin A.F. Controlling The Thermal Regime of the Road Surface in the Cryolithic Zone

- // Transportation Research Procedia. 2022. V.63, pp. 1224-1228.  
<https://doi.org/10.1016/j.trpro.2022.06.128>
13. Павлов А.В. Мониторинг криолитозоны.-Новосибирск: «Гео», 2008. 229 с.
  14. Осокин Н.И., Сосновский А.В., Накалов П.Р., Ненашев С.В. Термическое сопротивление снежного покрова и его влияние на промерзание грунта // Лед и снег. 2013, т. 53, № 1. С. 93–103.
  15. Сосновский А.В. Математическое моделирование влияния толщины снежного покрова на деградацию мерзлоты при потеплении климата// Криосфера Земли. 2006, Т. X. №3. С. 83-88.
  16. Осокин Н.И., Сосновский А.В., Чернов Р.А., Накалов П.Р. Термическое сопротивление снежного покрова и его изменчивость // Криосфера Земли, 2014, т. XVIII, № 4, с. 70–77.
  17. Осокин Н.И., Сосновский А.В., Чернов Р.А. Коэффициент теплопроводности снега и его изменчивость // Криосфера Земли. 2017. Т. XXI. № 3. С. 60–68.
  18. Осокин Н.И., Сосновский А.В., Чернов Р.А. Влияние стратиграфии снежного покрова на его термическое сопротивление // Лёд и Снег. 2013. Т. 53. № 3. С. 63–70. doi: 10.15356/2076-6734-2013-3-63-70 .
  19. Котляков В.М., Сосновский А.В., Осокин Н.И. Оценка коэффициента теплопроводности снега по его плотности и твёрдости на Западном Шпицбергене // Лёд и Снег. 2018. Т. 58. № 3. С. 343–352. doi: 10.15356/2076-6734-2018-3-343-352.
  20. Галкин А.Ф., Панков В.Ю., Фёдоров Я.В. Расчетный коэффициент теплопроводности бинарной смеси //Арктика и Антарктика. 2022, №4. С. 11-19. DOI:10.7256/2453-8922.2022.4.39349
  21. Galkin A.F., Pankov V. Yu., Zhirkova E.O. Thermal Conductivity of a Gravel Layer of a Road // E3S Web of Conferences 371, 03042 (2023)  
<https://doi.org/10.1051/e3sconf/202337103042>

## **Результаты процедуры рецензирования статьи**

*В связи с политикой двойного слепого рецензирования личность рецензента не раскрывается.*

*Со списком рецензентов издательства можно ознакомиться [здесь](#).*

Предмет исследования являются исследование вариантов получение простых формул для расчета коэффициента теплопроводности снежного покрова при определении его термического сопротивления.

Методология исследования состояла в поиске и описании различных методов и выбор для достижения цели обобщенной формулы, предложенной Н.И.Осокиной, что является очень ценным для вкладом в развитие методологии изучения теплообменных процессов между атмосферой литосферой в условиях снежного. Авторами методики предложен вариант модификации формулы Н.И.Осокина, которая легка для запоминания с методической точки зрения и проста для использования в оперативных оценках влияния плотности снега на коэффициенты теплопроводности и термического сопротивления снежного покрова. Автором были также получены простые линейные формулы для определения коэффициента теплопроводности в зависимости от плотности снега для двух характерных диапазонов плотности (200-300) и (300-400) кг/м3 на основе линеаризации базовой функциональной зависимости. Им были определены процентные ошибки в расчетах коэффициента теплопроводности снега, которые возможны при упрощении коэффициентов и линеаризации базовой параболической зависимости

коэффициента теплопроводности от плотности снежного покрова. Установлен уровень ошибки возникающей при линеаризации базовой функции, который не превышают 4,5%, что является вполне допустимым в инженерных расчетах и не влияет существенно на последующий результат.

Актуальность исследования состоит в систематизации методов исследования. Представленные в виде графиков результаты статистических и математических численных расчетов позволяют наглядно отразить и оценить влияние упрощения расчетной формулы и ее линеаризации на точность определения коэффициента теплопроводности снежного покрова. Статья, имея научное значение, может выполнить и большую практическую полезную службу, так как она имеет большое и прикладное методическое значение и будет полезна студентам и аспирантам, обучающимся по направлению 1.6.7. «Инженерная геология, мерзлотоведение и грунтоведение». Дальнейшие перспективные исследования в данной области должны быть направлены на исследование влияния точности определения средней плотности снега и их влияние на расчет термического сопротивления снежного покрова.

Научный результат состоит в модификации имеющихся методов расчета теплопроводность снежного покрова путём оптимизации формул расчёта. Практическая значимость определяется легкостью использования, простотой применения и возможностью легко оперировать предложенным методологическим аппаратом для расчёта теплопроводности снежного покрова в исследовании термодинамических процессов атмосферы или литосферы, а также в период зимнего анабиоза.

Полученные данные могут найти применение в практике на объектах оценки термодинамических процессов.

Стиль, структура, содержание Стиль изложения - хороший, (не) требует правки, сокращения. Таблицы - информативны. Рисунки - приемлемы, не повторяют содержание таблиц. Автором статьи использование многочисленной иллюстрации в виде рисунков и графиков, отражающих зависимости.

Библиография обширна и исчерпывающа. Использован адекватный современный список литературы. Ссылки на литературные источники по тексту присутствуют.

Апелляция к оппонентам состоит в ссылках на использованные литературные источники. Выводы, интерес читательской аудитории несомненен. Выводы достаточной степени аргументированы, обоснованы, исчерпывающи. Может быть полезна практикам для внедрения , а также студентам и аспирантам, обучающимся по направлению 1.6.7. «Инженерная геология, мерзлотоведение и грунтоведение».