

О ПРОБЛЕМЕ ОЦЕНКИ ТЕПЛООБМЕНА ГРУНТА С ВОЗДУХОМ С УЧЁТОМ ВОЗДЕЙСТВИЯ СОЛНЕЧНОЙ РАДИАЦИИ ДЛЯ ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИХ РАСЧЁТОВ ИНЖЕНЕРНЫХ СООРУЖЕНИЙ НА ММГ

Грибовский Г.В., Кушнарёв А.Г.

ООО «НТЦ «Симмэйкерс», Москва, Россия; info@simmakers.ru

В работе рассмотрены методики по учёту дополнительного теплового влияния солнечной радиации на грунт, которые представлены в СП 447.1325800 и СП 498.1325800. Эти методики необходимы для уточнения теплообмена грунта с воздухом при теплотехнических расчётах. Рассмотрена методика по расчёту радиационного баланса поверхности грунтов в зависимости от суммарной солнечной радиации. Проведен анализ методик по расчёту поправки к температурам воздуха. Показана необходимость согласования и стандартизации расчёта параметров теплообмена грунта с воздухом в рамках нормативной документации, регулирующей правила проектирования зданий и сооружений на ММГ.

ABOUT THE PROBLEM OF CALCULATING THE HEAT-EXCHANGE OF GROUND WITH AIR TAKING INTO ACCOUNT THE IMPACT OF SOLAR RADIATION FOR HEAT SIMULATIONS INFLUENCE OF ENGINEERING FACILITIES ON PERMAFROST

Gribovskii G.V., Kushnarev A.G.

LLC STC Simmakers, Moscow, Russia; info@simmakers.ru

The study considers the additional thermal effect of solar radiation on the ground methods, which are presented in SP 447.1325800 and SP 498.1325800. These techniques are necessary to clarify the heat exchange of ground with air in the heat simulations influence of engineering structures on permafrost. The methods were analyzed. The study considers calculating techniques for the net radiation of the ground surface depending on the global solar irradiance. Net radiation is necessary to calculate the correction for the summer air temperature. The necessity of coordinating and standardizing the heat exchange parameters calculation between ground and air within the regulatory documents which are governing the buildings and structures designing rules at permafrost is demonstrated.

Введение. При проектировании инженерных сооружений на многолетнемерзлых грунтах (ММГ) необходимо производить численные теплотехнические расчёты теплового состояния основания сооружения на весь период его эксплуатации [8] в таких программных комплексах, как Frost 3D [5]. При подготовке компьютерной модели необходимо описать естественное воздействие внешней среды на ММГ на границе «грунт–воздух». В рамках текущей инженерной практики для описания такого граничного условия инженер-проектировщик чаще всего располагает следующими исходными данными, полученными по ближайшей метеостанции:

- температура воздуха;
- скорость ветра (для расчёта коэффициента теплообмена на границе грунта с воздухом);
- высота или, реже, плотность снегового покрова (для определения значения его теплового сопротивления).

Температура воздуха определяется на метеостанции без учёта воздействия прямой солнечной радиации [3]. Это означает, что в теплотехнических расчётах может происходить неполный учет теплопоступления в грунт, что может приводить к оптимистичным результатам прогноза. Из-за сложности определения влияния прямой солнечной радиации на грунт с учётом имеющихся данных по температуре воздуха, чаще всего дополнительные теплопоступления не учитывались при описании граничных условий в теплотехническом расчёте. Однако в последние годы данный вопрос всё чаще начал подниматься среди профильных специалистов.

Дополнительное теплопоступление в грунт за счёт солнечной радиации не регламентировано в СП 25.13330.2020 [8] (далее – СП 25), а значит, не обязательно к учёту при проведении теплотехнических расчетов зданий и сооружений на ММГ, закрепленных за данным нормативным документом. Также исходные климатические данные, такие как радиационный баланс, эффективное излучение подстилающей

поверхности, скорость испарения влаги и другие, не предоставляются в рамках инженерно-метеорологических изысканий и их значения отсутствуют в СП 131.13330.2020 [10] (далее – СП 131).

В данной работе рассмотрены доступные в сводах правил инженерные методики по учёту дополнительного теплового влияния солнечной радиации на грунт за счёт поправки к температуре воздуха. Приведена инженерная методика по расчёту радиационного баланса поверхности грунтов, которая необходима для оценки поправки к температуре воздуха в летний период. Показаны отличия в расчёте поправки между методиками в СП 447.1325800.2019 (далее – СП 447) и СП 498.1325800.2020 (далее – СП 498).

Расчёт температурной поправки. Ниже будут представлены две методики по учёту температурной поправки за счёт солнечной радиации; которые чаще всего фигурируют в нормативной документации. Рассмотрим расчёт температурной поправки за счёт солнечной радиации согласно СП 447, пункту А.7, который также представлен в [6,11-13,15]. Расчетное значение среднемесячной приведенной температуры воздуха $t_{пр}$, °С, определяется по формуле:

$$t_{пр} = t + \Delta t_r - \Delta t_\epsilon, \quad (1)$$

$$\Delta t_r = \frac{R}{\alpha}, \quad (2)$$

$$\Delta t_\epsilon = \Delta t_r k, \quad (3)$$

$$\alpha = 1,16 * 10 \sqrt{V}, \quad (4)$$

где t – среднемесячная температура воздуха, °С; Δt_r и Δt_ϵ – поправки к среднемесячным температурам воздуха за счет соответственно солнечной радиации и испарения, °С; R – среднемесячная сумма радиационного баланса для рассматриваемого элемента поверхности, Вт/м²; α – коэффициент теплообмена на поверхности грунта, Вт/(м²·°С); V – скорость ветра, м/с; k – коэффициент, учитывающий характер поверхности, принимаемый в первом приближении равным 0,8 для естественной поверхности и 0,3 – для оголенной [15].

Вторая методика из п. 5.2.13 СП 498 также представлена в [7,9,14,16] и имеет следующий вид:

$$t_{пр} = t + \frac{R-q}{\alpha}, \quad (5)$$

$$q = 0,49 Q - 60, \quad (6)$$

$$\alpha = \{ 2,4 V + 2,3, \quad V \leq 4,6 \text{ м/с} \quad 3,7 (V - 1), \quad V > 4,6 \text{ м/с}, \quad (7)$$

где q – потери тепла дневной поверхности за счет испарения и нагрева подстилающих пород и фазовых переходов в них, Вт/м²; Q – суммарная солнечная радиация, Вт/м².

Как видно из формул (1)–(4) и (5)–(7), во всех случаях необходимо иметь исходные данные по радиационному балансу рассматриваемых поверхностей.

Расчёт радиационного баланса. Рассмотрим расчёт радиационного баланса, представленного в учебнике по общей геофизиологии [2]:

$$R = Q(1 - A_k) - E_{эф} = Q(1 - A_k) - (E_c - b * E_a), \quad (8)$$

где A_k – Альбеда подстилающей поверхности; E_c – излучение земной поверхности, Вт/м²; b – коэффициент поглощения подстилающей поверхности; E_a – противоизлучение атмосферы, Вт/м²; $E_{эф}$ – эффективное излучение подстилающей поверхности, Вт/м².

Альбеда поверхности можно определить в справочниках и специализированной литературе [1, 16]. Значения параметра суммарной солнечной радиации приведены в строительной климатологии [10]. Однако определение эффективного коэффициента излучения подстилающей поверхности может вызвать затруднения у инженера, так как это значение и его компоненты явно не представлены в нормативно-технической документации и сложны в их определении в рамках методик из специализированной литературы. По причине отсутствия требуемых исходных данных в явном виде, приведённые выше методики из СП 447 и СП 498 без упрощений не применяются в текущей инженерной практике при проведении теплотехнических расчётов оснований сооружений.

Тем не менее в СП 498 [7, 9, 14, 16] приведён упрощённый расчёт радиационного баланса, который имеет следующий вид:

$$R = \{0,61 Q - 20, \quad 0,07 < A \leq 0,16, 0,61 Q - 40, \quad 0,16 < A\} \quad (9)$$

где согласно [14], значения альбеда $A \leq 0,16$ характерны для песчаных, щебеночных и асфальтовых поверхностей, а значения $A > 0,16$ – для бетонных и железобетонных покрытий.

Формула (9) является простой для инженерного применения и оценки радиационного баланса поверхности в зависимости от её альбеда и суммарной солнечной радиации.

Сравнение методик. Проведем сравнительный расчет температурной поправки для СП 447 и СП 498 по формулам (1)–(4) и (5)–(7) соответственно без учёта среднемесячной температуры воздуха t . Расчёт радиационного баланса для двух случаев происходит по формулам (8)–(9). Положим, что в качестве входных параметров рассматривается оголённая песчаная поверхность, где скорость ветра изменяется от 1 до 5 м/с, а суммарная солнечная радиация – от 50 до 250 Вт/м². Тем самым в формуле (3) значение коэффициента $k = 0.3$, а в (9) альбеда $A \leq 0,16$. Результаты расчёта температурной поправки по двум методикам представлены в таблице.

Таблица. Расчет температурной поправки согласно СП 447 (числитель) и СП 498 (знаменатель) в зависимости от скорости ветра V и суммарной солнечной радиации Q

Суммарная солнечная радиация Q , Вт /м ²	Скорость ветра V , м/с				
	1	2	3	4	5
50	$\frac{0,63}{9,78}$	$\frac{0,44}{6,47}$	$\frac{0,36}{4,84}$	$\frac{0,31}{3,86}$	$\frac{0,28}{3,10}$
	$\frac{2,47}{11,06}$	$\frac{1,74}{7,32}$	$\frac{1,42}{5,47}$	$\frac{1,23}{4,36}$	$\frac{1,10}{3,51}$
150	$\frac{4,31}{12,34}$	$\frac{3,05}{8,16}$	$\frac{2,49}{6,10}$	$\frac{2,15}{4,87}$	$\frac{1,93}{3,91}$
	$\frac{6,15}{13,61}$	$\frac{4,35}{9,01}$	$\frac{3,55}{6,73}$	$\frac{3,07}{5,37}$	$\frac{2,75}{4,32}$
250	$\frac{7,99}{14,89}$	$\frac{5,65}{9,85}$	$\frac{4,61}{7,36}$	$\frac{3,99}{5,88}$	$\frac{3,57}{4,72}$

Приведённые результаты в таблице показывают, что значение температурной поправки по обоим методикам растет при увеличении Q и уменьшается – при увеличении V . Методика СП 498 даёт большее значение температурной поправки, в сравнении с методикой СП 447. Дополнительно выявлено, что наибольшее отличие наблюдается при малых значениях Q и V , где разница составляет порядка 14 раз, а при

увеличении значений Q и V наблюдается тенденция к сокращению этой разницы до 1,32 раза. Это связано как с особенностями учёта потери тепла за счёт испарения в (1) и (5), так и с разностью формул для расчёта коэффициентов теплообмена. Формула (4) из СП 447, в среднем, даёт в два раза большие значения коэффициента теплообмена, чем формула (7) на рассматриваемом диапазоне скоростей ветра V .

Обсуждение результатов. Несмотря на одинаковые вводные данные, результаты полученных значений температурной поправки по двум сравниваемым методикам имеют существенные отличия. Можно принять тот факт, что рассмотренные своды правил предназначены для проектирования разных типов сооружений на ММГ, которые учитывают их специфические особенности. Однако, если откинуть частности в виде «насыпь для фундамента», «железнодорожная насыпь» или «насыпь для аэродромного полотна», то везде рассматривается одна и та же сущность в виде насыпи или дневной поверхности, которая взаимодействует с окружающей средой.

Если рассмотреть другие литературные источники, то существуют иные методические подходы к оценке влияния факторов природной среды на формирование температур ММГ и глубин их сезонного оттаивания и промерзания [1, 4]. С другой стороны, в основополагающей нормативной документации по проектированию оснований и фундаментов, как [8], не представлены такого рода подходы для оценки дополнительного теплопритока в грунт.

Такая разрозненность в нормативной документации, которая посвящена проектированию инженерных сооружений в одних и тех же условиях ММГ, в зависимости от выбора свода правил, может приводить к принятию как слишком оптимистичных проектных решений, что увеличивает риски аварий при эксплуатации сооружения, так и решений с излишним запасом, которые увеличивают стоимость строительства. Это подчеркивает необходимость комплексно рассмотреть текущую нормативную документацию, посвящённую проектированию сооружений в условиях ММГ, согласовать между собой своды правил, определить область применимости различных методик, в частности, по учёту поправки к температурам воздуха за счёт солнечной радиации, и подготовить единые рекомендации по их применению при проведении численных теплотехнических расчётов.

Вывод. В данной работе представлены две методики из СП 447 и СП 498 для оценки поправки к температуре воздуха за счёт влияния солнечной радиации и испарения. Её учет необходим при проведении численных теплотехнических расчетов для описания теплообмена на границе грунта с воздухом в летний период. Показана простая инженерная методика для расчёта радиационного баланса земной поверхности в зависимости от альбедо и суммарной солнечной радиации из СП 498, которая необходима для расчёта поправок к температурам воздуха. Наличие данной методики в нормативной документации позволяет применить её в инженерной практике и обосновать повышение температур воздуха в летний период.

Проведено сравнение методик по расчёту температурной поправки, которое выявило, что её значения по СП 498 гораздо выше, чем по СП 447. Показана необходимость согласования и стандартизации расчёта параметров теплообмена грунта с воздухом в рамках нормативной документации, регулирующей правила проектирования зданий и сооружений на ММГ. Необходима совместная работа как различных проектных институтов, так и научных учреждений для усовершенствования сводов правил и методологии проведения численных теплотехнических расчётов в специализированных программных комплексах.

Литература

1. Ершов Э. Д. Инженерная геокриология: справочное пособие / Э.Д. Ершов, Л.Н. Хрусталева, Г.И. Дубиков, С.Ю. Пармузин. – Москва: Недра, 1991. – 439 с.
2. Ершов Э.Д. Общая геокриология: Учебник / Э.Д. Ершов; МГУ. – Москва: Изд-во МГУ, 2002. – 682 с.
3. Наставления гидрометеорологическим станциям и постам. Выпуск 3. Часть 1. Метеорологические наблюдения на станциях. // Ленинград: Гидрометиздат, 1985. – 301 с.
4. ОДМ 218.2.086-2019 Методические рекомендации по геокриологическому прогнозированию устойчивости дорожных сооружений при проектировании, строительстве и эксплуатации

- автомобильных дорог / Росавтодор (Федеральное дорожное агентство). – Москва, 2019 – 124 с.
5. Программный комплекс для тепловых расчетов грунтов FROST 3D: [Электронный ресурс]. URL: <http://www.frost3d.ru> Дата обращения: 01.03.2022).
 6. Рекомендации по методике прогноза изменений мерзлотно-грунтовых условий при строительстве и эксплуатации сооружений на трассе БАМ. Проект, ОАО ЦНИИС, М., 1976. – 176 с.
 7. СНиП 11-47-80. Аэродромы. / Москва: Стройиздат, 1981.– 57 с.
 8. СП 25.13330.2020 Основания и фундаменты на вечномёрзлых грунтах СНиП 2.02.04-88 / Минстрой России. – Официальное издание. – Москва: Стандартинформ, 2021. – 135 с.
 9. СП 121.13330.2019 Аэродромы. СНиП 32-03-96 / Минстрой России. – Официальное издание. – Москва: Стандартинформ, 2019. – 94 с.
 10. СП 131.13330.2020 Строительная климатология СНиП 23-01-99* / Минстрой России. – Официальное издание. – Москва: Стандартинформ, 2021. – 146 с.
 11. СП 354.1325800.2017 Фундаменты опор мостов в районах распространения многолетнемерзлых грунтов. Правила проектирования и строительства / Минстрой России. – Официальное издание. – Москва: Стандартинформ, 2018. – 74 с.
 12. СП 445.1325800.2018 Водопропускные трубы и системы водоотвода в районах вечной мерзлоты / Минстрой России. – Официальное издание. – Москва: Стандартинформ, 2019. – 58 с.
 13. СП 447.1325800.2019 Железные дороги в районах вечной мерзлоты. Основные положения проектирования / Минстрой России. – Официальное издание. – Москва: Стандартинформ, 2019. – 36 с.
 14. СП 498.1325800.2020 Основания и фундаменты зданий и сооружений на многолетнемерзлых грунтах. Требования к инженерной подготовке территории / Минстрой России. – Официальное издание. – Москва: Стандартинформ, 2021. – 35 с.
 15. Токтарев Д. Е. Формирование температурного поля поверхности земли с учетом изменения условий местности при строительстве автомобильных дорог через лесной массив / Д. Е. Токтарев, Е. А. Бедрин // Техника и технологии строительства. – 2017. – №2 (10). – С.72–79
 16. Хрусталеv Л. Н. Основы геотехники в криолитозоне: Учебник. / Л. Н. Хрусталеv. – Москва: Изд-во МГУ, 2005. – 544 с.