

ОБЗОР МЕТОДИК РАСЧЕТА ПОПРАВОК К ТЕМПЕРАТУРАМ ВОЗДУХА ДЛЯ ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИХ РАСЧЕТОВ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ, ПРОЕКТИРУЕМЫХ В УСЛОВИЯХ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ММГ

Кушнарёв А.Г.
ООО «НТЦ «Симмэйкерс»
e-mail: andrey.kushnarev@simmakers.ru

В работе проведен сравнительный анализ трех наиболее распространенных методик (СП 447.1325800.2019, СП 498.1325800.2020, СП 109.13330.2012), позволяющих провести учет температурного воздействия солнечной радиации на грунт, а также затрат тепла на испарение для уточнения теплообмена грунта с воздухом при проведении теплотехнических расчетов. Проведен сравнительный анализ методик по расчету температурной поправки с последующим численным моделированием температурного распределения в грунте. Продемонстрирована необходимость согласования нормативной документации, правил проектирования зданий и сооружений на ММГ.

Введение. При проектировании сооружений на многолетнемерзлых грунтах (ММГ) согласно требованиям нормативной документации необходимо проведение прогнозного теплотехнического расчета основания сооружения на весь период его эксплуатации [1] в таких программных комплексах, как, например, Frost 3D [2]. Одним из наиболее важных этапов проведения моделирования является сбор и подготовка данных, которые наиболее достоверно смогут описать естественное воздействие внешней среды на ММГ на границе «грунт – воздух». Как правило, для описания такого граничного условия инженер-проектировщик располагает следующими исходными данными, полученными по ближайшей метеостанции:

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

Температура воздуха зачастую определяется при помощи ближайшей метеостанции, в некоторых исключениях прибегают к определению при помощи нормативной документации [3]. Как правило, в значениях температуры не учитывается воздействие прямой солнечной радиации [4]. Это означает, что в теплотехнических расчетах может происходить неполный учет теплопоступления в грунт, что может приводить к оптимистичным результатам прогноза.

Учет дополнительного теплопоступления в грунт за счет солнечной радиации не регламентирован в СП 25.13330.2020 [3] (далее СП 25), а значит, не обязателен к учету при проведении теплотехнических расчетов зданий и сооружений на ММГ. Сюда же можно отнести и отсутствие требований к предоставлению в рамках инженерно-метеорологических изысканий таких исходных климатических данных, как значения радиационного баланса, эффективного излучения подстилающей поверхности, скорости испарения влаги и других, также отсутствующих в СП 131.13330.2020 [3] (далее СП 131).

В данной работе рассмотрены доступные в сводах правил инженерные методики по учету дополнительного теплового влияния солнечной радиации на грунт за счет поправки к температуре воздуха. Приведена инженерная методика по расчету радиационного баланса поверхности грунтов, необходимая для оценки поправки к температуре воздуха в летний период. Показаны отличия в расчете поправки между методиками, изложенными в СП 447.1325800.2019, СП 498.1325800.2020 и СП 109.13330.2012 (далее СП 447, СП 447 и СП 409).

Расчет температурной поправки. Далее в работе представлено три методики по учету температурной поправки за счет солнечной радиации, которые чаще всего фигурируют в нормативной документации. Рассмотрим расчет температурной поправки за счёт солнечной радиации согласно СП 447, пункту А.7, который также представлен в [5–9].

Расчетное значение среднемесячной приведенной температуры воздуха $t_{пр}$, °С, определяется по формуле:

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

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

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

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

где t – среднемесячная температура воздуха, °С; Δt_r и Δt_ε – поправки к среднемесячным температурам воздуха за счет солнечной радиации и испарения соответственно, °С; R – среднемесячная сумма радиационного баланса для рассматриваемого элемента поверхности, Вт/м²; α – коэффициент теплообмена на подстилающей поверхности, 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 [9].

Вторая методика из п. 5.2.13 СП 498 также представлена в [10–13] и имеет следующий вид:

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

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

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

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.

Третья методика была взята из СП 109 [14], конкретнее п. 6.1. Из методики следует, что расчет температуры поверхности определяется следующим образом:

$$t_n^3 = t_{н.ср.г} + \frac{\rho S}{\alpha_n}, \quad (8)$$

где $t_{н.ср.г}$ – среднегодовая температура наружного воздуха, °С [3]; ρ – коэффициент поглощения солнечной радиации поверхностью ограждающей конструкции; α_n – коэффициент теплоотдачи наружной поверхности ограждающей поверхности, равный 23 Вт/(м²·°С); S – количество суммарной (прямой и рассеянной) солнечной радиации, падающей на горизонтальную поверхность при учете фактической облачности [3].

Расчет радиационного баланса. Рассмотрим расчет радиационного баланса [15]:

$$R = Q(1 - A_k) - E_{эф} = Q(1 - A_k) - (E_c - b * E_a), \quad (9)$$

где A_k – альbedo 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.

Альbedo поверхности можно определить с помощью справочников и специализированной литературы [13, 16]. Значения параметра суммарной солнечной

радиации приведены в строительной климатологии [3]. Однако определение эффективного 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, приведенные выше методики из СП 447 и СП 498 без упрощений не применяются в текущей инженерной практике при проведении теплотехнических расчетов оснований сооружений.

Тем не менее в СП 498 [10–13] приведен упрощенный расчет радиационного баланса, который имеет следующий вид:

$$R = \begin{cases} 0,61 Q - 20, & 0,07 < A \leq 0,16 \\ 0,61 Q - 40, & 0,16 < A \leq 0,35, \end{cases} \quad (10)$$

где, согласно [12], значения альbedo $A \leq 0,16$ 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 ее альbedo и суммарной солнечной радиации.

Сравнение методик. Проведем сравнительный расчет температурной поправки для СП 447, СП 498 и СП 109 по формулам (1)–(8). В качестве начальных условий рассмотрен населенный пункт, находящийся на 69 градусах северной широты. Скорость ветра приведена в табл. 1. Расчет проведен без учета среднемесячной температуры воздуха t . Расчет радиационного баланса для двух случаев происходит по формулам (9)– (10). Положим, что в качестве входных параметров рассматривается оголенная песчаная поверхность. Тем самым в формуле (3) значение коэффициента $k = 0,3$, а в (10) альbedo $A \leq 0,16$. Результаты расчета температурной поправки по представленным методикам продемонстрированы на графике, приведенном на рис.1.

Таблица

Средняя многолетняя скорость ветра по месяцам

Месяц	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	XI	X	XI	XII
Скорость ветра, м/с	6,0	5,6	5,4	5,4	4,9	4,7	4,3	4,2	4,4	4,9	5,5	6,1

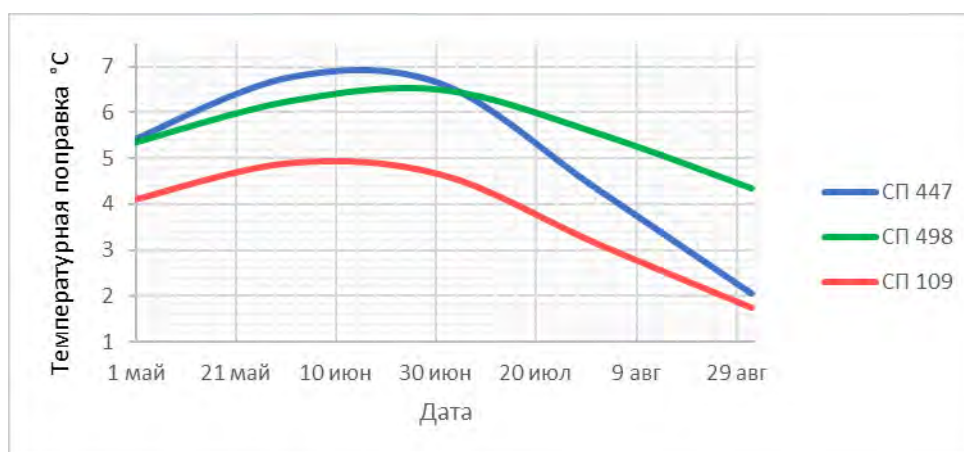


Рис 1. Расчет температурной поправки

Обсуждение результатов. Несмотря на одинаковые вводные данные, результаты полученных значений температурной поправки по трем сравниваемым методикам имеют существенные отличия. Принимается тот факт, что рассмотренные своды правил предназначены для проектирования разных типов сооружений на ММГ, которые учитывают их специфические особенности. Однако, если не брать во внимание 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.

Существуют иные методические подходы к оценке влияния факторов природной среды на формирование температур ММГ и величины сезонно-талого слоя [16, 17]. С другой стороны, в основополагающей нормативной документации по проектированию оснований и фундаментов, как [1], не представлены такого рода подходы для оценки дополнительного теплопритока в грунт.

Такая разрозненность информации в НТД, используемой при проектировании инженерных сооружений при одних и тех же специфических условиях ММГ, может приводить к принятию как слишком оптимистичных проектных решений, что увеличивает риски аварий при эксплуатации сооружений, так и решений с излишним запасом, что может повлиять на стоимость строительства. Это подчеркивает необходимость комплексно рассмотреть текущую нормативную документацию, представленную независимыми методиками по учету воздействия солнечной радиации и испарения, при проектировании сооружений в условиях распространения ММГ, согласовать ее между собой, определить область применимости предлагаемых методик, в частности, подготовить единые рекомендации по учету поправки к температурам воздуха за счёт солнечной радиации и испарения при проведении теплотехнических расчетов.

Вывод. В данной работе представлены три методики из СП 447, СП 498 и СП 109 для оценки поправки к температуре воздуха за счет влияния солнечной радиации и испарения. Ее учет необходим при проведении численных теплотехнических расчетов для описания теплообмена на границе грунта с воздухом в летний период. Показана простая инженерная методика для расчета радиационного баланса земной поверхности в зависимости от альбедо и суммарной солнечной радиации из СП 498. Наличие данной методики в нормативной документации позволяет применить её в инженерной практике и обосновать повышение температур воздуха в летний период.

Проведено сравнение полученных значений температурной поправки по рассматриваемым методикам. В результате определено, что значение поправки, рассчитанной по методике СП 498, в среднем на 0,57 °С выше, чем СП 447, и на 1,91 °С выше, чем СП 109. Показана необходимость согласования и стандартизации расчёта параметров теплообмена грунта с воздухом в рамках нормативной документации, регуливающей правила проектирования зданий и сооружений на ММГ. Необходима совместная работа различных проектных и научных организаций для усовершенствования сводов правил и методологии проведения теплотехнических расчетов в специализированных программных комплексах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. СП 25.13330.2020 Основания и фундаменты на вечномёрзлых грунтах СНиП 2.02.04-88 / Минстрой России. – Официальное издание. – Москва: Стандартинформ, 2021. – 135 с.
2. Программный комплекс для тепловых расчетов грунтов FROST 3D: [Электронный ресурс]. URL: <http://www.frost3d.ru> Дата обращения: 01.03.2022).
3. СП 131.13330.2020 Строительная климатология СНиП 23-01-99* / Минстрой России. – Официальное издание. – Москва: Стандартинформ, 2021. – 146 с.
4. Наставления гидрометеорологическим станциям и постам. Выпуск 3. Часть 1. Метеорологические наблюдения на станциях. // Ленинград: Гидрометеиздат, 1985. – 301 с.
5. Рекомендации по методике прогноза изменений мерзлотно-грунтовых условий при строительстве и эксплуатации сооружений на трассе БАМ. Проект, ОАО ЦНИИС, М., 1976. – 176 с.
6. 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.
7. СП 445.1325800.2018 Водопрпускные трубы и системы водоотвода в районах вечной мерзлоты / Минстрой России. – Официальное издание. – Москва: Стандартинформ, 2019. – 58 с.

8. СП 447.1325800.2019 Железные дороги в районах вечной мерзлоты. Основные положения проектирования / Минстрой России. – Официальное издание. – Москва: Стандартинформ, 2019. – 36 с.
9. Токтарев Д. Е. Формирование температурного поля поверхности земли с учетом изменения условий местности при строительстве автомобильных дорог через лесной массив // Техника и технологии строительства. – 2017. – №2 (10). – С.72–79
10. СНиП 11-47-80. Аэродромы. / Москва: Стройиздат, 1981.– 57 с.
11. СП 121.13330.2019 Аэродромы. СНиП 32-03-96 / Минстрой России. – Официальное издание. – Москва: Стандартинформ, 2019. – 94 с.
12. 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.
13. Хрусталева Л. Н. Основы геотехники в криолитозоне: Учебник. – М.: Изд-во МГУ, 2005. – 544 с.
14. СП 109.13330.2012. Холодильники
15. Ершов Э.Д. Общая геокриология: Учебник /– М.: Изд-во МГУ, 2002. – 682 с.
16. Ершов Э.Д. Инженерная геокриология: справочное пособие / – М.: Недра, 1991. – 439 с.
- 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.