

# ОБЗОР МЕТОДИК ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛООБМЕНА ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ В УСЛОВИЯХ ММГ

Грибовский Г.В., Шупляков М.Ю.

ООО «НТЦ «Симмэйкерс», Москва, Россия; [info@simmakers.ru](mailto:info@simmakers.ru)

В работе представлены различные методики оценки коэффициента теплообмена различных поверхностей с воздухом, взятые для анализа из специализированных источников литературы. Показаны условия, при которых были получены рассматриваемые зависимости. Сделан вывод о необходимости стандартизации и определения области применимости методик расчёта коэффициента теплообмена в рамках нормативной документации.

## REVIEW OF METHODS FOR DETERMINING THE HEAT TRANSFER COEFFICIENT FOR VARIOUS SURFACES UNDER PERMAFROST CONDITIONS

Gribovskii G.V., Shupliakou M.Ju.

LLC STC Simmakers, Moscow, Russia; [info@simmakers.ru](mailto:info@simmakers.ru)

The study considers various empirical formulas to estimate the heat transfer coefficient of surfaces depends on air speed and shows their sources in the references. The paper shows the conditions under which formulas were obtained. Concluded that formulas for calculating the heat transfer coefficient are needed to standardize in the regulatory documents and determine the scope of their applicability.

**Введение.** Для проведения теплотехнических расчётов теплового влияния инженерных сооружений на многолетнемерзлые грунты (ММГ) в программных комплексах для численного моделирования [12], необходимо определить коэффициент теплообмена различных поверхностей с воздухом. Коэффициент теплообмена является важным параметром для описания граничного условия 3 рода (1) при численном решении уравнения теплопроводности:

$$q = \alpha \Delta T \quad (1)$$

где  $q$  – тепловой поток на граничном условии по закону Ньютона, Вт/м<sup>2</sup>;  $\alpha$  – коэффициент теплообмена, Вт / (м<sup>2</sup> °С);  $\Delta T$  – перепад температур между поверхностью и воздухом, °С.

Теплообмен поверхностей с воздухом зависит от скорости ветра, физических параметров среды и характера обдуваемой поверхности [11]. Для упрощения вычисления коэффициента теплообмена для различных поверхностей, выведены упрощённые эмпирические методики, зависящие от скорости ветра. Выбор той или иной методики может значительно повлиять на результаты теплотехнического расчёта, в частности, на глубину сезонно-активного слоя. Целью данной работы является обзор таких методик для оценки коэффициента теплообмена  $\alpha$  от скорости ветра  $v$  для различных поверхностей, а также определение условий, при которых они были получены.

**Юргенс.** Одной из распространённых методик в современной инженерной практике является формула Юргенса (2), которую используют для оценки теплообмена грунта  $\alpha$  с воздухом [1,2,10], а также для системы растение–окружающая среда [5, 22]:

$$\alpha = 1,163 \times \{ 5,3 + 3,6 v^{0,78} \} = \{ 6,16 + 4,19 v, \quad 0 < v \leq 5,7 \}, \quad (2)$$

где  $v$  скорость ветра, м/сек.

Согласно [22], данная методика позволяет оценить коэффициент теплообмена при вынужденном движении воздуха у плоской шероховатой стенки. Также указывается, что основной недостаток этой методики заключается в том, что экспериментальные исследования производились на образцах небольших размеров и лишь при движении

воздуха параллельно поверхности образца. Юргенс исследовал вертикально расположенную пластину размером 0,5x0,5 м при температуре пластины 46–60 °С, и температуре воздуха 20 °С. Скорость движения воздуха достигала 30 м/сек.

**Франк.** Похожие эксперименты на открытом воздухе проводил Франк [5, 22], где размеры пластины составляли 0,7x0,7 м, температура пластины изменялась от 30 до 50 градусов, температура воздуха от 5 до 20 °С, а скорость движения воздуха от 0 до 4,16 м/сек. Формула Франка имеет следующий вид (3):

$$\alpha = 1,163 \times (3,8 + 3,1v) = 4,42 + 3,61v. \quad (3)$$

Значения по формуле Юргенса выше, чем по формуле Франка. Расхождения между ними объясняются различными условиями, в которых проводились испытания. При обработке этих данных методом теории подобия, М.А. Михеев вывел обобщающую их функциональную зависимость через критерии подобия, с которыми можно ознакомиться в [22].

Уточнённые формулы Франка (4) и Юргенса (5) имеют следующий вид:

$$\alpha = 1,163 \times (6,31v^{0,656} + 3,25e^{-1,91v}) = 7,34v^{0,656} + 3,78e^{-1,91v}, \quad (4)$$

$$\alpha = 1,163 \times (6,649v^{0,784} + 5,03e^{-0,6v}) = 7,73v^{0,784} + 5,85e^{-0,6v}. \quad (5)$$

Такой вид придан формулам с целью учесть вторым членом уравнения влияние естественной конвекции. Это влияние тем меньше, чем больше скорость ветра. Уточнённая формула Франка (4) также используется для определения  $\alpha$  наружных поверхностей ограждающих конструкций [19,15].

**Раман.** Также стоит отметить формулу Рамана (6), которая использовалась для определения теплообмена грунта с воздухом [5]. Однако подробностей получения данной формулы не было найдено в открытых источниках. Формула имеет следующий вид:

$$\alpha = 1,163 \times (5,3 + 3,1v) = 6,16 + 3,61v. \quad (6)$$

**Павлов.** На основе данных измерений на геокриологических стационарах получена эмпирическая формула (7) по расчёту коэффициента теплообмена, которая учитывает как динамическую, так и термическую стратификацию атмосферы [8,9]:

$$\alpha = 1,163 \times \sqrt{v} \left( 6 + \frac{3,1\Delta T}{v^2} \right) = \sqrt{v} \left( 6,98 + \frac{3,605\Delta T}{v^2} \right). \quad (7)$$

На основании формулы (7) было получена приближённая зависимость коэффициента теплообмена от скорости ветра:

$$\alpha = \sqrt{v} \left( 6,98 + \frac{7,21}{v^2} \right). \quad (8)$$

В формуле Павлова (8) принято  $\Delta T = 2$  °С из тех соображений, что для открытого пространства с травянистой или тундровой растительностью средние за летний сезон значения  $\Delta t$  изменяются от -0,3 до 4,4 °С. Также в формуле (7) и (8) должна быть задана скорость ветра, полученная на высоте 1 м. При наличии данных по скорости ветра на других высотах, их можно пересчитать по формулам, приведённым в [9].

В источнике [9] отмечается, что оголённая поверхность почвы характеризуется меньшими значениями коэффициента теплообмена, чем травянистая растительность. Приближённо,  $\alpha$  можно рассчитать по формуле (8), занизив результат на 5–10%.

**СП 121.13330.** В своде правил по проектированию аэродромных одежд и земляного полотна для них, а также по требованиям к инженерной подготовке территории [14,18,20,21], приведена формула (9) для расчёта коэффициента теплообмена на границе дневной поверхности насыпи с атмосферой:

$$\alpha = \{ 2,4 v + 2,3, \quad v \leq 4,6 \quad 3,7 (v - 1), \quad v > 4,6. \quad (9)$$

**СП 447.1325800.** В сводах правил по проектированию железнодорожных насыпей, мостов, и водопропускных труб в условиях ММГ [1517], представлена следующая формула (10) для определения  $\alpha$  на поверхности грунта:

$$\alpha = 1,16 \times 10 \sqrt{v} = 11,6 \sqrt{v}. \quad (10)$$

**Кухлинг.** В справочнике по физике Кухлинга Х. [6] приведена формула (11) для определения коэффициента теплообмена для гладких поверхностей, контактирующих с воздухом:

$$\alpha = 5,6 + 4v. \quad (11)$$

Формула приведена совместно с коэффициентами теплоотдачи металлических поверхностей в различных условиях. Дополнительную информацию по особенностям получения и применения данной формулы в справочнике не приведено. Тем не менее, если обратиться к [22] и взять формулу Юргенса для полированных покрытий и перевести размерность из ккал / (м<sup>2</sup> °С час) в Вт / (м<sup>2</sup> °С), то получится формула Кухлинга (11):

$$\alpha = 1,163 \times \{ 4,8 + 3,4 v \quad 6,12 v^{0,78} \} = \{ 5,58 + 3,95 v, \quad 0 < v \leq 5 \quad (12)$$

Таким образом, изначальная формула Кухлинга определена до 5 м/сек, а условия, при которых она получена, аналогичны формуле Юргенса для шероховатых поверхностей, приведённой в пункте выше.

**Кузьмин.** В работах [3,7] приводится формула (13), которая получена из работ Кузьмина [4] для расчёта коэффициента теплообмена между снегом и воздухом:

$$\alpha = 3,4 + 2,2v. \quad (13)$$

При изучении [4], формула (13) в явном виде не представлена и, видимо, получена из более сложных соотношений, приведённых в книге, а также с определёнными допущениями и упрощениями.

**Закключение.** В работе были рассмотрены упрощённые формулы по определению коэффициента теплообмена различных поверхностей в зависимости от скорости ветра. Для некоторых из формулы были показаны условия, при которых они были получены. Необходимы дальнейшие исследования литературы для выяснения особенностей получения формул Римана, СП 121.13330, СП 447.1325800, и Кузьмина. Также, при дальнейших исследованиях стоит обратить внимание на формулы, полученные методами теории подобия, которые позволяют более подробно оценить влияние свойств среды и характеристик обдуваемых поверхностей на коэффициент теплообмена [5,11,22]. Понимание особенностей получения упрощённых формул для расчёта коэффициентов теплообмена позволит улучшить качество проведение численных теплотехнических расчётов влияния инженерных сооружений на ММГ.

Также стоит отметить, что в нормативной документации [14–18] по проектированию инженерных сооружений на ММГ приведены разные формулы для оценки коэффициента теплообмена грунта с воздухом, а в инженерной практике могут использоваться совершенно другие подходы. Методики, применяемые для расчёта

коэффициента теплообмена для поверхности грунта или насыпи, могут отличаться между собой до двух раз (рисунок). Это может приводить к недооценке либо переоценке теплового влияния на грунт в численных теплотехнических расчётах. Необходима стандартизация методов расчёта коэффициентов теплообмена в рамках нормативной документации и определение области применимости рассмотренных методик.

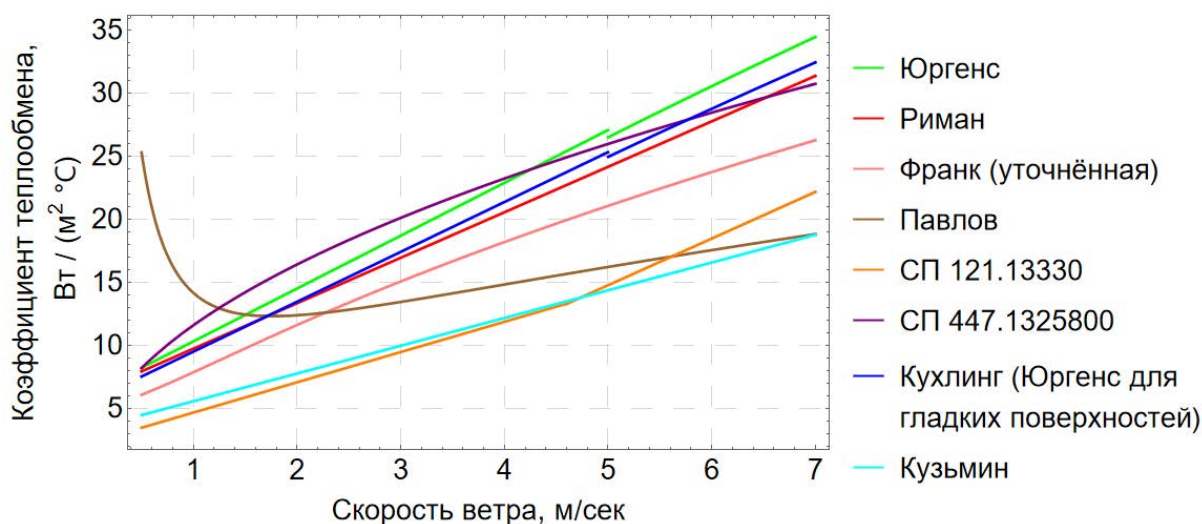


Рисунок. График изменения коэффициента теплообмена от скорости ветра по различным формулам

#### Литература

1. Бровцин В.Н. Математическое описание процессов тепло- и влагопереноса в профилированной почве. / В.Н. Бровцин, А.А. Попов. // Технологии и технические средства механизированного производства продукции растениеводства и животноводства – 2015. Вып. 87., – С 163-176.
2. Гишкелюк И. А. Прогнозирование оттаивания многолетнемерзлых грунтов вокруг подземного трубопровода большой протяженности / И. А. Гишкелюк, Ю. В. Станиловская, Д. В. Евланов // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2015. – № 1 (17). С. 20-25.
3. Котляков В.М. Оценка термического сопротивления снежного покрова по температуре грунта / В.М. Котляков, А.В. Сосновский. // Лёд и Снег. – 2021. – Т. 61. – № 2. – С. 195-205.
4. Кузьмин П.П. Процесс таяния снежного покрова / П.П. Кузьмин – Ленинград: Гидрометеорологическое изд-во. – 1961. – 345 с.
5. Куртнер Д.А. Расчёт и регулирование теплового режима в открытом защищённом грунте. / Д.А. Куртнер, А.Ф. Чудновский. – Ленинград: Гидрометеорологическое издательство. – 1969. – 299 с.
6. Кухлинг Х. Справочник по физике / Х. Кухлинг. – М.: Изд-во "Мир". – 1985. – 470 с.
7. Осокин Н.И. Пространственное распределение термического сопротивления снежного покрова на территории России и его влияние на промерзание и протаивание грунтов / Н.И. Осокин, А.В. Сосновский // Лёд и Снег. – 2016. – Т.56. – №1. – С. 52-60.
8. Павлов А.В. Мониторинг Криолитозоны / А.В. Павлов. – Новосибирск: Академическое издательство «Гео». – 2008. – 229 с.
9. Павлов А.В. Теплофизика ландшафтов / А.В. Павлов. Новосибирск: Издательство «Наука», сибирское отделение. – 1979. – 284 с.
10. Перльштейн Г.З. Теплообмен деятельного слоя с атмосферой: Теоретические и прикладные аспекты / Г.З. Перльштейн // Криосфера Земли. – 2002, – Т. VI. – № 1. – С. 25-29.
11. Примаков С.С. Определение границ микроклиматических характеристик при расчёте параметров теплообмена в процессе адаптации геокриологической модели / С.С. Примаков, И.В. Забора // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. – 2019. – Т. 5. – № 4 (20). – С. 79-97.

12. Программный комплекс для тепловых расчетов грунтов FROST 3D: [Электронный ресурс]. URL: <http://www.frost3d.ru> (Дата обращения: 01.03.2022).
13. СП 50.13330.2012 Тепловая защита зданий. Актуализированная редакция СНиП 23-02-2003 (с Изменениями № 1, 2) / Министерство регионального развития Российской Федерации. – Официальное издание. – Москва: Минрегион России, 2012. – 95 с.
14. СП 121.13330.2019 Аэродромы. СНиП 32-03-96 / Минстрой России. – Официальное издание. – Москва: Стандартиформ, 2019. – 94 с.
15. СП 354.1325800.2017 Фундаменты опор мостов в районах распространения многолетнемерзлых грунтов. Правила проектирования и строительства / Минстрой России. – Официальное издание. – Москва: Стандартиформ, 2018. – 74 с.
16. СП 445.1325800.2018 Водопропускные трубы и системы водоотвода в районах вечной мерзлоты / Минстрой России. – Официальное издание. – Москва: Стандартиформ, 2019. – 58 с.
17. СП 447.1325800.2019 Железные дороги в районах вечной мерзлоты. Основные положения проектирования / Минстрой России. – Официальное издание. – Москва: Стандартиформ, 2019. – 36 с.
18. СП 498.1325800.2020 Основания и фундаменты зданий и сооружений на многолетнемерзлых грунтах. Требования к инженерной подготовке территории / Минстрой России. – Официальное издание. – Москва: Стандартиформ, 2021. – 35 с.
19. Фокин К. Ф. Строительная теплотехника ограждающих частей зданий. Изд. 4-е, перераб. и доп. М., Стройиздат, 1973, с. 287
20. Хрусталева Л. Н. Основы геотехники в криолитозоне: Учебник. / Л. Н. Хрусталева. – Москва: Изд-во МГУ, 2005. – 544 с.
21. Хрусталева Л. Н. Прогноз теплового и механического взаимодействия инженерных сооружений с многолетнемерзлыми грунтами в примерах и задачах: Учебное пособие. / Л. Н. Хрусталева, Л.В. Емельянова – Москва; Берлин : Директ-Медиа. – 2019. – 162 с.
22. Шкловер А.М. Основы строительной теплотехники жилых и общественных зданий / А.М. Шкловер, Б.Ф. Васильев, Ф.Б. Ушков. –Москва : Госстройиздат. – 1956. – 350 с.