

Сергей Сергеевич ПРИМАКОВ¹
Игорь Васильевич ЗАБОРА²

УДК 536.244

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГРАНИЦ МИКРОКЛИМАТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРИ РАСЧЕТЕ ПАРАМЕТРОВ ТЕПЛООБМЕНА В ПРОЦЕССЕ АДАПТАЦИИ ГЕОКРИОЛОГИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

¹ кандидат технических наук, начальник отдела
многолетнемерзлых грунтов, НОВАТЭК-НТЦ (г. Тюмень)
primakovss@yandex.ru

² ассистент кафедры прикладной и технической физики,
Тюменский государственный университет (г. Тюмень)
zaboraiv@yandex.ru

Аннотация

Проведение теплотехнических расчетов является основополагающим этапом при проектировании в районах с распространением многолетнемерзлых грунтов (ММГ). На сегодняшний день данный вид расчетов хорошо изучен и реализуется различными программными комплексами на основе численных методов. В проектировании объектов топливно-энергетического комплекса (ТЭК) существует обязательное требование для данного вида расчетов, заключающееся в проведении расчета на весь срок эксплуатации объекта.

Несмотря на обилие разработанных методик и подходов для решения данных задач, существует некая неопределенность в задании граничного условия на поверхности теплообмена грунта с воздушной средой. Данная неопределенность вызвана как многообразием факторов, оказывающих непосредственное влияние на теплообмен на поверхности грунта, так и сложностью их учета ввиду цикличности данных факторов на протяжении периода эксплуатации сооружения. В научной литературе встречаются различные варианты задания граничного условия на поверхности грунта. Возникает

Цитирование: Примаков С. С. Определение границ микроклиматических характеристик при расчете параметров теплообмена в процессе адаптации геокриологической модели / С. С. Примаков, И. В. Забора // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. 2019. Том 5. № 4 (20). С. 79-97. DOI: 10.21684/2411-7978-2019-5-4-79-97

вопрос о корректности применения определенного способа, ведь задание верхнего граничного условия различными методами повлечет за собой получение различных результатов в дальнейшем моделировании. При этом нельзя говорить о несостоятельности какой-либо из методик задания верхнего граничного условия.

В статье рассмотрены некоторые из встречающихся в научной литературе методов задания верхнего граничного условия от различных авторов и проведен их анализ. По его результатам приводится комплексный способ задания граничных условий на поверхности, а также описывается методика определения параметров теплообмена на поверхности грунта с помощью локальных микроклиматических характеристик для составления физически обоснованных граничных условий при численном моделировании геокриологических процессов.

Ключевые слова

Численное моделирование, многолетнемерзлые грунты, параметры теплообмена, геокриологическое моделирование, граничные условия, микроклиматические характеристики, теплотехнические расчеты.

DOI: 10.21684/2411-7978-2019-5-4-79-97

Введение

Географическое расположение нашей страны, а также интенсивные темпы наращивания мощностей в развитии топливно-промышленного комплекса (ТЭК), расположенного преимущественно в регионах с распространением многолетнемерзлых грунтов (ММГ), требуют как разработки новых, так и совершенствования существующих методик решения задач по взаимодействию объектов инфраструктуры с криолитозоной. На сегодняшний день разработано большое количество программных комплексов по выполнению прогнозных теплотехнических расчетов численными методами. Как известно, результаты таких расчетов определяются главным образом сложными граничными условиями на поверхности грунта.

Основная часть

Необходимость повышения точности численного геокриологического моделирования объясняется зависимостью физико-механических характеристик мерзлых грунтов от его температуры. В частности, теплотехнические расчеты и геокриологическое прогнозирование играют большую роль при определении несущей способности свайных фундаментов [13]. Корректность геокриологической модели в целом оценивается путем сопоставления расчетных параметров фактическим натурным наблюдениям [14]. Однако на практике построение достоверной модели, как правило, является нетривиальной задачей, зависящей от большого количества неопределенных факто-

ров. Поэтому при определении граничного условия на поверхности грунта (верхнего граничного условия, далее — ВГУ) зачастую используются некоторые приведенные, усредненные параметры, величина которых в ряде случаев не обоснована, а граничные значения таких параметров неизвестны, при этом граничные условия на нижней границе достаточно хорошо рассмотрены [4]. Известно, что на достаточно небольшой территории порядка нескольких гектаров и даже меньше может наблюдаться значительная неоднородность многолетнемерзлых грунтов, которая определяется не только геологическими особенностями, но и большей частью характером поверхности (рельеф или уклоны, тип растительности или почвы и др.). Все эти факторы существенно влияют на теплообмен на поверхности грунта и определяют не только температуру многолетнемерзлых грунтов, но и их положение, глубину и мощность. В статье рассматривается ряд локальных микроклиматических факторов, определяющих теплообмен на поверхности грунта на определенной территории, а также предлагается набор параметров, позволяющих связать граничные значения этих параметров и способ их учета при составлении ВГУ.

Влиянием теплопереноса за счет осадков, фильтрации и испарения в зоне распространения мерзлоты в первом приближении можно пренебречь ввиду малого объема жидких осадков на данных территориях, малой величины сезонно-талого слоя, мероприятий по водоотведению на объектах инфраструктуры и т. п. Степень влияния теплопереноса на результаты геокриологического моделирования будут рассмотрены в последующих работах.

К кондуктивным факторам можно отнести снежный покров в зимний период, где теплопередача от воздуха к поверхности грунта определяется высотой снежного покрова и его теплопроводностью. Высота снежного покрова, как правило, легко определяется в рамках инженерных изысканий. Неопределенным фактором в численной модели остается теплопроводность снежного покрова, которая может меняться по глубине снежного покрова и по времени в течение зимнего периода. В методике предлагается использовать усредненное значение теплопроводности снежного покрова, ограничив ее величину диапазоном известных экспериментальных значений. Анализ литературы показал, что в исследованиях, приведенных в [8, 12], теплопроводность снега варьируется в диапазоне 0,11-0,5 Вт/(м·К). В работе [15] приводятся значения теплопроводности снега в диапазоне 0,029-0,316 Вт/(м·К). В работе [9] говорится о величине теплопроводности снега до 0,9 Вт/(м·К). В справочнике [16] приводятся значения теплопроводности снега до 1,279 Вт/(м·К). Различные значения теплопроводности снега согласно литературным источникам сведены в таблицу 1. Следовательно, кондуктивная часть микроклиматических характеристик определена как диапазон значения теплопроводности от 0,029 Вт/(м·К) до 1,279 Вт/(м·К).

Таблица 1

Различные значения теплопроводности снега в зависимости от его состояния

Table 1

Different values of snow thermal conductivity depending on its condition

Характеристики слоя снега	Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К)
Свежевыпавший	0,029
Однодневный	0,095
Сырой, свежевыпавший	0,122
Сухой, метелевый	0,244
Уплотненный ветром	0,366
Мокрый, среднезернистый	0,610
Очень мокрый, среднезернистый	0,732
Лежалый	0,732
Смерзшийся	0,900
Многолетний наст	1,279

К факторам излучения можно отнести солнечную радиацию и альбедо поверхности грунта. Суммарная солнечная радиация не входит в перечень обязательных исследуемых характеристик при проведении инженерных изысканий и в первом приближении определяется в зависимости от широты, несмотря на разные климатические деления по долготе. Однако в целом величина суммарной солнечной радиации может считаться одинаковой для достаточно большой территории, т. к. относится к глобальным климатическим факторам. В такой ситуации неопределенным фактором в численной модели остается альбедо поверхности, которое может достаточно сильно меняться в пределах небольшой территории за счет характера поверхности, рельефа, различной растительности или состояния почвы и т. д., однако не может превышать значения, полученные экспериментально. В различных источниках приводятся следующие значения альбедо: в работе [9] приводятся значения альбедо поверхности от 8 до 35%, в работе [5] верхний предел альбедо оценивается в 40%, в книге [2] значения альбедо различных поверхностей земли варьируются от 8 до 40%. Практически во всех источниках альбедо различных поверхностей земной поверхности имеют схожие значения. Значения альбедо различных поверхностей сведены в таблицу 2.

Таким образом, можно говорить о практическом диапазоне альбедо поверхности от 8 до 40%. Следовательно, часть микроклиматических характеристик в части излучения определена как диапазон значений альбедо от 8 до 40%.

Таблица 2

Значения альбедо различных поверхностей

Table 2

Albedo values of different surfaces

Тип поверхности	Альбедо, %
Чернозем влажный	8
Чернозем сухой	14
Глина влажная	16
Глина сухая	23
Травы высохшие	19
Травы зеленые	26
Пшеница	10-25
Песок желтый	34
Песок белый	40

Более сложным микроклиматическим фактором, определяющим теплообмен с поверхностью грунта, является конвективный фактор, который включает в себя скорость ветра и характер обдуваемой поверхности, которые определяют коэффициент теплопередачи от воздуха к грунту.

Так, К. А. Финников, А. М. Корзун и А. В. Колесниченко в статье [17] коэффициент теплоотдачи определяют следующим образом:

$$\alpha = 0,58 \cdot \frac{\lambda}{L} \cdot \text{Re}^{0,471} \cdot \text{Pr}^{0,33}, \quad (1)$$

где от скорости ветра зависит значение числа Рейнольдса, определяемое как:

$$\text{Re} = \frac{v \cdot L}{\nu}$$

С другой стороны, согласно уравнению Нуссельта [7], коэффициент теплоотдачи может быть выражен как:

$$\alpha = \frac{\text{Nu} \cdot \lambda}{L}, \quad (2)$$

где $\text{Nu} = 0,5\sqrt{\text{Re}}$ при $1 < \text{Re} < 10^4$, $\text{Nu} = 0,25\text{Re}^{0,6}$ при $\text{Re} > 10^4$.

Кроме того, например, в работе В. Н. Луканина [11] коэффициент теплоотдачи определяется формулой:

$$\alpha = 0,664 \frac{\lambda}{L} \cdot \sqrt{\text{Re}} \cdot \sqrt[3]{\text{Pr}}. \quad (3)$$

Во всех перечисленных выше случаях коэффициент теплообмена зависит от скорости ветра через критерий подобия — число Рейнольдса, однако есть и другие методики определения коэффициента теплообмена.

Так, в статье Г. М. Долгих, Г. В. Аникина, И. П. Рило и К. А. Спасенниковой [6] коэффициент теплоотдачи определяется соотношением:

$$\alpha = \frac{\rho \cdot c_p \cdot (a_0 \cdot k)^2 \cdot v(10)}{\ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \cdot \ln\left(\frac{10}{z_0}\right)}, \quad (4)$$

где v — скорость ветра; z — высота, на которой измеряется температура атмосферы; z_0 — параметр, учитывающий неровность поверхности; k — постоянная Кармана; ρ — плотность воздуха.

В статье И. А. Гишкелюк, Ю. В. Станиславской и Д. В. Евланова [1] коэффициент теплообмена определяется с учетом условия:

$$\alpha = \begin{cases} 6,16 + 4,19 \cdot v, & 0 < v < 5, \\ 7,56 \cdot v^{0,78}, & 5 < v < 30, \end{cases} \quad (5)$$

где v — скорость ветра.

В справочнике по физике Х. Кухлинга [10] коэффициент теплообмена предлагается определять как:

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

где v — скорость ветра.

В данных методиках коэффициент теплообмена явно зависит от скорости ветра.

Полученные по различным методикам зависимости коэффициента теплообмена от скорости ветра были разбиты на две группы и приведены на рис. 1 и рис. 2.

В отличие от теплопроводности снега или альбедо поверхности, максимальное и минимальное значение коэффициента теплоотдачи, определенное по различным методикам, зависит от скорости ветра. Таким образом, можно предположить, что фактическое значение коэффициента теплообмена для каждого значения скорости ветра находится внутри некоторого диапазона, ограниченного предельными верхними и нижними зависимостями. При этом границы этого диапазона будут определяться в зависимости от того, какие из методик при данной скорости ветра будут давать максимальные и минимальные значения.

Из анализа зависимостей коэффициента теплоотдачи от скорости ветра можно увидеть, что минимальная граница описывается зависимостью (1) (рис. 1), а максимальная — зависимостью (5) для скоростей ветра до 10 м/с и зависимостью (6) для скоростей ветра более 10 м/с. Однако зависимости (5) и (6) близки по значениям и отличаются друг от друга на величину погрешности.

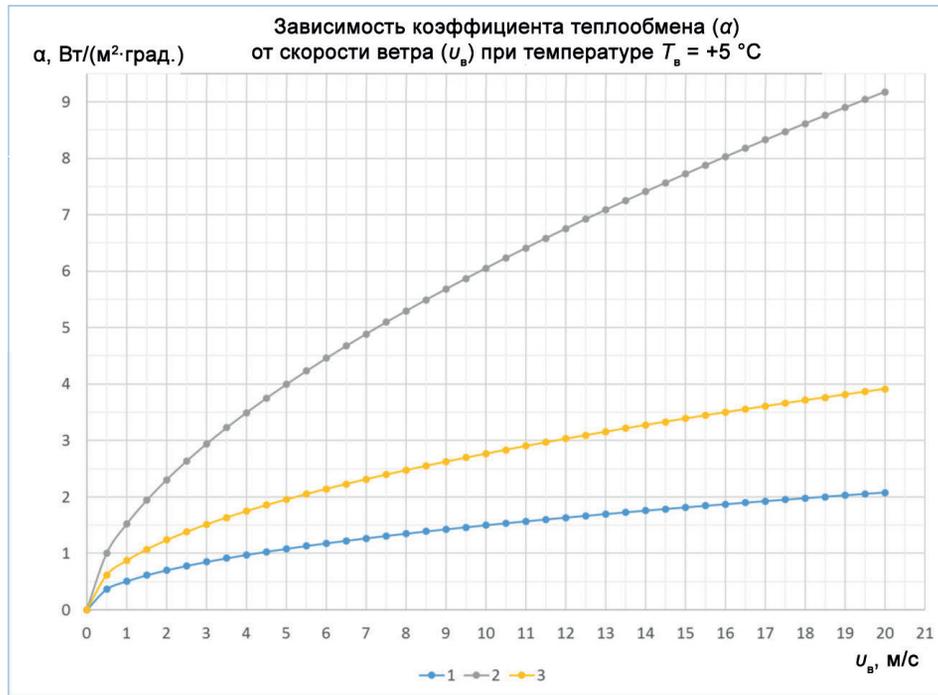


Рис. 1. Зависимости коэффициентов теплообмена от скорости ветра при температуре воздуха +5 °С по методикам: 1 — [17], 2 — [7], 3 — [11]

Fig. 1. Dependence of heat exchange coefficients on wind speed at air temperature of +5 °C. According to methods: 1 — [17], 2 — [7], 3 — [11]

Таким образом, их можно объединить некоторой системой (7), описывающей функцию, которая в свою очередь характеризует верхнюю границу диапазона возможных значений коэффициента теплоотдачи от скорости ветра:

$$\alpha = \begin{cases} 6,16 + 4,19 \cdot v, & 0 < v < 5, \\ 7,56 \cdot v^{0,78}, & 5 < v < 10, \\ 5,6 + 4 \cdot v, & v > 10. \end{cases} \quad (7)$$

Очевидно, что каждая из зависимостей была получена для конкретной поверхности с определенными значениями шероховатости и другими параметрами, влияющими на коэффициент теплоотдачи в целом. Также ясно, что как минимум между зависимостями (1) и (7) может существовать бесконечное множество промежуточных зависимостей в более-менее полной мере, характеризующих поверхности с различными условиями теплопередачи.

Такие зависимости могут быть описаны, например, путем объединения граничных зависимостей (1) и (7) пропорционально некоторому параметру П.

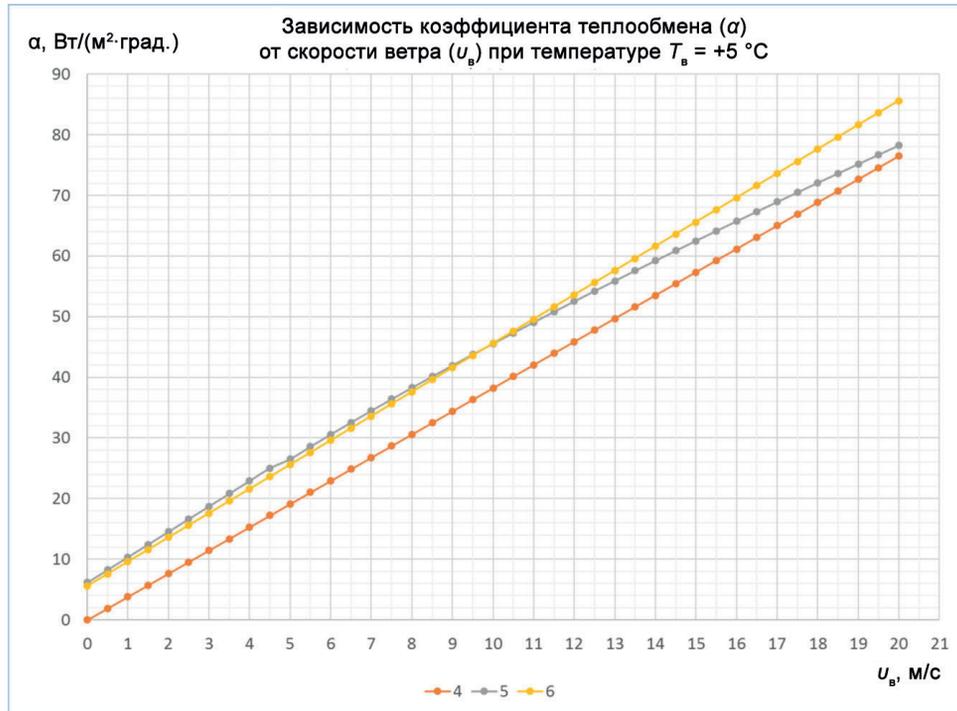


Рис. 2. Зависимости коэффициентов теплообмена от скорости ветра при температуре воздуха $+5\text{ }^\circ\text{C}$ по методикам: 4 — [6], 5 — [1], 6 — [10]

Fig. 2. Dependence of heat exchange coefficients on wind speed at air temperature of $+5\text{ }^\circ\text{C}$. According to methods: 4 — [6], 5 — [1], 6 — [10]

В итоге границы значений коэффициента теплообмена в зависимости от скорости ветра определяются как некие функции — f_1 и f_2 .

Функция f_1 , описывающая нижнюю границу значений коэффициента теплообмена, представляет собой:

$$f_1 = \alpha = 0,58 \cdot \frac{\lambda}{L} \cdot \text{Re}^{0,471} \cdot \text{Pr}^{0,33}.$$

Функция f_2 , описывающая верхнюю границу значений коэффициента теплообмена, представляет собой:

$$f_2 = \alpha = \begin{cases} 6,16 + 4,19 \cdot v, & 0 < v < 5, \\ 7,56 \cdot v^{0,78}, & 5 < v < 10, \\ 5,6 + 4 \cdot v, & v > 10. \end{cases}$$

Связав f_1 и f_2 пропорциональным параметром Π , получаем некую функцию f :

$$f = \Pi \cdot f_1 + (1 - \Pi) \cdot f_2. \quad (8)$$

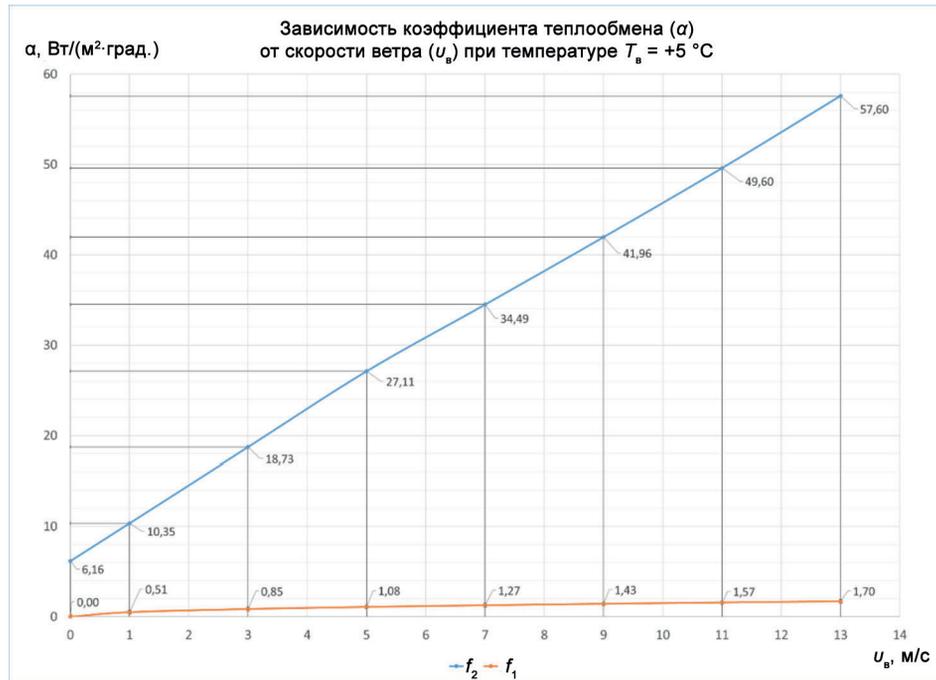


Рис. 3. Область коэффициента теплообмена, определяемая функцией $f(8)$ и ограниченная функциями f_1 и f_2 (красная штриховка)

Fig. 3. The heat exchange coefficient area defined by function $f(8)$ and limited by functions f_1 and f_2 (red hatch)

На рис. 3 приведена область значений коэффициента теплообмена, ограниченная функциями f_1 и f_2 .

Параметр Π варьируется в пределах от 0 до 1, где при $\Pi = 0$ функция $f = f_2$, тогда как при $\Pi = 1$ функция $f = f_1$.

Исходя из того, что формулы (1)-(6) уже содержат в себе зависимость от скорости ветра, можно предположить, что параметр Π от скорости ветра не зависит. Учитывая, что характер поверхности также не зависит от скорости ветра, можно сделать вывод, что параметр Π является характеристикой поверхности, обуславливающей конвективный теплообмен.

Таким образом, можно говорить о том, что конвективная часть микроклиматических характеристик определена как параметр поверхности Π с диапазоном значений от 0 до 1.

Например, на рис. 4 приведена палетка различных функций f в зависимости от параметра Π , где при скорости ветра, равной 5 м/с, и при параметре Π , равном 0,4, функция f , а следовательно, и коэффициент теплообмена α примет значение, равное 16,7 Вт/(м²·град.).

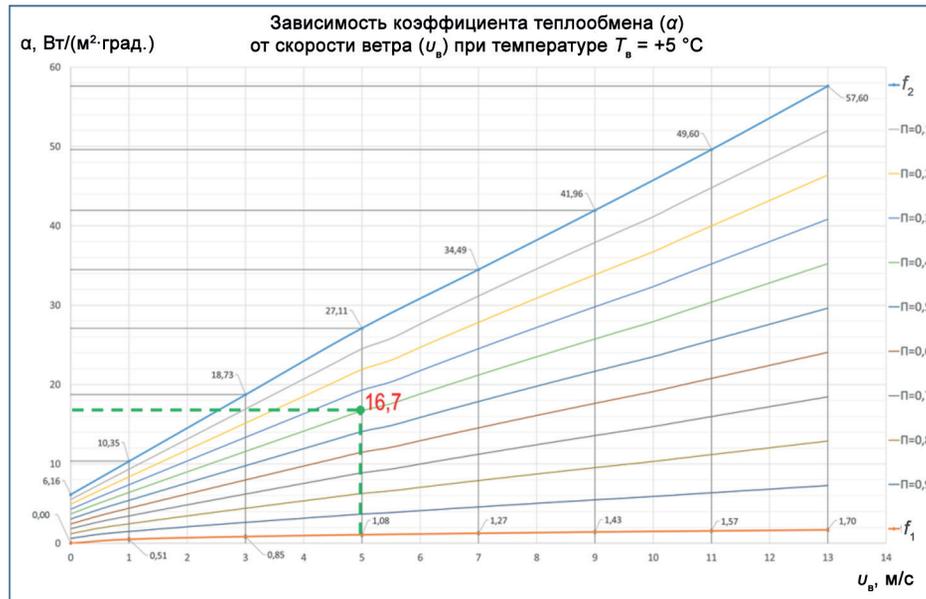


Рис. 4. Палетка различных функций f в зависимости от параметра P , позволяющая определять коэффициент теплообмена α

Fig. 4. A stick of various functions f , depending on the parameter P , allowing to determine the coefficient of heat exchange α

При этом значение коэффициента теплообмена определяется двумя параметрами: параметром P , характеризующим природу поверхности грунта, и скоростью ветра.

Набор микроклиматических характеристик, описывающих данную территорию, а именно альбедо поверхности, теплопроводность снега и характерный параметр поверхности P , будем называть комплексным микроклиматическим параметром (КМП).

Методика определения микроклиматических характеристик

Методика определения КМП сводится к решению обратной задачи, где в качестве определяемых параметров фигурируют отдельные параметры КМП, альбедо, теплопроводность снега и параметр P . При этом решается задача распространения тепла в грунте с учетом фазовых переходов с целью определения сезонной динамики распределения температуры грунта в естественных условиях.

Поскольку в отсутствии сооружений вертикальные тепловые потоки значительно превышают латеральные, а латеральная неоднородность грунта, как правило, значительно менее выражена, чем вертикальная, то такая задача может решаться в одномерной постановке.

Критерием решения такой задачи является соответствие динамики распределения температур в грунте фактическим замерам, полученным в результате

полевых исследований, проведенных в рамках инженерных изысканий, геотехнического мониторинга или иных натуральных наблюдений. Подробно критерии достоверности модели были рассмотрены в статье [14].

В процессе решения обратной задачи составляющие КМП варьируются в допустимых пределах, установленных выше. Понятно, что наличие нескольких варьируемых параметров могут привести к определению нескольких решений. Определение истинного решения сводится к анализу среднеквадратичных отклонений в некоторых точках расчетного температурного разреза от фактического по глубине на определенную дату. Ввиду того, что параметры КМП меняются циклично в течение года, искомое температурное распределение будет представлено в виде двумерной диаграммы, где по оси абсцисс обозначается момент времени в году, а по оси ординат, направленной вниз, — глубина от поверхности грунта. Такую диаграмму будем называть пространственно-временной характеристикой (ПВХ) данной точки поверхности. Полученный набор значений приводит в соответствие данный вариант КМП с полученной модельной ПВХ. При этом в каждом конкретном случае определяется соответствие полученной ПВХ критериям достоверности. Вариант КМП, наиболее удовлетворяющий данной ПВХ, является решением.

Таким образом, определяется КМП, полностью характеризующий теплообмен на поверхности для данной территории.

В качестве примера была построена математическая модель для геологического разреза, приведенного в таблице 3. Характеристики грунтов, встречающихся в данном геологическом разрезе, приведены в таблице 4. Распределение температуры по глубине, полученное в ходе проведения инженерно-геологических изысканий на 15.04.2017, приведено в таблице 5. Климатические условия для данной территории приведены в таблице 6. Характеристики, приведенные в таблицах 3-6, получены в результате инженерно-геологических изысканий в соответствии с ГОСТ 25358-2012 «Грунты. Метод полевого определения температуры» [3].

В результате применения описанной выше методики была определена ПВХ для данной точки поверхности (рис. 5) со следующими КМП: расчетная теплопроводность снега составила 0,56 ккал/(м·ч·С), альbedo поверхности — порядка 23%, а параметр поверхности Π — 0,1, что согласуется со справочными данными.

Проверяя достоверность данной ПВХ в соответствии с критериями достоверности [14], устанавливаем следующее:

- 1) глубина сезонно-талого слоя (СТС) в распределении, полученном по результатам инженерных изысканий, совпадает с глубиной СТС на ПВХ и составляет 2 м;
- 2) среднегодовая температура на глубине нулевых амплитуд (10 м), полученная по результатам инженерных изысканий, равна $-0,5$ °С, расчетная температура на глубине нулевых амплитуд равна $-0,51$ °С, при этом отклонение составляет 0,01 °С, что не превышает погрешности приборов измерения температуры;

3) минимальная сумма среднеквадратичных отклонений в некоторых точках расчетного температурного разреза от фактического по глубине на 15.04.2017 составила 0,1206.

Таким образом, можно сделать вывод, что построенная ПВХ для данной точки поверхности является достоверной, модель построена корректно, а определенные при этом параметры КМП, описывающие теплообмен на заданной территории, являются искомыми и могут применяться в дальнейшем моделировании.

Таблица 3

Геологический разрез, используемый в примере

Table 3

Geological section used in the example

Мощность, м	ИГЭ
3	10
1,1	1
2,8	4
50	8

Таблица 4

Распределение температуры по глубине на 15.04.2017

Table 4

Temperature distribution by depth as of 15 March 2017

<i>h</i> , м	0,5	1	1,5	2	2,5	3	4	5	6
<i>T</i> , °С	-6,7	-5,4	-4,6	-3,9	-3,1	-2,1	-0,2	-0,3	-0,4
<i>h</i> , м	7	8	9	10	11	12	13	14	15
<i>T</i> , °С	-0,5	-0,5	-0,5	-0,5	-0,5	-0,5	-0,5	-0,5	-0,5

Таблица 5

Характеристики грунтов, встречающихся в геологическом разрезе

Table 5

Characteristics of soils encountered in the geological section

ИГЭ	Тип грунта	Плотность грунта, кг/м ³	Влажность грунта, д. ед.	Теплоемкость талого грунта, ккал/м ³
1	Торф	980	4,27	902,148
4	Суглинок	1 360	0,78	840,095
8	Супесь	1 895	0,23	670,644
10	Песок	1 975	0,21	591,885

Окончание таблицы 5

Table 5 (end)

ИГЭ	Теплоемкость мерзлого грунта, ккал/м ³	Теплопроводность талого грунта, ккал/(м·ч·К)	Теплопроводность мерзлого грунта, ккал/(м·ч·К)	Температура начала замерзания грунта, °С
1	572,792	0,696	1,144	-0,22
4	510,740	1,350	1,677	-0,20
8	541,766	1,488	1,582	-0,15
10	520,286	1,909	2,098	-0,10

Таблица 6

Table 6

Климатические условия площадки

Climatic conditions of the platform

Месяц	Температура воздуха, °С	Скорость ветра, м/с	Высота снежного покрова, м	Кол-во солн. рад., ккал/см ²
Январь	-27,0	6,9	0,15	0,10
Февраль	-27,0	6,1	0,15	1,29
Март	-22,1	7,0	0,15	5,49
Апрель	-13,2	6,6	0,15	10,88
Май	-4,9	6,6	0,07	15,80
Июнь	5,6	6,2	0,00	15,49
Июль	14,0	5,3	0,00	15,89
Август	10,6	5,4	0,00	10,50
Сентябрь	4,5	5,3	0,00	4,39
Октябрь	-6,8	6,4	0,06	1,91
Ноябрь	-18,6	6,2	0,12	0,41
Декабрь	-23,7	6,8	0,15	0,00

Заключение

Таким образом, в результате получены обоснованные границы значений тех или иных микроклиматических факторов, определяющих геофизиологическую обстановку на заданной территории, а также предложена методика определения комплекса микроклиматических параметров, описывающих теплообмен на заданной территории.

Использование КМП позволяет решить ряд важных геофизиологических и инженерных задач. Получение распределения КМП по поверхности территории позволяет получить геофизиологическую модель с фактической неоднородностью многолетнемерзлых грунтов на заданной площади при одних и тех же макроклиматических условиях, таких как средняя скорость ветра, суммарная солнечная

радиация, величина снежного покрова, температура воздуха. Применение КМП позволяет оценивать влияние тех или иных факторов на теплообмен на поверхности грунта и анализировать эффективность решений по температурной стабилизации грунтов. Оценка динамики КМП на выбранной территории позволяет, в отличие от динамики температуры воздуха, более полно и корректно оценить влияние климатических изменений на состояние многолетнемерзлых грунтов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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.
2. Горбылева А. И. Почвоведение: учебное пособие / А. И. Горбылева, В. Б. Воробьев, Е. И. Петровский; под ред. А. И. Горбылевой. 2 изд., перераб. М.: НИЦ Инфра-М; Минск: Новое знание, 2012. 400 с.
3. ГОСТ 25358-2012. Грунты. Метод полевого определения температуры. М.: Стандартинформ, 2013. 11 с.
4. Даниэлян Ю. С. Определение зоны оттаивания под тепловыделяющими сооружениями при точной формулировке нижнего граничного условия / Ю. С. Даниэлян, С. М. Соколов, Е. И. Ткаченко // Нефтяное хозяйство. 2006. № 12. С. 128-129.
5. Добежина С. В. Почвоведение. Курс лекций: учебно-метод. пособие / С. В. Добежина. Сочи: Сочинский институт РУДН, 2013. 139 с.
6. Долгих Г. М. Статистическое моделирование работы системы «ГЕТ», установленной в основании нефтяного резервуара / Г. М. Долгих, Г. В. Аникин, И. П. Рило, К. А. Спасенникова // Криосфера Земли. 2015. Том XIX. № 1. С. 70-77.
7. Кислицын А. А. Основы теплофизики: лекции и семинары / А. А. Кислицын. Тюмень: Тюменский государственный университет, 2002. 152 с.
8. Котляков В. М. Изменчивость термического сопротивления снежного покрова и его влияние на промерзание — протаивание грунта / В. М. Котляков, Н. И. Осокина, А. В. Сосновский // Сайт Российской академии наук. URL: <http://www.ras.ru/FStorage/Download.aspx?id=11eb528d-4ccd-4991-a1a6-116ce9bc2ef5>
9. Красс М. С. Радиационная теплофизика снега и льда / М. С. Красс, В. Г. Мерзлякин. Л.: Гидрометеиздат, 1990. 264 с.
10. Кухлинг Х. Справочник по физике: пер. с нем. / Х. Кухлинг. М.: Мир, 1982. 520 с.
11. Луканин В. Н. Теплотехника: учеб. для техн. спец. вузов / В. Н. Луканин, М. Г. Шатров, Г. М. Камфер и др.; под ред. В. Н. Луканина. М.: Высшая школа, 2000. 671 с.
12. Осокин Н. И. Влияние стратиграфии снежного покрова на его термическое сопротивление / Н. И. Осокин, А. В. Сосновский, Р. А. Чернов // Лед и снег. 2013. Том 53. № 3. С. 63-70. DOI: 10.15356/2076-6734-2013-3-63-70

13. Примаков С. С. Влияние динамики распределения температуры многолетнемерзлых грунтов на оценку надежности фундаментов на примере сезонного изменения несущей способности свай / С. С. Примаков, И. В. Забора, Э. А. Аринштейн, А. В. Татосов // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. 2017. Том 3. № 4. С. 41-50. DOI: 10.21684/2411-7978-2017-3-4-41-50
14. Примаков С. С. Расчет теплового взаимодействия различных сооружений с многолетнемерзлыми грунтами оснований / С. С. Примаков, Л. А. Пульдас, И. В. Забора // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. 2019. Том 5. № 2. С. 43-58. DOI: 10.21684/2411-7978-2019-5-2-43-58
15. Чернов Р. А. Экспериментальное определение эффективной теплопроводности глубинной изморози / Р. А. Чернов // Лед и снег. 2013. Том 53. № 3. Рр. 71-77. DOI: 10.15356/2076-6734-2013-3-71-77
16. Чубик И. А. Справочник по теплофизическим характеристикам пищевых продуктов и полуфабрикатов / И. А. Чубик, А. М. Маслов. М.: Пищевая промышленность, 1970. 184 с.
17. Finnikov K. A. Mathematical modeling of heat transfer in plant community / K. A. Finnikov, A. M. Korzun, A. V. Kolesnichenko // Journal of Stress Physiology & Biochemistry. 2011. Vol. 7. № 4. Pp. 424-436.

Sergey S. PRIMAKOV¹
Igor V. ZABORA²

UDC 536.244

**DETERMINING THE BOUNDARIES OF MICROCLIMATIC
CHARACTERISTICS WHEN CALCULATING HEAT
EXCHANGE PARAMETERS DURING ADAPTATION
OF THE GEOCRIOLOGICAL MODEL**

¹ Cand. Sci. (Tech.), Head of Department of Permafrost Soil,
Novatek-STC (Tyumen)
primakovss@yandex.ru

² Assistant, Department of Applied and Technical Physics,
University of Tyumen
zaboraiv@yandex.ru

Abstract

Thermal engineering calculations are a fundamental stage in the design in areas with the spread of multi-frozen soils (MFS). Today, this kind of calculations is well studied and implemented by various software complexes based on numerical methods. In the design of facilities of the fuel and energy complex, there is a mandatory requirement for this type of calculations, consisting in the calculation for the whole life of the facility.

Despite the abundance of developed methods and approaches in solving these problems, there is some uncertainty in setting the boundary condition on the surface of soil heat exchange with the air medium. This uncertainty is caused both by the variety of factors that directly influence heat exchange on the soil surface and by the complexity of their accounting, due to the cyclicity of these factors during the period of operation of the structure. In research literature, one can find various versions of setting the boundary condition on the ground surface. A question arises on the correctness of applying a certain method, because setting the

Citation: Primakov S. S., Zabora I. V. 2019. "Determining the boundaries of microclimatic characteristics when calculating heat exchange parameters during adaptation of the geocriological model". Tyumen State University Herald. Physical and Mathematical Modeling. Oil, Gas, Energy, vol. 5, no 4 (20), pp. 79-97.

DOI: 10.21684/2411-7978-2019-5-4-79-97

upper boundary condition by various methods leads to obtaining different results in further modeling. At the same time, insolvency of any of the methods of setting the upper boundary condition seems impossible.

This article examines some of the methods of setting the upper boundary condition from various authors found in the research literature. Analyzing their results has led to a complex method of setting boundary conditions on the surface, as well as the procedure of determining heat exchange parameters on the ground surface using local microclimatic characteristics for drawing up physically justified boundary conditions in numerical modeling of geocriological processes.

Keywords

Numerical modeling, permafrost soils, heat exchange parameters, geocriological modeling, boundary conditions, microclimatic characteristics, thermal calculations.

DOI: 10.21684/2411-7978-2019-5-4-79-97

REFERENCES

1. Gishkelyuk I. A., Stanilovskaya Yu. V., Evlanov D. V. 2015. "Prediction of thawing of perennial frozen soils around underground pipeline of long length". *Science and Technology of Pipeline Transport of Oil and Oil Products*, no 1 (17), pp. 20-25. [In Russian]
2. Gorbyleva A. I., Vorobyov V. B., Petrovskiy E. I. 2012. *Soil Science*. 2nd edition. Moscow: Infra-M; Minsk: Novoe znanie. [In Russian]
3. GOST 25358-2012. 2013. *Soils. Field Method of Determining Temperature*. Moscow: Standartinform. [In Russian]
4. Danielyan Yu. S., Sokolov S. M., Tkachenko E. I. 2006. "Definition of the thawing zone under the fuel facilities at the exact formulation of the lower boundary condition". *Oil Farm*, no 12, pp. 128-129. [In Russian]
5. Dobezhina S. V. 2013. *Soil Science: Educational and Methodological Manual*. Sochi: Sochi Institute Russian University of Friendship of Peoples. [In Russian]
6. Dolgikh G. M., Anikin G. V., Rilo I. P., Spasennikova K. A. 2015. "Statistical simulation of the operation of the 'GET' system installed at the base of the oil reservoir". *Cryosphere of the Earth*, vol. 19, no 1, pp. 70-77. [In Russian]
7. Kislitsyn A. A. 2002. *Fundamentals of Thermophysics: Lectures and Seminars*. Tyumen: University of Tyumen. [In Russian]
8. Kotlyakov V. M., Osokina N. I., Sosnovsky A. V. "Variability of thermal resistance of snow cover and its influence on freezing — protection of soil". *Russian Academy of Sciences*. <http://www.ras.ru/FStorage/Download.aspx?id=11eb528d-4ccd-4991-a1a6-116ce9bc2ef5> [In Russian]
9. Crass M. S., Merzlikin V. G. 1990. *Radiation Thermophysics of Snow and Ice*. Leningrad: Gidrometeoizdat. [In Russian]
10. Kuhling H. 1982. *Physics Handbook*. Moscow: World. [In Russian]

11. Lukanin V. N., Shatrov M. G., Kamfer G. M. et al. 2000. Thermotechnics. Moscow: Higher School. [In Russian]
12. Osokin N. I., Sosnovsky A. V., Chernov R. A. 2013. "Influence of snow cover stratigraphy on its thermal resistance". *Ice and Snow*, vol. 53, no 3, pp. 63-70. DOI: 10.15356/2076-6734-2013-3-63-70 [In Russian]
13. Primakov S. S., Zabora I. V., Arinshteyn E. A., Tatosov A. V. 2017. "The influence of the dynamics of temperature distribution of permafrost soils on assessing the foundations' reliability on the example of a seasonal change in the bearing capacity of poles". *Tyumen State University Herald. Physical and Mathematical Modeling. Oil, Gas, Energy*, vol. 3, no 4, pp. 41-50. DOI: 10.21684/2411-7978-2017-3-4-41-50 [In Russian]
14. Primakov S. S., Puldas L. A., Zabora I. V. 2019. "Calculating the thermal interaction of different structures with permanently frozen grounds at the base". *Tyumen State University Herald. Physical and Mathematical Modeling. Oil, Gas, Energy*, vol. 5, no 2, pp. 43-58. DOI: 10.21684/2411-7978-2019-5-2-43-58 [In Russian]
15. Chernov R. A. 2013. "Experimental determination of efficient thermal conductivity of depth hoar". *Ice and Snow*, vol. 53, no 3, pp. 71-77. DOI: 10.15356/2076-6734-2013-3-71-77 [In Russian]
16. Chubik I. A., Maslov A. M. 1970. *Handbook on Thermophysical Characteristics of Food Products and Semi-Finished Products*. Moscow: Pishchevaya promyshlennost'. [In Russian]
17. Finnikov K. A., Korzun A. M., Kolesnichenko A. V. 2011. "Mathematical modeling of heat transfer in plant community". *Journal of Stress Physiology & Biochemistry*, vol. 7, no 4, pp. 424-436.