

УДК 625.768.6

Самодурова Т.В. – доктор технических наук, профессор

E-mail: tvs@vmail.ru

Бакланов Ю.В. – аспирант

E-mail: baklanovmail@mail.ru

Воронежский государственный архитектурно-строительный университет

Адрес организации: 394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, д. 84

## Влияние солнечной радиации на температурный режим дорожного покрытия

### Аннотация

Рассмотрена задача оценки воздействия солнечной радиации на температурный режим покрытия автомобильной дороги. Предложена методика расчета эквивалентной температуры, для учета влияния солнечного излучения на температурный режим покрытия автомобильной дороги. Разработана программа, позволяющая рассчитать эквивалентную температуру. Расчет может производиться для любой даты и для любого времени суток. Представлены результаты моделирования в виде графиков, отражающих влияние погодных и дорожных параметров на эквивалентную температуру.

**Ключевые слова:** автомобильная дорога, температура дорожного покрытия, эквивалентная температура, радиационный баланс.

### Введение

Основными задачами федеральной целевой программы «Развитие транспортной системы России (2010-2015 годы)» являются обеспечение транспортной безопасности и развитие интегрированной системы контроля безопасности на транспорте [1]. Как известно, самым низким по уровню безопасности дорожного движения является зимний период года. Образование скользкости на покрытии автомобильной дороги вызывает резкое уменьшение сцепных качеств дорожного покрытия с колесами движущихся транспортных средств. В нашей стране дорожные службы производят ликвидацию зимней скользкости на покрытии путем обработки уже сформировавшегося слоя льда или уплотненного снега противогололедными или фрикционными материалами. Данный способ является весьма затратным, так как требует значительного количества химических реагентов для восстановления сцепных качеств покрытия. Одним из путей уменьшения затрат, как финансовых, так и ресурсных, является переход на профилактику образования зимней скользкости, это позволит значительно повысить уровень безопасности дорожного движения в холодное время года. Температура дорожного покрытия является основным дорожным параметром, определяющим образование скользкости на автомобильной дороге.

В дневное время существенный вклад в формирование температуры дорожного покрытия оказывает солнечная радиация. В солнечный день можно наблюдать более теплое покрытие по сравнению с температурой воздуха, а зимой иногда и положительную температуру покрытия автомобильной дороги, в то время как температура воздуха остается отрицательной. Подобное явление радиационного нагрева может оказывать как положительное, так и отрицательное воздействие на содержание автомобильных дорог в зимний период года. Положительное влияние связано с возможностью применения меньшего количества противогололедных материалов или даже отказом от их использования в дневные часы. Это будет определяться прогнозом погоды и дорожными условиями для рассматриваемого участка автомобильной дороги. Отрицательное воздействие будет заключаться в появлении влаги на поверхности дорожного покрытия из-за растаявших снежно-ледяных отложений на проезжей части или обочине. Эта влага из-за прекращения притока солнечного тепла (после захода солнца) или его ослабления (например, увеличение облачности или скорости ветра) при отрицательной температуре воздуха может преобразовываться в лед, тем самым образуя скользкость на дорогах. Числовые значения температуры покрытия могут быть получены либо путем ее измерения специальными дорожными датчиками, либо расчетным путем с помощью специальной математической модели. Описание такой модели и результаты, полученные при расчетах с ее использованием, приведены в данной статье.

## 1. Расчет температурного воздействия суммарной солнечной радиации на температуру дорожного покрытия

Для учета влияния солнечной радиации на температуру дорожного покрытия в строительной теплофизике вводят понятие эквивалентной температуры среды [2, 3]:

$$T_{\text{эке}} = \rho \frac{I}{a_H}, \quad (1)$$

где  $\rho$  – коэффициент поглощения поверхности дороги,  $I$  – суммарная солнечная радиация при облачности в  $n$  баллов,  $\text{Вт/м}^2$ ,  $a_H$  – суммарный коэффициент теплообмена.

Для учета облачности используют формулу:

$$I = I_c [1 - (a + bn)n], \quad (2)$$

где  $a$  и  $b$  – эмпирические коэффициенты;  $I_c$  – суммарная солнечная радиация при безоблачном небе, приходящая на наклонную поверхность.

Суммарная солнечная радиация, приходящая на склон, представляет собой сумму прямой и рассеянной солнечной радиации для данного же склона [4]:

$$I_C = S_C + D_C, \quad (3)$$

где  $S_C, D_C$  – потоки прямой солнечной и рассеянной радиации на поверхность склона;

$$S_C = S_m [\cosh_{\odot} \cdot \sin \alpha \cdot \cos(A - a) + \sinh_{\odot} \cdot \cos \alpha], \quad (4)$$

где  $S_m$  – поток солнечной радиации на перпендикулярную к лучам поверхность,  $A$  – азимут солнца,  $a$  – азимут склона,  $h_{\odot}$  – высота солнца,  $\alpha$  – угол наклона склона;

$$S_m = \frac{S_0 \sinh_{\odot}}{\sinh_{\odot} + c}, \quad (5)$$

где  $c$  – коэффициент прозрачности атмосферы;  $S_0$  – солнечная постоянная;

$$D_C = D \cos^2 \frac{\alpha}{2}, \quad (6)$$

где  $D$  – поток рассеянной солнечной радиации на перпендикулярную к лучам поверхность:

$$D = 0,38cS_m. \quad (7)$$

При учете влияния только суммарной солнечной радиации на температуру дорожного покрытия в дневные часы, теплообмен, происходящий на поверхности дорожного покрытия, учитывается в граничном условии при решении задачи нестационарной теплопроводности [5, 6]. Граничное условие можно записать в следующем виде:

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial x} = \alpha_n [T_n(t) - T_c(t)], \quad (8)$$

где  $T_n(t)$  – температура покрытия в данный момент времени;  $T_c(t)$  – температура воздушной среды около поверхности дорожного покрытия;  $\lambda$  – теплопроводность покрытия:

$$T_c(t) = T_n(t) + T_{\text{эке}}(t). \quad (9)$$

## 2. Реализация математической модели для расчета эквивалентной температуры

Представленная в работах авторов математическая модель была реализована в программной среде Borland Delphi 7 в виде программы, которая позволяет рассчитать температурный режим конструкции дорожной одежды с граничными условиями, в которые входит эквивалентная температура. Она может быть посчитана для конкретного участка автомобильной дороги.

Расчет производится по метеорологическим (температура воздуха, облачность, скорость ветра) и дорожным (географические координаты расположения участка дороги, продольный уклон, азимут участка, коэффициент поглощения дорожного покрытия) параметрам, которые вводятся с клавиатуры пользователем или подгружаются из баз данных.

С помощью разработанной программы была проведена серия вычислительных экспериментов, направленных на исследование зависимости изменения эквивалентной

температуры покрытия от различных факторов. Ниже приведены результаты вычислительных экспериментов.

### Влияние времени года на эквивалентную температуру

Результаты вычисления эквивалентной температуры в течение зимних месяцев представлены на рис. 1.

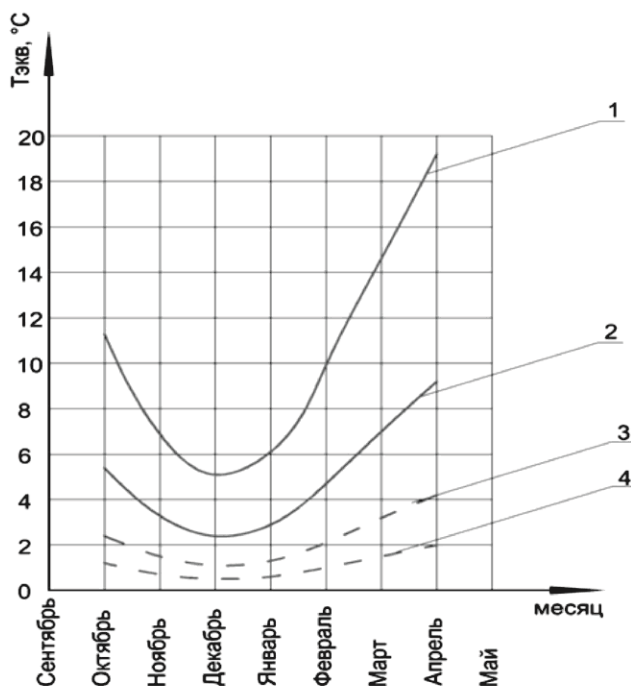


Рис. 1. Изменение эквивалентной температуры дорожного покрытия по месяцам;

- 1 – облачность 0 баллов и скорость ветра 0 м/с; 2 – облачность 0 баллов и скорость ветра 6 м/с;  
3 – облачность 10 баллов и скорость ветра 0 м/с; 4 – облачность 10 баллов и скорость ветра 6 м/с

Расчет производился для географических координат города Воронежа на 15 число каждого месяца и 14 часов дня. Значения эквивалентной температуры среды в разные месяцы при одних и тех же исходных данных отличаются. Это происходит из-за вращения земли вокруг солнца и вокруг своей оси. В декабре и январе величина эквивалентной температуры минимальна, что и показано на графике, а весной (в марте) происходит быстрое увеличение притока тепла, а следовательно, и эквивалентной температуры. В осенние месяцы октябрь-ноябрь происходит уменьшение эквивалентной температуры по сравнению с весенними месяцами, но при этом эти значения остаются чуть выше, чем в декабре-январе.

В дальнейшем для наглядности зависимости эквивалентной температуры от дорожных и метеорологических параметров приведены по результатам расчета для марта месяца. Программа позволяет рассчитывать эти значения для конкретного месяца, а также для динамических рядов изменения температуры покрытия под воздействием погодных факторов.

### Зависимость эквивалентной температуры от времени суток

График изменения эквивалентной температуры среды над дорожным покрытием в течение суток представлен на рис. 2. Как показывает анализ графиков, максимальное влияние солнечной радиации приходится на околополуденное время (приблизительно на 13-14 часов дня). При постоянной облачности и скорости ветра эквивалентная температура плавно возрастает в первой половине дня, после чего начинает убывать до захода Солнца.

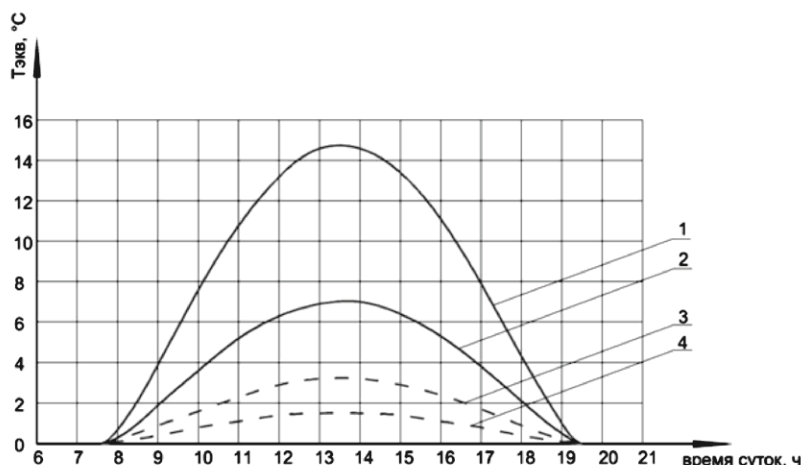


Рис. 2. Изменение эквивалентной температуры дорожного покрытия в течение дня:  
1 – облачность 0 баллов и скорость ветра 0 м/с; 2 – облачность 0 баллов и скорость ветра 6 м/с;  
3 – облачность 10 баллов и скорость ветра 0 м/с; 4 – облачность 10 баллов и скорость ветра 6 м/с

### Влияние местоположения рассматриваемого участка автомобильной дороги на эквивалентную температуру

На рис. 3 представлен график зависимости эквивалентной температуры от географической широты выбранного участка дороги. Как видно из рисунка, чем ближе выбранный участок дороги расположен к экватору, тем большему воздействию солнечной радиации он подвергается. Это происходит из-за того, что солнечные лучи проходят в этом случае меньшее расстояние и в меньшей мере рассеиваются в атмосфере. При этом нужно отметить, что влияние облачности на разных широтах является неодинаковым, это обусловлено коэффициентом, который учитывает влияние облачности на приход суммарной солнечной радиации. Для каждой широты этот коэффициент принимает свое определенное значение [4].

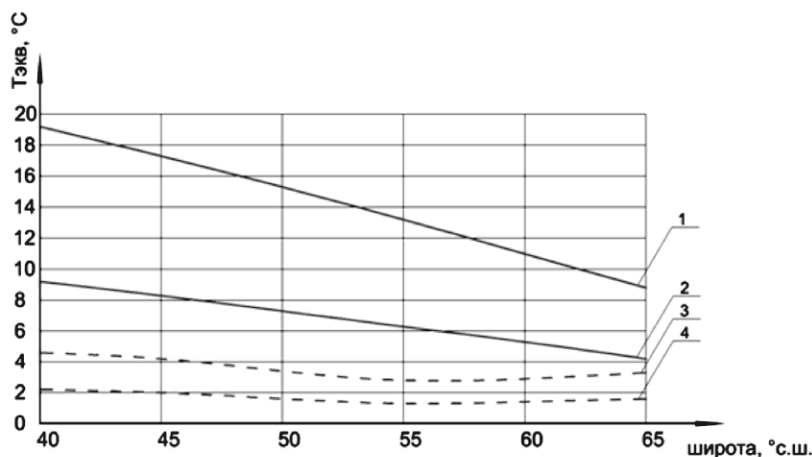


Рис. 3. Изменение эквивалентной температуры дорожного покрытия в зависимости от изменения географической широты рассматриваемого участка автомобильной дороги:  
1 – облачность 0 баллов и скорость ветра 0 м/с; 2 – облачность 0 баллов и скорость ветра 6 м/с;  
3 – облачность 10 баллов и скорость ветра 0 м/с; 4 – облачность 10 баллов и скорость ветра 6 м/с

### Влияние облачности и скорости ветра на эквивалентную температуру

Как показывает анализ результатов расчета, приведенных на рис. 1 и 2, облачность оказывает существенное влияние на величину эквивалентной температуры. При сплошной облачности происходит уменьшение прямой солнечной радиации по сравнению с ее обычным значением в ясную погоду. А так как эквивалентная температура среды зависит от суммарной солнечной радиации, то значения

эквивалентной температуры в ясную и облачную погоду могут различаться в 5-6 раз. Таким образом, облачность является одним из основных погодных параметров, влияющих на величину эквивалентной температуры среды.

Был произведен анализ влияния скорости ветра на величину эквивалентной температуры среды, который показал, что скорость ветра также оказывает определенное воздействие на величину эквивалентной температуры. Чем выше скорость ветра, тем меньшее значение принимает эквивалентная температура среды. Это связано с влиянием ветра на величину конвективной составляющей суммарного коэффициента теплообмена. Эквивалентная температура в безветренную погоду и при скорости ветра в 6 м/с различается в 2-3 раза.

#### **Зависимость эквивалентной температуры от азимута и продольного уклона выбранного участка автомобильной дороги**

В результате расчетов было установлено, что максимальное влияние азимута на эквивалентную температуру среды у покрытия происходит в околополуденное время (1-2°С). При появлении облачности приток солнечной радиации резко уменьшается, и влияние азимута на рассматриваемую величину значительно ослабевает и продолжает уменьшаться при увеличении скорости ветра.

Величина эквивалентной температуры зависит от продольного уклона участка дороги. Это связано с тем, что из-за изменения наклона поверхности меняется угол падения солнечных лучей. Чем меньше угол падения солнечных лучей к поверхности, тем меньшее количество солнечной радиации приходится на эту поверхность. Наибольшее количество солнечной радиации приходится на поверхность, перпендикулярную направлению солнечных лучей, наименьшее количество – на вертикальные поверхности, ориентированные на север. Влияние продольного уклона на эквивалентную температуру может составлять до 2 °С в ясную погоду. С появлением облаков и ветра наблюдается уменьшение этой величины, и продольный уклон практически не влияет на эквивалентную температуру среды у покрытия.

#### **Зависимость эквивалентной температуры от состояния дорожного покрытия**

Все дорожные покрытия имеют различную шероховатость, цвет и сделаны из разных материалов, а значит, они обладают и различными коэффициентами поглощения. Таким образом, эквивалентная температура среды над дорожными покрытиями из разных материалов или с различным сроком эксплуатации будет разной. Ее величина зависит от коэффициента поглощения.

В таблице приведены значения коэффициента поглощения для некоторых типов дорожного покрытия [3].

Таблица

**Значение коэффициента поглощения поверхности дорожного покрытия**

Материал и состояние поверхности покрытия	Коэффициент поглощения
Старое сухое цементобетонное покрытие	0,65
Старое мокрое цементобетонное покрытие	0,73
Новое сухое цементобетонное покрытие	0,76
Асфальтобетонное покрытие гладкое, серое	0,82
Асфальтобетонное покрытие (темно-серое)	0,89

Влияние коэффициента поглощения поверхности дорожного покрытия на эквивалентную температуру представлено на рис. 4. Из графика видно, что эквивалентная температура среды над асфальтобетонным покрытием будет выше, чем над цементобетонным при одинаковых прочих условиях. С увеличением облачности влияние коэффициента поглощения дорожного покрытия уменьшается, и различие между эквивалентными температурами для различных типов покрытий становится меньше и продолжает уменьшаться при увеличении скорости ветра.

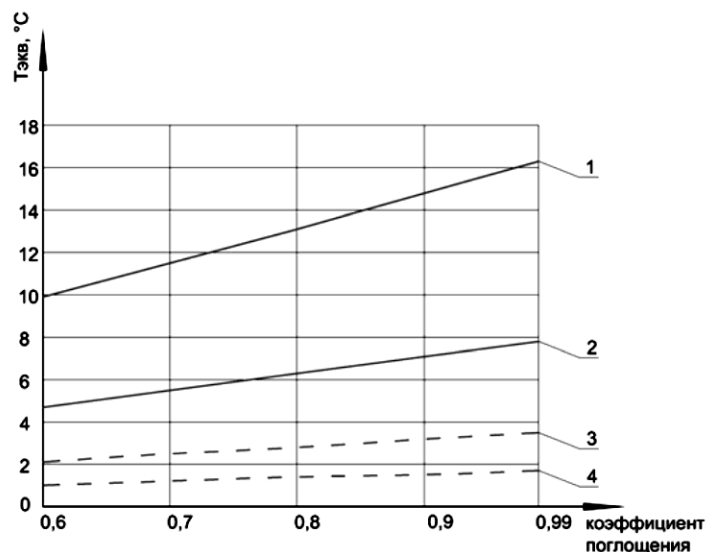


Рис 4. Зависимость эквивалентной температуры дорожного покрытия от коэффициента поглощения поверхности участка автомобильной дороги:

- 1 – облачность 0 баллов и скорость ветра 0 м/с; 2 – облачность 0 баллов и скорость ветра 6 м/с;  
3 – облачность 10 баллов и скорость ветра 0 м/с; 4 – облачность 10 баллов и скорость ветра 6 м/с

Полученные результаты позволяют учесть влияние прямой солнечной радиации на температурный режим дорожного покрытия в зимний период. Исследования будут продолжены для учета радиационных потерь дорожного покрытия в ночные часы. Детальный учет граничных условий позволит повысить точность расчета температуры покрытия, спрогнозировать образование скользкости на различных участках дороги, а также уточнять нормы распределения противогололедных реагентов не по температуре воздуха, а с учетом температуры дорожного покрытия.

#### Заключение

Авторами статьи представлена модель для расчета эквивалентной температуры по дорожным и метеорологическим данным, разработан алгоритм и программа ее реализации. Проведена серия вычислительных экспериментов по изучению воздействия погодных и дорожных параметров на величину эквивалентной температуры. Результаты расчета позволяют оценить влияние погодных и дорожных параметров на температуру дорожного покрытия.

#### Список литературы

1. ФЦП «Развитие транспортной системы России (2010-2015 годы)». URL: [http://rosavtodor.ru/information/Osnovnye\\_dokumenty/ftsp\\_razvitie\\_transportnoy\\_sistemyi\\_rossii\\_2010\\_2015\\_godyi.html](http://rosavtodor.ru/information/Osnovnye_dokumenty/ftsp_razvitie_transportnoy_sistemyi_rossii_2010_2015_godyi.html) (дата обращения: 15.11.2012).
2. Богословский В.Н. Строительная теплофизика (теплофизические основы отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха): учебник для вузов. Изд. 2-е, перераб. и доп. – М.: Высшая школа, 1982. – 415 с.
3. Горецкий Л.И. Теория и расчет цементобетонных покрытий на температурные воздействия. – М.: Издательство «Транспорт», 1965. – 284 с.
4. Кондратьев К.Я. Актинометрия. – Л.: Гидрометеорологическое издательство, 1965. – 690 с.
5. Самодурова Т.В., Бакланов Ю.В. Влияние дорожных и погодных факторов на температурный режим дорожного покрытия в зимний период // Дороги и мосты, 2011, № 1. – С. 166-178.
6. Самодурова Т.В., Тропынин Е.Н. Моделирование состояния дорожного покрытия в зимний период // Дороги и мосты, 2009, № 2. – С. 137-148.

**Samodurova T.V.** – doctor of technical sciences, professor

E-mail: [tvsv@mail.ru](mailto:tvsv@mail.ru)

**Voronezh State University of Architecture and Civil Engineering**

**Baklanov Y.V.** – post-graduate student

E-mail: [baklanovmail@mail.ru](mailto:baklanovmail@mail.ru)

**Voronezh State University of Architecture and Civil Engineering**

The organization address: 394006, Russia, Voronezh, 20 years of October st., 84

## The influence of solar radiation on the temperature mode of the road pavement

### Resume

The aim of the work is to investigate the influence of solar radiation on the highway pavement temperature regime. Road pavement temperature is a determining factor of the winter slipperiness formation. The authors propose the procedure for calculating the equivalent ambient temperature in the boundary conditions of the non-stationary heat equation. Such approach allows consider the sunlight influence on the road surface temperature. A program has been developed for automatic calculations the equivalent temperature is performed on meteorological parameters (air temperature, overcast, wind speed) and road parameters (geographical location and the azimuth of a road segment, a longitudinal slope, an absorption coefficient of the road pavement). The calculation can be done for any date and for any time of the day.

On the basis of the modeling results change of the equivalent temperature in the months of producing works on winter road maintenance has been studied. The diurnal course of the equivalent temperature and its change depending on the geographical width of the considered highway segment has been analyzed. Meteorological and road parameters which make the greatest impact on the studied size have been revealed. The results of the investigation are presented for clear demonstration in the form of graphs.

**Keywords:** highway, road surface temperature, equivalent temperature, radiative balance.

### References

1. FP «Development of Russian Transport System (2010-2015)». URL: [http://rosavtodor.ru/information/Osnovnye\\_dokumenty/ftsp\\_razvitie\\_transportnoy\\_sistemyi\\_rossii\\_2010\\_2015\\_godyi.html](http://rosavtodor.ru/information/Osnovnye_dokumenty/ftsp_razvitie_transportnoy_sistemyi_rossii_2010_2015_godyi.html) (reference date: 15.11.2012).
2. Bogoslovskiy V.N. Building thermophysics (thermal bases of heating, ventilation and air conditioning): the textbook for high schools. 2th edition, revised and enlarged. – M.: Vyssh. shkola, 1982. – 415 p.
3. Goretskiy L.I. Theory and calculation of cement-concrete pavements taking into account thermal effects. – M.: Izdatelstvo «Transport», 1965. – 284 p.
4. Kondratiev K.Y. Actinometry. – L.: Gidrometeorologicheskoye izdatelstvo, 1965. – 692 p.
5. Samodurova T.V., Baklanov Y.V. Influence of road and weather factors on the temperature mode of the road pavement in winter // Roads and bridges. 2011, № 1. – P. 166-178.
6. Samodurova T.V., Tropynin E.N. Modelling of road pavement condition in winter period // Roads and bridges. 2009, № 2. – P. 137-148.