

С. В. Богданович, начальник управления диагностики дорог и мостов РУП «Белдорцентр»;  
В. И. Жилинский, инженер отдела оценки и планирования РУП «Белдорцентр»

## АНАЛИЗ МОДЕЛЕЙ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ДОРОЖНОГО ПОКРЫТИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

In article various models of change of temperature of a covering are analyzed. Are executed comparison of models with results of real measurements.

Формирование зимней скользкости происходит при сочетании различных факторов, таких, как температура окружающего воздуха, температура поверхности автомобильной дороги, влажность воздуха, скорость и направление ветра, и ряда других климатических параметров. Между температурой окружающего воздуха и температурой покрытия есть взаимосвязь.

Рассмотрим некоторые зависимости и сопоставим их с фактическими значениями, которые были определены инструментально. В качестве инструментальных данных использовались данные дорожно-измерительной станции, расположенной на кольцевой дороге вокруг города Минска.

Температуру поверхности исследователи понимают по-разному: как температуру на границе воздух – покрытие, как температуру поверхности или как температуру поверхностного слоя покрытия автомобильной дороги. В первом случае ее принимают равной температуре воздуха  $t_a$  у поверхности покрытия, во втором – равной  $t_a$  с различными поправками, в третьем – температуре поверхностного слоя покрытия автомобильной дороги. Наиболее убедительным представляется третий вариант. Здесь речь идет о поверхностном слое покрытия с присущими ему свойствами. Из основ метрологии известно, что от нарастания потока приходящей радиации поверхность и воздух от нее нагреваются. Таким образом выстраивается цепочка: солнечная радиация  $\Phi_s$  – температура поверхности  $t_{sup}$ , – температура воздуха  $t_a$ . На основании этого обычно связывают два последних параметра, которые представлены в виде формулы:

$$t_{sup} = f(t_a).$$

Предполагается, что данная зависимость рассматривается в случае соблюдения радиационного баланса при установившихся погодных условиях. В первом приближении к таковым относятся максимумы и минимумы температур за сутки при отсутствии ветра.

В результате многолетних наблюдений Пономаревым И. Н. была установлена зависимость, которая представлена в виде формул:

$$t_{sup}^{\max(\min)} = 45 \cdot [\exp(0,02 \cdot t_{ap\%}^{\max(\min)}) - 1] + 2,$$

$$t_{ap\%}^{\max(\min)} = t_{ma} \pm 0,5 \cdot A_{ma} \pm K_p \cdot X \cdot \varphi^{0,25} \cdot \Delta t_a^i,$$

где  $t_{ma}$  – среднемесячная температура воздуха, °С;  $A_{ma}$  – среднемесячная амплитуда температуры воздуха, °С;  $K_p$  – коэффициент обеспеченности, принимаемый в зависимости от  $p$ ;  $p$  – обеспеченность, %, определяемая по формуле

$$p = n^{-1} \cdot 100,$$

где  $n$  – срок эксплуатации покрытия, лет;  $X$  – широта местности, °с. ш.;  $\varphi$  – упругость водяного пара наружного воздуха, гПа;  $\Delta t_a^i$  – поправка температуры, принимаемая в зависимости от месяца года, °С/°с. ш. ГПа<sup>0,25</sup>.

Знак «+» принимается для определения максимальной температуры, а знак «-» для минимальной температуры.

Точность расчетов  $t_{ap\%}^{\max(\min)}$  находится в пределах 0–3°С для определения минимальных температур воздуха в январе.

Температура покрытия изменяется от суток к суткам, суточный ход температуры асимметричен и отличается от гармонического колебания и, что самое главное, не соблюдается условие применимости теории температурной волны. Согласно этой теории, в полуограниченном теле спустя определенный промежуток времени должно иметь место стационарное периодическое состояние, характеризующееся тем, что температура в любой точке данного тела совершает гармонические колебания, не зависящие от начального температурного состояния.

Согласно Я. Н. Ковалеву, зависимость между температурой воздуха и температурой покрытия на глубине 1 см имеет вид

$$t_{пок} = 0,71 \cdot t_{воз},$$

$$t_{пок} = 0,60 \cdot t_{воз}.$$

Коэффициент 0,71 принимается, если на покрытии отсутствует снежный покров, в противном случае его значение равно 0,60. Данные формулы не учитывают влияние солнечной радиации и ветра, так как предполагается, что самое интенсивное охлаждение дорожного покрытия происходит в ночное время. Существенная разница между температурой наружного воздуха и температурой покрытия объясняется наличием теплового потока, идущего из более глубоких слоев земной поверхности и тепловой инерции покрытия, которое не позволяет охладиться до температуры наружного воздуха.

В действительности солнечная радиация играет важную роль при формировании отдельных видов зимней скользкости. С учетом этого, несомненно, важного фактора, Ковалев Я. Н. предлагает следующую формулу зависимости температуры воздуха и температуры дорожного покрытия автомобильной дороги:

$$t_{\text{пок}} = [I_n \cdot (1 - A) \cdot 0,71 \cdot k_n \cdot \alpha_c^{-1}] + t_{\text{впс}}$$

где  $t_{\text{пок}}$  – температура поверхности покрытия автомобильной дороги, °С;  $I_n$  – поток суммарной солнечной радиации, ккал / м<sup>2</sup> ч;  $A$  – коэффициент отражения покрытия, определяется по формуле

$$A = \frac{I_o}{I_n},$$

где  $I_o$  – поток отраженной солнечной радиации, ккал / м<sup>2</sup> ч;  $I_n$  – поток падающей солнечной радиации, ккал / м<sup>2</sup> ч;  $k_n$  – безразмерный поправочный коэффициент, учитывает часть поглощенного покрытием тепла, отдаваемого наружному воздуху;

$$k_n = 0,15 + 0,052 \cdot V_{\text{ветра}},$$

где  $V_{\text{ветра}}$  – скорость ветра, м/с;  $\alpha_c$  – суммарный коэффициент теплоотдачи, ккал / м<sup>2</sup> час град;  $t_{\text{впс}}$  – температура воздуха в пограничном слое, °С.

Еще одну формулу для определения температуры в слое покрытия предлагают М. Грачич и И. Рафа:

$$t_{\text{пов}} = t_{\text{воз}} \cdot \left(1 + \frac{1}{z + 4}\right) - \frac{34}{z + 4} + 6,$$

где  $t_{\text{пов}}$  – температура в слое покрытия на глубине  $z$ , °С;  $t_{\text{воз}}$  – температура окружающего воздуха, °С;  $z$  – глубина, на которой происходит определение температуры поверхностного слоя покрытия автомобильной дороги, мм.

$$t_{\text{пов}} = t_{\text{воз}} \cdot z^{-0,1261} + t_{\text{сред24}} \cdot z^{0,0806} + 5,3109 \cdot z^{-0,0314},$$

где  $t_{\text{пов}}$  – температура в слое покрытия на глубине  $z$ , °С;  $t_{\text{воз}}$  – температура окружающего воздуха, °С;  $t_{\text{сред24}}$  – средняя температура воздуха за последние 24 ч, °С;  $z$  – глубина на которой происходит определение температуры поверхностного слоя покрытия автомобильной дороги, мм.

$$t_{\text{пов}} = 0,95 + 0,892 \cdot t_{\text{воз}} + [\log(z) - 1,25] \times \\ \times [0,448 \cdot z + 0,621 \cdot t_{\text{сред}} + 1,83 \cdot \sin(A - 15,5)] + \\ + 0,042 \cdot t_{\text{сред}} \cdot \sin(A - 13,5),$$

где  $t_{\text{пов}}$  – температура в слое покрытия на глубине  $z$ , °С;  $t_{\text{воз}}$  – температура окружающего воздуха, °С;  $z$  – глубина, на которой происходит определение температуры поверхностного слоя покрытия автомобильной дороги, мм;  $t_{\text{сред}}$  – средняя температура воздуха предыдущего дня, °С;  $A$  – час суток, переведенный на 18-часовой цикл подъема и спада температуры в слое.

Эффективность проведения противогололедных мероприятий во многом зависит и от точности прогнозирования гололеда. Основу синоптического прогноза составляют явления в приземном слое воздуха на стандартной высоте 2 м, в то же время для прогноза гололеда на покрытии важны тепловлажностные параметры на его поверхности, характеризующиеся тепловым балансом. Согласно работе Михайлова А. В., температура покрытия может, быть определена по формуле

$$t_{\text{пов}} = t_{\text{воз}} - m \cdot n \cdot A_{\text{д}},$$

где  $t_{\text{пов}}$  – температура покрытия автомобильной дороги, °С;  $t_{\text{воз}}$  – температура окружающего воздуха, °С;  $m$  – коэффициент пропорциональности суточной амплитуды колебания температуры окружающего воздуха;  $n$  – поправочный коэффициент учитывающий облачность и ветер;  $A_{\text{д}}$  – суточная амплитуда колебания температуры окружающего воздуха, °С.

Данное равенство справедливо в ночное и предутреннее время, когда практически нет поступления солнечной радиации.

При сложном рельефе, например в выемках, на северных склонах, когда влияние микроклимата и местного климата велико, необходимо вводить температурную поправку  $\Delta t$ . Тогда с учетом этой поправки формула примет следующий вид:

$$t_{\text{пов}} = t_{\text{воз}} - (m \cdot n \cdot A_{\text{д}} + \Delta t).$$



Температура воздуха за 1 января 2004 г.

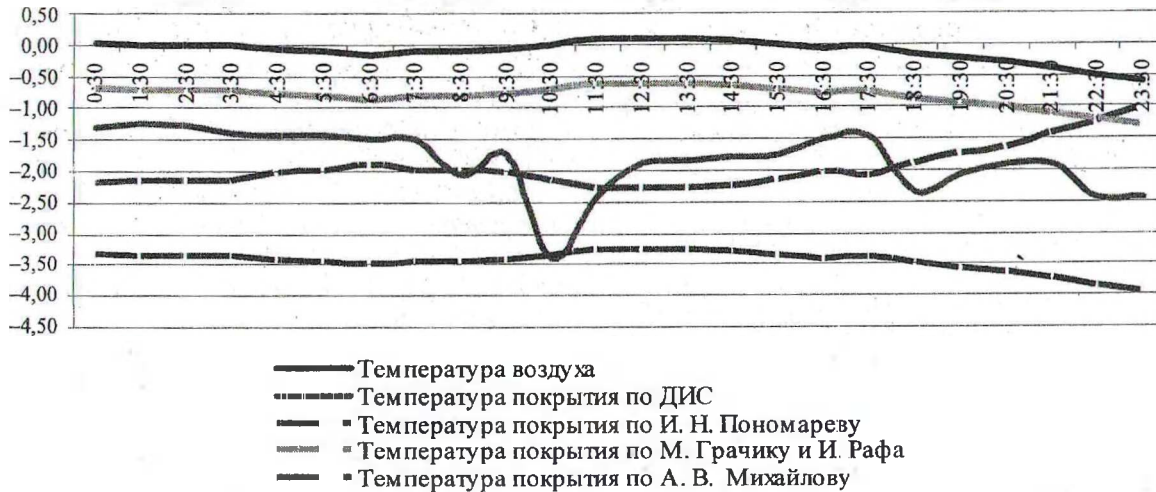


Рис. 1. Сравнение моделей И. Н. Пономарева, А. В. Михайлова, М. Грачика и И. Рафа с реальным ходом температур

Согласно работе Г. И. Глушкова, суммарный нагрев поверхности покрытия автомобильной дороги можно определить с помощью следующей зависимости:

$$t_{\text{пов}} = t_{\text{воз}} + t_{\text{экр}},$$

где  $t_{\text{пок}}$  – температура покрытия, °С;  $t_{\text{воз}}$  – температура приземного воздуха, °С;  $t_{\text{экр}}$  – эквипотенциальная температура, °С.

$$t_{\text{экр}} = \frac{\rho \cdot I}{a_n},$$

где  $\rho$  – коэффициент поглощения;  $I$  – интенсивность солнечной радиации;  $a_n$  – коэффициент теплоперехода.

В работе В. Спужьяка температуру покрытия автомобильной дороги предлагается определять с помощью следующей зависимости:

$$T_{\text{пов}} = T_{\text{воз}} - 0,00618 \cdot (\varphi + \Delta\varphi)^2 + 0,2289 \times (\varphi + \Delta\varphi) + 24,4,$$

где  $T_{\text{воз}}$  – температура окружающего воздуха, °С;  $\varphi$  – географическая широта, °;  $\Delta\varphi$  – положение относительно экватора (– 27°7' для северного полушария, + 27°7' для южного полушария).

Температура воздуха за 1 января 2004 г.

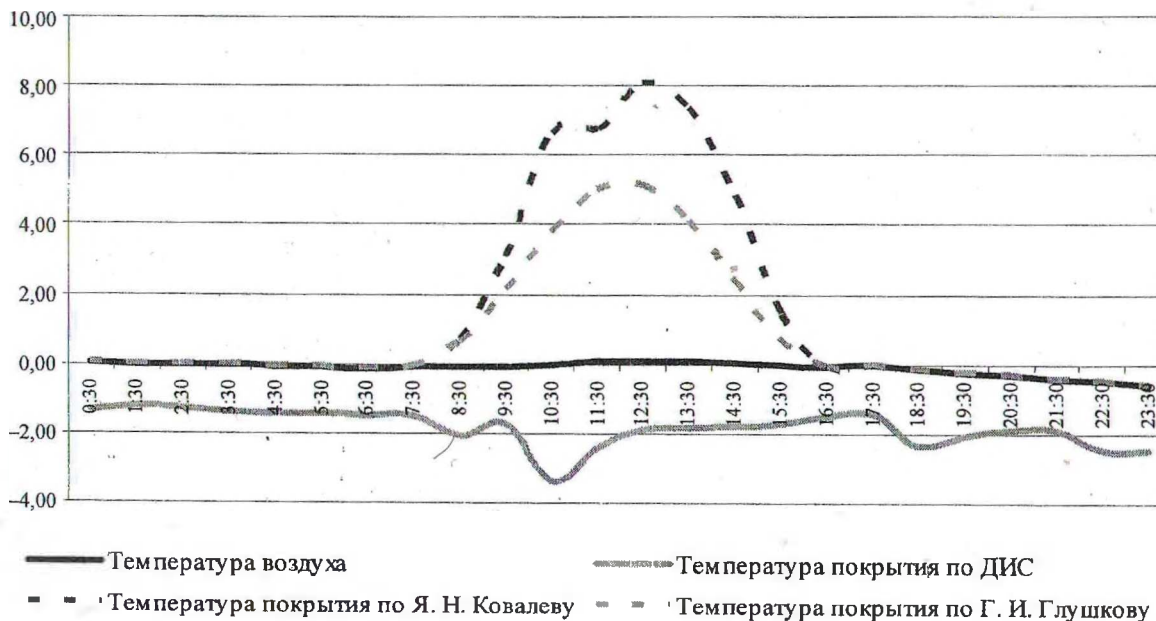


Рис. 2. Сравнение моделей Я. Н. Ковалева, Г. И. Глушкова с реальным ходом температур

Как видно, прогнозные модели отличаются значительным разнообразием и различными теоретическими подходами.

Нами выполнены детальный анализ всех приведенных моделей, расчеты по каждой из зависимостей и полученные результаты сопоставлены с реальными данными изменения температуры.

На рис. 1 и 2 сравнение моделей выполнено в графическом виде.

Анализ приведенных рисунков показывает, что рассмотренные модели отражают реальную картину изменения температуры покрытия недостаточно адекватно. Каждая формула имеет свои особенности, которые, однако, не учитывают влияния того или иного фактора на образование зимней скользкости. Между тем зависимости температуры покрытия от температуры окружающего воздуха необходимы для прогнозирования процессов льдообразования на автомобильной дороге.

В РУП «Белдорцентре» в настоящее время ведутся исследования, направленные на разработку модели прогнозирования температуры покрытия, которая давала бы достаточно хорошие результаты для зимнего периода.

#### Литература

1. Пономарев И. Н. Определение расчетной температуры воздуха разной беспечности // Автомобильные дороги. – 1990. – № 11. – С. 20–22.

2. Пономарев И. Н. Температура поверхности цементобетонных покрытий аэродромов и дорог // Автомобильные дороги. – 1991. – № 5. – С. 18–20.

3. Пономарев И. Н. Температура в бетонных покрытиях // Автомобильные дороги. – 1991. – № 10. – С. 24–25.

4. Ковалев Я. Н. Акельев В. Д. К вопросу определения зимней расчетной температуры асфальтобетонных покрытий // Строительство и архитектура: Известия вузов. – Новосибирск, 1966. – Вып. 5. – С. 145–147.

5. Ковалев Я. Н. Определение коэффициента отражения асфальтовых покрытий // Строительство и архитектура: Известия вузов. – Новосибирск, 1967. – Вып. 1. – С. 141–144.

6. Grachic M. Rafa J. The application of the thermoelasticity problem the solution for determining temperature in layered pavement structures // IX International conference Durable and safe road pavements Kiellce 6 – 7 may 2003. – P. 443–450.

7. Михайлов А. В., Коцюбинская Т. А. Строительная теплотехника дорожных одежд. – М.: Транспорт, 1986. – 148 с.

8. Глушков Г. И., Бабков В. Ф., Медников И. А. Жесткие покрытия аэродромов и автомобильных дорог / Под ред Глушкова Г. И. – М.: Транспорт, 1963. – 255 с.

9. Spuziak W. Influence of stabilize additive on the bituminous mixes deformation // VII International conference Durable and safe road pavements Kiellce 8 – 9 may 2001. – P. 153 – 61.