

УДК 625.768.6

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМА В ПЕРИОД ВОЗМОЖНОГО ОБРАЗОВАНИЯ ЗИМНЕЙ СКОЛЬЗКОСТИ НА АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГАХ

Д-р техн. наук, профессор **Т.В. Самодурова**,
канд. техн. наук **Ю.В. Бакланов**,
аспирант **В.Н. Перегудова**
(Воронежский государственный
технический университет)
Контактная информация: +7(473)271-52-02;
samodurova@vgasu.vrn.ru;
baklanovmail@mail.ru;
lapusia2@yandex.ru

Предложена обобщенная классификация и алгоритм моделирования состояния дорожного покрытия в зимний период. Приведены результаты моделирования состояния дорожного покрытия. Исследован температурный режим в период образования скользкости и проведения работ по ее ликвидации. Выявлены параметры законов распределения минимальной температуры для стекловидного льда и снежного наката, и рассчитаны вероятности образования скользкости в различных диапазонах температур.

Ключевые слова: автомобильная дорога, классификация зимней скользкости, моделирование состояния покрытия, минимальная температура при образовании скользкости.

ВВЕДЕНИЕ

Обоснование финансовых затрат на содержание автомобильных дорог – одна из приоритетных задач дорожного хозяйства. Решение данной задачи невозможно без постоянного совершенствования нормативной базы в области определения периодичности работ по ремонту и содержанию транспортных сооружений. Это должно повысить эффективность расходования бюджетных средств, которые направляются на поддержание высоких потребительских свойств автомобильных дорог – расчетной скорости, непрерывности, удобства и безопасности движения. Все указанные потребительские свойства автомобильных дорог зависят от быстрой и качественной работы дорожных служб, особенно,

при зимнем содержании автомобильных дорог, когда состояние и сцепные свойства дорожных покрытий зависят от погодных факторов.

Для ликвидации зимней скользкости или предупреждения ее образования на покрытии автомобильных дорог распределяется значительное количество противогололедных материалов (ПГМ). В настоящее время в нормативных документах количество циклов обработки дорожного покрытия противогололедными реагентами определяется по числу дней со случаями образования зимней скользкости [1]. Для учета интенсивности движения и территориального расположения участка автомобильной дороги вводятся поправочные коэффициенты.

Число дней со случаями образования зимней скользкости может быть определено в соответствии с «Руководством по борьбе с зимней скользкостью» [2]. Информация, приведенная в нормативном документе, получена на основе обработки данных метеостанций Государственной наблюдательной сети и не отражает влияние особенностей дорожных условий на цикличность работ в зимний период. Под термином «количество дней со случаями образования зимней скользкости» понимается число дней выпадения снега с суточным количеством более 1 см (от слабого снегопада до обильного), с гололедно-изморозевыми явлениями, а также выпадением осадков при температуре воздуха ниже 0 °С. При этом температура покрытия конкретного участка автомобильной дороги никак не учитывается, однако она является основным параметром, влияющим на возможность образования зимней скользкости.

В данной статье приведены методика моделирования состояния дорожного покрытия с учетом метеорологической и дорожной информации и некоторые результаты расчетов. Исследованы законы распределения минимальной температуры (воздуха или покрытия) в момент образования зимней скользкости для расчета количества противогололедных материалов.

Методика моделирования состояния дорожного покрытия по метеорологическим и дорожным данным

Основу модели состояния дорожного покрытия составляет его температура, которая рассчитывается по данным наблюдений на метеостанциях с учетом особенностей конструкции дорожной одежды и местоположения участка дороги. Для расчета температуры дорожного покрытия использовалась математическая модель, которая уже была ранее достаточно подробно описана [3-5].

В основе модели заложено уравнение нестационарной теплопроводности, которое учитывает нестационарность изменения погодных условий и теплоинерционные свойства конструктивных слоев дорожной

одежды. Для многослойной дорожной конструкции модель представлена в виде системы дифференциальных уравнений теплопроводности с начальными и граничными условиями [3].

В начальный момент времени ($t = 0$) распределение температуры по глубине дорожной одежды и земляного полотна рассчитывается из решения стационарной задачи.

В качестве граничного условия на дорожном покрытии принят сложный теплообмен с условиями II рода, при которых задана интенсивность теплового потока, и III рода с определением условий теплообмена с окружающей средой.

Величина и знак интенсивности теплового потока рассчитывались через его радиационный баланс [5].

В качестве второго граничного условия принята постоянная температура грунта на глубине 3,2 м, значение которой взято из справочников по климату.

Погодные данные для расчета температуры дорожного покрытия были получены с метеостанций Государственной наблюдательной сети.

Анализ нормативной литературы по зимнему содержанию дорог позволил сделать вывод о том, что приведенная в ней производственная классификация видов зимней скользкости непригодна для проведения исследований условий ее образования. В отечественной и зарубежной практике зимнего содержания существуют различные классификации зимней скользкости, полученные по результатам работы автоматических дорожных метеостанций. На основе поисковых исследований и анализа предложенных многочисленных описаний условий образования зимней скользкости для расчетов была составлена обобщенная классификация, которая представлена в **табл. 1**. По приведенным табличным данным был разработан алгоритм определения состояния дорожного покрытия (правила вывода для всех видов зимней скользкости), представленный на **рис. 1 а, б, в**. Данный алгоритм реализован в виде компьютерной программы расчета в среде Borland Delphi 7 [6].

Приведенные правила выбора описывают состояние дорожного покрытия на основе сочетания метеорологических условий:

- температуры воздуха (T_e);
- точки росы (T_d);
- вида осадков (IOS);
- количества (Q) и интенсивности выпадения осадков (Ioc);
- скорости ветра (V);
- относительной влажности воздуха (W);
- наличия тумана ($ITUMAN$),

а также дорожных параметров:

- состояния дорожного покрытия (*ISP*);
- температуры покрытия (*T_n*).

Исследование температурного режима дорожного покрытия и воздуха

С использованием разработанной программы было произведено моделирование состояния дорожного покрытия за несколько зимних периодов.

При расчетах для каждого возможного случая зимней скользкости в специальную базу данных заносилась информация о температурах воздуха и дорожного покрытия в начале образования скользкости, а также динамике изменения температур за весь период существования условий, благоприятствующих ее образованию.

Таким образом, результаты моделирования позволяют изучить температурный режим воздуха и дорожного покрытия, получить их среднее и минимальное значения.

В качестве минимальной температуры принята наименьшая из температур (воздуха или дорожного покрытия) в момент образования зимней скользкости.

Детальный учет температуры позволит более точно назначать нормы распределения ПГМ и избежать повторной обработки покрытия при замерзании раствора ПГМ при резком понижении температуры.

Результаты исследований приведены в соответствии с производственной классификацией видов зимней скользкости [2].

Анализ результатов моделирования показал, что при образовании скользкости в виде стекловидного льда (гололедица, черный лед, гололед, твердый налет) минимальное значение температуры может составить минус 23,0 °С, а максимальное – близко к нулю, но все значения отрицательны.

Было установлено, что исследуемый параметр как случайная величина, подчиняется показательному усеченному закону, с коэффициентом усечения $K=1,04$ и параметром закона $\mu=0,327$ [7]:

$$f(T_m) = e^{-0,327 T_m}, \quad (1)$$

где

T_m – минимальная температура в период образования скользкости, °С.

Таблица 1

Обобщенная классификация видов зимней скользкости дорожных покрытий и условия их образования

Вид зимней скользкости	Условия образования				
	Температура воздуха ($Tв$)	Температура покрытия ($Tп$)	Осадки, их вид	Состояние покрытия	Дополнительные условия
<i>Гололедица</i>	ниже 0 °С	ниже 0 °С	нет	влажное	время последствия осадков – 12 ч
<i>Черный лед</i>	от 0,7 °С до -8 °С	ниже 0 °С, ниже точки росы (Td)	нет	сухое	$(Td - Tп) > 0,5$ °С при скорости ветра от 2 до 5 м/с или $(Td - Tп) > 1,0$ °С при скорости ветра менее 2 м/с
<i>Твердый налет</i>	от 2 °С до 0 °С	ниже 0 °С	жидкие	-	возможно образование во время тумана и без осадков
<i>Гололед</i>	от 0 °С до -16 °С	ниже 0 °С	жидкие	-	возможно образование во время тумана и без осадков
<i>Снежный накат</i>	от 0 °С до -6 °С	-	твердые или смешанные	-	количество осадков не менее 5 мм
	от 1,2 °С до 0 °С	-	то же	-	интенсивность снегопада не менее 0,6 мм/ч
	от -6 °С до -10 °С	-	то же	-	относительная влажность воздуха не менее 90%
<i>Рыхлый снег</i>	от -6 °С до -10 °С	-	то же	-	относительная влажность воздуха менее 90%
	ниже -10 °С	-	то же	-	-

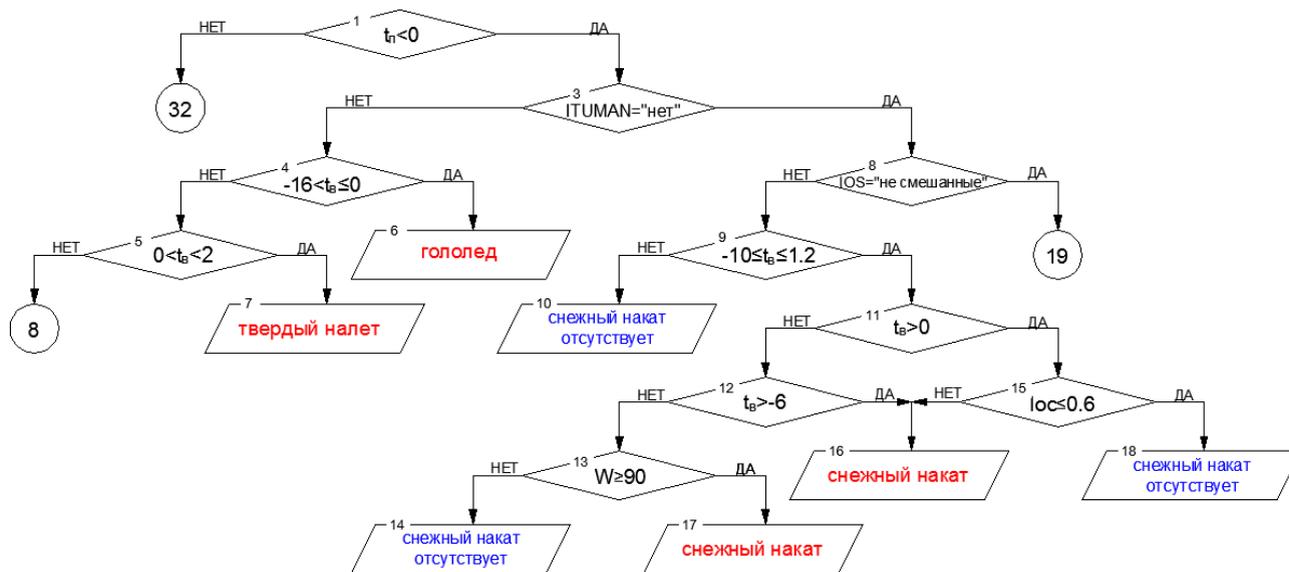


Рис. 1 а. Схема алгоритма определения состояния покрытия в зимний период

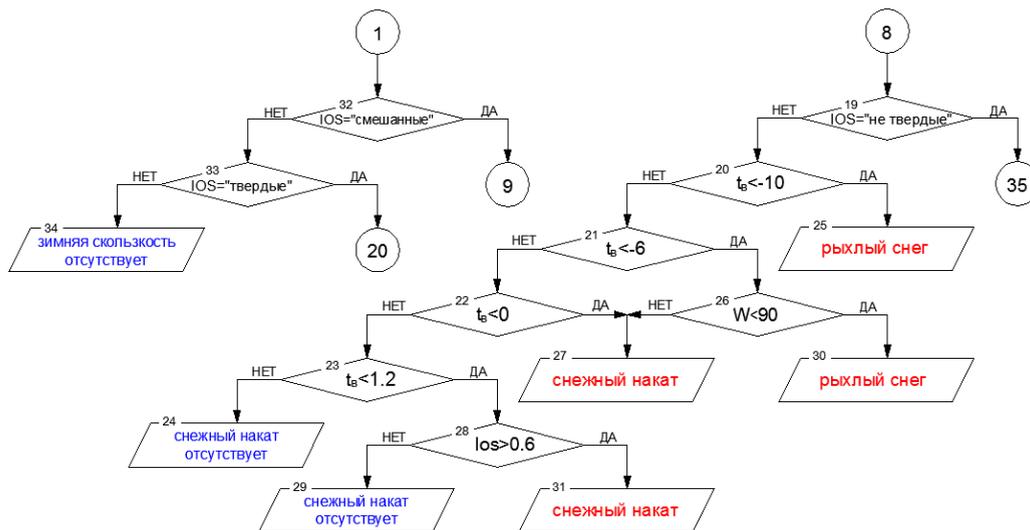


Рис. 1 б. Схема алгоритма определения состояния покрытия в зимний период (продолжение)

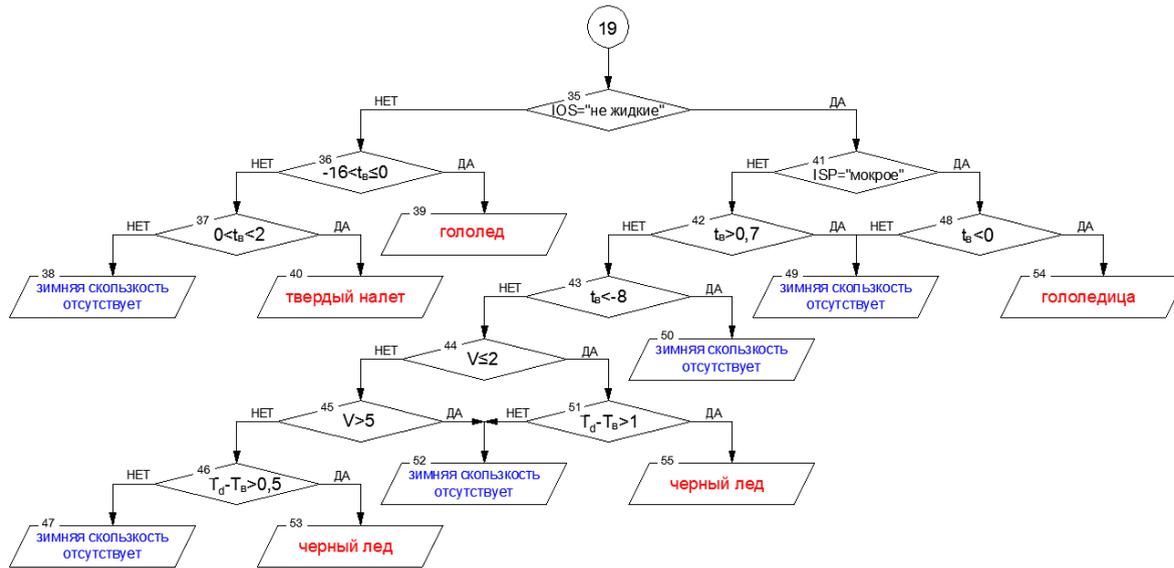


Рис. 1 в. Схема алгоритма определения состояния покрытия в зимний период (продолжение)

Гистограмма распределения минимальной температуры и выравнивающая ее теоретическая кривая приведены на **рис. 2**.

Для проверки правдоподобности гипотезы о принадлежности опытных данных к показательному усеченному закону использовали критерий согласия χ^2 Пирсона при уровне значимости 0,01 и критерий Романовского.

С помощью теоретического закона распределения установлено, что среднее значение температуры составило минус 3,06 °С.

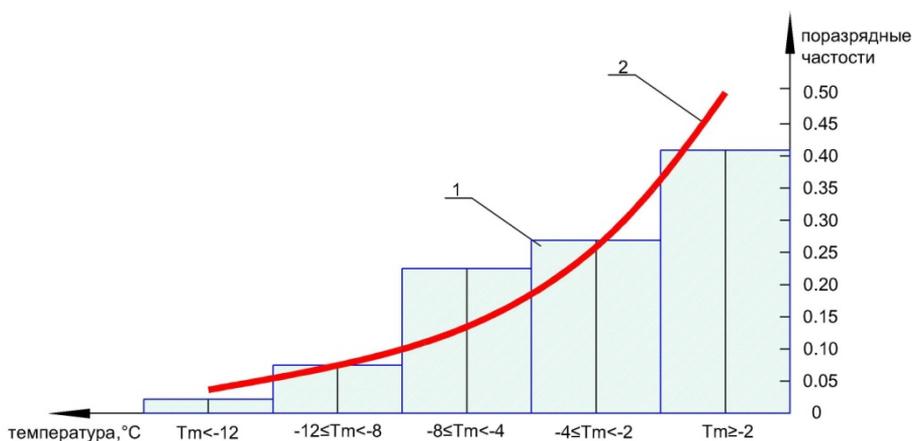


Рис. 2. Гистограмма распределения минимальной температуры (1) и выравнивающая ее теоретическая кривая (2)

Определены границы доверительных интервалов разброса среднего значения минимальной температуры для различной доверительной вероятности. Результаты расчета приведены в **табл. 2, 3**.

В соответствии с рекомендациями по нормам распределения противогололедных реагентов [2] рассчитаны вероятности образования скользкости в различных диапазонах изменения температур. Полученные результаты позволяют рассчитывать необходимое количество противогололедных материалов.

Для случаев образования снежного наката были проведены аналогичные расчеты, а также выполнена статистическая обработка результатов моделирования.

Установлено, что минимальное значение температуры – минус 25,9 °С, а максимальное значение равно 1,2 °С.

Таблица 2

Доверительный интервал разброса минимальной температуры для зимней скользкости в виде стекловидного льда

<i>Доверительная вероятность P, %</i>	<i>Двухсторонний доверительный интервал, °С</i>
95	$-5,75 < T_m < -0,38$
90	$-5,31 < T_m < -0,82$
85	$-5,03 < T_m < -1,09$

Таблица 3

Вероятность образования стекловидного льда в различном диапазоне температур

<i>Границы разрядов</i>	$T_m \geq -2$	$-4 \leq T_m < -2$	$-8 \leq T_m < -4$	$-12 \leq T_m < -8$	$T_m < -12$
<i>Вероятность образования зимней скользкости</i>	0,499	0,259	0,135	0,070	0,037

Было выявлено, что минимальная температура в период возможного образования снежного наката как случайная величина подчиняется закону Вейбулла:

$$f(T_m) = n\mu^n (T_m - c)^{n-1} e^{-\mu^n (T_m - c)^n}, \quad (2)$$

где

T_m – минимальная температура в период образования скользкости, °С;

c, μ, n – параметры закона ($c=0; \mu=0,18; n=1,85$).

Гистограмма распределения и теоретическая кривая приведены на **рис. 3**.

Для проверки правдоподобности гипотезы о принадлежности опытных данных к закону Вейбулла использовали *критерий согласия χ^2 Пирсона* при уровне значимости 0,01 и *критерий Романовского*.

Математическое ожидание (среднее) значение параметра для температуры в момент образования снежного наката составило минус 6,7 °С.

С помощью теоретического закона распределения установлены границы доверительных интервалов разброса среднего значения для различной доверительной вероятности. Результаты расчета приведены в **табл. 4**.

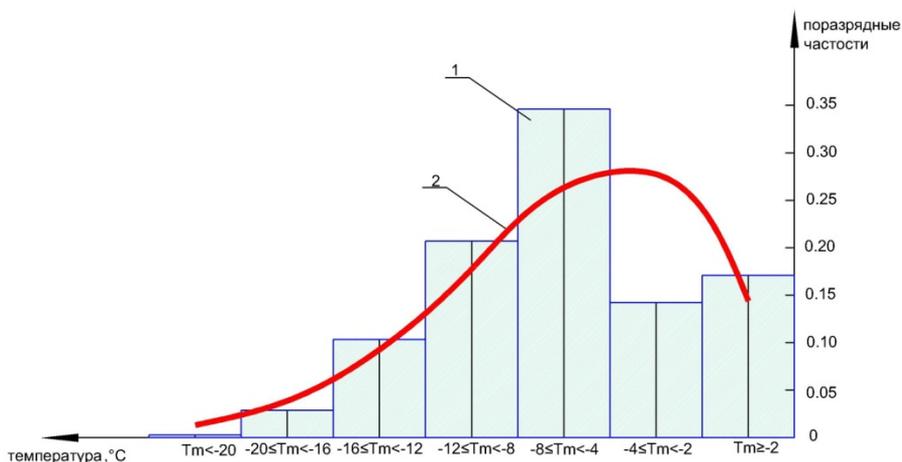


Рис. 3. Гистограмма распределения минимальной температуры (1) и выравнивающая ее теоретическая кривая закона Вейбулла (2)

Таблица 4

Доверительный интервал разброса минимальной температуры для зимней скользкости в виде снежного наката

<i>Доверительная вероятность P, %</i>	<i>Двухсторонний доверительный интервал, °С</i>
95	$-7,17 < T_m < -2,94$
90	$-6,82 < T_m < -3,28$
85	$-6,61 < T_m < -3,50$

В соответствии с рекомендациями по нормам распределения противогололедных реагентов для профилактики образования снежного наката [2] рассчитаны вероятности образования данного вида скользкости в различных диапазонах изменения температур.

Таблица 5

*Вероятность образования снежного наката
в различном диапазоне температур*

<i>Границы разрядов</i>	$T_m \geq -2$	$-4 \leq T_m < -2$	$-8 \leq T_m < -4$	$-12 \leq T_m < -8$	$-16 \leq T_m < -12$	$20 \leq T_m < -16$	$T_m < -20$
<i>Вероятность образования</i>	0,144	0,278	0,264	0,178	0,093	0,030	0,013

ВЫВОДЫ

1. Представлена методика и обобщенная классификация различных видов зимней скользкости, для которой разработана схема алгоритма моделирования состояния дорожного покрытия в зимний период.
2. Приведены результаты моделирования в виде законов распределения минимальной температуры (воздуха или дорожного покрытия), позволяющие рассчитать вероятность образования зимней скользкости в различном диапазоне изменения минимальной температуры.
3. Исследован температурный режим в период образования зимней скользкости и проведения работ по ее ликвидации для стекловидного льда и снежного наката. Рассчитаны вероятности попадания параметра минимальной температуры в отдельные диапазоны температур для расчета необходимого количества противогололедных реагентов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Периодичность проведения видов работ по содержанию автомобильных дорог общего пользования федерального значения и искусственных сооружений на них. – Утв. Приказом Минтранса России от 01.11.2007 № 157 // Информационная система МЕГАНОРМ: [веб-сайт]. – Электрон. данные. – URL: <http://meganorm.ru/Index2/1/4293836/4293836106.htm> (дата обращения 15.06.2017).
2. ОДМ. Руководство по борьбе с зимней скользкостью на автомобильных дорогах. – Введ. 2003-16-06. – М.: Информавтодор, 2003. – 72 с.
3. Самодурова Т.В. Моделирование состояния дорожного покрытия в зимний период / Т.В. Самодурова, Е.Н. Тропынин // Дороги и мосты. – 2009. – №22/2. – С. 137-148.
4. Самодурова Т.В. Влияние дорожных и погодных факторов на температурный режим дорожного покрытия в зимний период / Т.В. Самодурова, Ю.В. Бакланов // Дороги и мосты. – 2011. – №25/1. – С. 166-178.
5. Самодурова Т.В. Влияние солнечной радиации на температурный режим дорожного покрытия / Т.В. Самодурова, Ю.В. Бакланов // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. – 2013. – №2(24). – С. 308-314.
6. Самодурова Т.В. Моделирование состояния дорожного покрытия и расчет цикличности работ по зимнему содержанию автомобильных дорог / Т.В. Самодурова, Ю.В. Бакланов // Хроники объединенного фонда электронных ресурсов «Наука и образование». – 2013. – № 12(55). – Режим доступа: <http://ofernio.ru/portal/newspaper/ofernio/2013/12.doc> (дата обращения 15.06.2017).
7. Завадский, Ю. В. Статистическая обработка эксперимента [Текст]: учеб. пособие / Ю. В. Завадский. – М.: Высшая школа, 1976. – 270 с.

LITERATURA

1. *Periodichnost' provedenija vidov rabot po sodержaniju avtomobil'nyh dorog obshhego pol'zovanija federal'nogo znachenija i iskusstvennyh sooruzhenij na nih.* – Utv. Prikazom Mintransa Rossii ot 01.11.2007 # 157 // *Informacionnaja sistema MEGANORM: [veb-sajt]. – Jelektron. dannye. – URL: <http://meganorm.ru/Index2/1/4293836/4293836106.htm> (data obrashhenija 15.06.2017).*
2. *ODM. Rukovodstvo po bor'be s zimnej skol'zkost'ju na avtomobil'nyh dorogah.* – Vved. 2003-16-06. – M.: Informavtodor, 2003. – 72 s.
3. *Samodurova T.V. Modelirovanie sostojanija dorozhnogo pokrytija v zimnij period / T.V. Samodurova, E.N. Tropyinin // Dorogi i mosty. – 2009. – #22/2. – S. 137-148.*
4. *Samodurova T.V. Vlijanie dorozhnyh i pogodnyh faktorov na temperaturnyj rezhim dorozhnogo pokrytija v zimnij period / T.V. Samodurova, Ju.V. Baklanov // Dorogi i mosty. – 2011. – #25/1. – S. 166-178.*
5. *Samodurova T.V. Vlijanie solnechnoj radiacii na temperaturnyj rezhim dorozhnogo pokrytija / T.V. Samodurova, Ju.V. Baklanov // Izvestija Kazanskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. – 2013. – #2(24). – S. 308-314.*
6. *Samodurova T.V. Modelirovanie sostojanija dorozhnogo pokrytija i raschet ciklichnosti rabot po zimnemu sodержaniju avtomobil'nyh dorog / T.V. Samodurova, Ju.V. Baklanov // Hroniki ob"edinennogo fonda jelektronnyh resursov «Nauka i obrazovanie». – 2013. – # 12(55). – Rezhim dostupa: <http://ofernio.ru/portal/newspaper/ofernio/2013/12.doc> (data obrashhenija 15.06.2017).*
7. *Zavadskij, Ju. V. Statisticheskaja obrabotka jeksperimenta [Tekst]: uceb. posobie / Ju. V. Zavadskij. – M.: Vysshaja shkola, 1976. – 270 s.*

**RESEARCH OF THE TEMPERATURE REGIME DURING
THE PERIOD OF WINTER SLIPPERINESS
POSSIBLE FORMATION ON ROADS**

Doctor of Engineering, Professor T.V. Samodurova,

Ph. D. (Tech.) Y.V. Baklanov,

Postgraduate Student V.N. Peregudova

(Voronezh State Technical University)

Contact information: +7(473)271-52-02;

samodurova@vgasu.vrn.ru;

baklanovmail@mail.ru;

lapusia2@yandex.ru

A generalized classification and an algorithm for modeling road pavement condition during winter are proposed. The modeling results of road pavement condition are presented. The temperature regime during the period of slipperiness formation and when working for its elimination is studied. Regularities of minimum temperature distribution for glassy ice and packed snow are revealed, and the probabilities for slipperiness formation in various temperature ranges are calculated.

Key words: *road, winter slipperiness classification, pavement condition modeling, minimum temperature of slipperiness formation.*

Рецензенты: нач. отдела экологической и эксплуатационной оценки объектов дорожного хозяйства А.В. Бобков, заведующий Центрально-испытательной лабораторией Ю.Н. Розов (ФАУ «РОСДОРНИИ»).

Статья поступила в редакцию: 31.03.2017 г.