

## Увлажнение земляного полотна поверхностными водами

Р.С. Сапелкин<sup>1a</sup>, Е.В. Чернышова<sup>1b</sup>, О.Н. Тверитнев<sup>1c</sup>, А.В. Скрыпников<sup>1d</sup>,  
Ю.А. Боровлев<sup>1e</sup>, А.Б. Бондарев<sup>1f</sup>, А.Ю. Жук<sup>2g</sup>

<sup>1</sup>Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр. Революции, 19, Воронеж, Россия

<sup>2</sup>Братский государственный университет, ул. Макаренко, 40, Братск, Россия

<sup>a</sup> charls5796@mail.ru, <sup>b</sup> elenabok@mail.ru, <sup>c</sup> olegtvritnev@mail.com, <sup>d</sup> skrypnikovvsafe@mail.ru,

<sup>e</sup> boraleff@mail.com, <sup>f</sup> abbondarev@mail.ru, <sup>g</sup> lpf@brstu.ru

<sup>a</sup> <https://orcid.org/0000-0002-3863-7061>, <sup>b</sup> <https://orcid.org/0000-0002-1265-041X0>, <sup>c</sup> <https://orcid.org/0000-0002-8183-0393>,

<sup>d</sup> <https://orcid.org/0000-0003-1073-9151>, <sup>e</sup> <https://orcid.org/0000-0002-5431-9944>, <sup>f</sup> <https://orcid.org/0000-0002-4768-8602>,

<sup>g</sup> <https://orcid.org/0000-0002-1808-245X>

Статья поступила 09.09.2022, принята 20.09.2022

*Изучение источников увлажнения грунтов земляного полотна позволило установить, что поверхностные воды могут оказывать значительное влияние на прочность и устойчивость дорожных конструкций. Для условий Новгородской области следует выделить два основных вида поверхностного увлажнения земляного полотна, первый — осадки, выпадающие в виде дождей, второй — вода, застоявшаяся у подошвы насыпи. Первый вид увлажнения встречается на всех дорогах, независимо от типа местности и степени увлажнения. В настоящее время методы учета влагонакопления не дают ответа на вопрос о количестве влаги, проникающей в грунты земляного полотна от осадков. Причина неучета увлажнения атмосферными осадками земляного полотна заключается в том, что разработанная теория влагонакопления относится к дорогам с усовершенствованными покрытиями капитального типа, которые приняты за водонепроницаемые (гравийные, щебеночные, грунтовые). Тогда встает вопрос о выявлении степени увлажнения грунтов земляного полотна поверхностными водами, рассмотренный в данной работе.*

**Ключевые слова:** трассирование; земляное полотно; прочность; устойчивость.

## Moistening the roadbed with surface water

R.S. Sapelkin<sup>1a</sup>, E.V. Chernyshova<sup>1b</sup>, O.N. Tveritnev<sup>1c</sup>, A.V. Skrypnikov<sup>1d</sup>,  
Yu.A. Borovlev<sup>1e</sup>, A.B. Bondarev<sup>1f</sup>, A.Yu. Zhuk<sup>2g</sup>

<sup>1</sup>Voronezh State University of Engineering Technologies; 19, Revolutsii Ave., Voronezh, Russia

<sup>2</sup>Bratsk State University; 40, Makarenko St., Bratsk, Russia

<sup>a</sup> charls5796@mail.ru, <sup>b</sup> elenabok@mail.ru, <sup>c</sup> olegtvritnev@mail.com, <sup>d</sup> skrypnikovvsafe@mail.ru,

<sup>e</sup> boraleff@mail.com, <sup>f</sup> abbondarev@mail.ru, <sup>g</sup> lpf@brstu.ru

<sup>a</sup> <https://orcid.org/0000-0002-3863-7061>, <sup>b</sup> <https://orcid.org/0000-0002-1265-041X0>, <sup>c</sup> <https://orcid.org/0000-0002-8183-0393>,

<sup>d</sup> <https://orcid.org/0000-0003-1073-9151>, <sup>e</sup> <https://orcid.org/0000-0002-5431-9944>, <sup>f</sup> <https://orcid.org/0000-0002-4768-8602>,

<sup>g</sup> <https://orcid.org/0000-0002-1808-245X>

Received 09.09.2022, accepted 20.09.2022

*The study of the sources of soil moistening of the roadbed makes it possible to establish that surface waters can have a significant impact on the strength and stability of road structures. For the conditions of the Novgorod region, two main types of surface moistening of the roadbed should be distinguished, the first - precipitation falling in the form of rains, the second - water stagnant at the bottom of the embankment. The first type of humidification is found on all roads, regardless of the type of terrain and the degree of humidification. Currently, the methods of accounting for moisture accumulation do not give a question about the amount of moisture penetrating into the soils of the roadbed from precipitation. The reason for the failure to take into account the humidification by atmospheric precipitation of the roadbed is that the developed theory of moisture accumulation refers to roads with improved capital-type coatings, which are accepted as waterproof (gravel, crushed stone, soil). Then the question arises of identifying the degree of moistening of the soils of the subgrade surface water, which is considered in this paper.*

**Keywords:** tracing; subgrade; strength; stability.

**Введение.** Для расчета поверхностного увлажнения земляного полотна необходимы следующие данные:

– размеры конструктивных элементов дороги — ширина проезжей части и обочин, продольный уклон дороги, поперечный уклон проезжей части и обочин (проектные данные);

– характеристики грунтов земляного полотна — коэффициент фильтрации, полная влагоемкость, оптимальная влажность и влажность границы текучести;

– метеорологические факторы (многолетние среднемесячные данные) — количество осадков и число дождей, суммарная продолжительность осадков, ско-

рость ветра, дефицит влажности воздуха по годам (не менее 15).

*Цель исследования.* Исследование методики определения периодов осеннего влагонакопления и количества осадков, впитывающихся в грунт земляного полотна при трассировании лесовозных автомобильных дорог и определении их прочности.

*Объект исследования* — процесс увлажнения земляного полотна поверхностными водами.

*Методы исследования* — аналитическое определение количества воды, поступающей в основание проезжей части лесовозных автомобильных дорог.

Как уже известно [1–3], общее количество воды ( $q$ , м<sup>3</sup> на 1 пог. м дороги), поступающей в основание проезжей части, может быть определено из уравнения:

$$q = q_1 + q_2 + q_3, \quad (1)$$

где  $q_1$  — количество воды, поступающей из нижележащих слоев грунта земляного полотна при оттаивании под проезжей частью;  $q_2$  — то же под обочинами;  $q_3$  — объем воды, проникающей в основание с поверхности дороги.

Количество воды от атмосферных осадков, поступающее в основание проезжей части с поверхности дороги ( $q_3$ ), зависит от интенсивности, средней продолжительности осадков в расчетном периоде, разновидности и плотности грунтов, конструкции дороги [6; 7].

Все необходимые данные устанавливаются по ТУ, климатическим справочникам и определяются стандартными методами.

При расчете количества поверхностной воды, проникающей в тело земляного полотна, определяются:

1. Возможная суммарная продолжительность осадков 5 % обеспеченности ( $T_g$ , мин) — по номограммам А.Н. Лебедева.

2. Число дождей 5 % обеспеченности:

$$m = \frac{m_{cp}}{T_{g(cp)}} T_g, \quad (2)$$

где  $m_{cp}$  — среднее число дождей;  $T_{g(cp)}$  — средняя суммарная продолжительность осадков, мин.

3. Величина дефицита влажности воздуха 5 % обеспеченности ( $d$ , мб) — по методике Н.Н. Чегодаева. Сущность данной методики сводится к следующему: выписывают  $N_0$  значений дефицита влажности воздуха в возрастающем порядке:

$$N_0 = 0,412n + 0,5, \quad (3)$$

где  $n$  — число лет наблюдений.

Для каждого из значений дефицита влажности вычисляют величину среднего периода (лет) эмпирической повторяемости ( $T$ ) и разность ( $d_0 - d$ ):

$$T = \frac{0,4+n}{N-0,3}, \quad (4)$$

где  $N$  — порядковый номер дефицита в возрастающем ряду;  $d_0$  — максимальная величина дефицита влажности в выписанном ряду.

Значения ( $d_0 - d$ ) и  $T$  откладывают на спрямляющей клетчатке Н.Н. Чегодаева; по полученным точкам, не обращая внимания на ряд первых и последних величин, не всегда являющихся характерными, проводят

прямую и продолжают ее до необходимой расчетной повторяемости.

4. Средний промежуток времени между дождями

$$T = \frac{T_1 - T_g}{m}, \quad (5)$$

где  $T_1$  — продолжительность месяца, мин.

5. Средняя величина смачивания от одного дождя:

$$h_{cm} = \frac{0,02a \cdot 0,1l}{a+1} \cdot \sqrt[3]{dt}, \quad (6)$$

где  $a$  — ширина односкатной или половины двухскатной проезжей части по направлению косого уклона, м;  $l$  — протяженность обочины по направлению косого уклона, м.

6. Суммарная величина смачивания за расчетный период:

$$H_{cm} = m h_{cm}. \quad (7)$$

7. Средняя интенсивность дождя:

$$i_g = \frac{H_{g(cp)}}{T_{g(cp)}}, \quad (8)$$

где  $H_{g(cp)}$  — среднеемесячное количество осадков, мм. При  $H_{cm} > i_g T_g$  все осадки идут на смачивание, впитывание отсутствует. При  $H_{cm} < i_g T_g$  происходит впитывание осадков в грунт земляного полотна.

8. Интенсивность поступления воды на обочину с учетом стока с проезжей части:

$$i_0 = i_g \left(1 + \frac{a}{2,5}\right). \quad (9)$$

9. Коэффициент впитывания:

$$k_\phi = 6000 \frac{\sqrt{k_\phi}}{W_m^2} \left(1 - \sqrt{\frac{W_0}{W_{n,6}}}\right) + 30k_\phi, \quad (10)$$

где  $k_\phi$  — коэффициент фильтрации, м/сутки;  $W_m$  — влажность при нижней границе текучести грунта, %;  $W_{n,6}$  — оптимальная влажность грунта, %.

10. Продолжительность впитывания:

$$T_{en} = T_g - \frac{H_{cm}}{i_g}. \quad (11)$$

11. Интенсивность впитывания:

$$i_{en} \leq 0,02C; i_{en} = i_{en}. \quad (12)$$

12. Величина впитывания:

$$H_{en} = i_{en} \left(T_g - \frac{H_{cm}}{i_g}\right) = i_{en} \cdot T_{en}. \quad (13)$$

13. Интенсивность испарения — по таблице.

14. Количество испарившейся воды:

$$H_i = i_i T_i, \quad (14)$$

где  $i_i$  — интенсивность испарения;  $T_i$  — продолжительность испарения.

15. Величина притока воды в земляное полотно определяется по уравнению:

$$q_3 = 1,5 \cdot 3,6 \cdot 10^4 (H_{en} - H_i) B, \quad (15)$$

где 1,5 — коэффициент неравномерности выпадения осадков по времени;  $B$  — ширина земляного полотна.

Характерным явлением для Новгородской области является подтопляемость насыпей дорог паводковыми водами. Продолжительность подтопления длится ино-

гда до полутора месяцев, что способствует водонасыщению грунтов земляного полотна [4; 5; 8; 9].

**Таблица.** Интенсивность испарения

Дефицит влажности воздуха, мб			Интенсивность испарения *10 <sup>-10</sup> м/с при скорости ветра, м/с		
0,5	53,3	60,0	66,6	73,3	80,0
1,0	91,6	10,3	115,0	126,6	138,3
1,5	123,3	140,0	155,0	173,3	118,3
2,0	155,0	175,0	195,0	215,0	235,0
2,5	181,6	205,0	228,3	253,3	276,6
3,0	206,6	233,3	261,6	288,3	315,0
3,5	231,6	263,3	291,6	305,0	351,6
4,0	253,3	285,0	321,6	351,6	385,0
4,5	273,3	308,3	343,3	380,0	415,0
5,0	293,3	331,6	371,6	410,0	446,6

Современная теория передвижения влаги в грунтах — как в случае полного насыщения, так и при частичном увлажнении, основывается на уравнении Дарси:

$$\frac{\sigma\omega}{\sigma t} = V = -k\Delta\Phi, \quad (16)$$

где  $\omega$  — влажность грунта;  $t$  — время;  $V$  — объем воды, протекающей за единицу времени;  $k$  — коэффициент фильтрации;  $\Delta\Phi$  — градиент потенциала.

Физический смысл уравнения Дарси заключается в том, что скорость движения воды пропорциональна величине движущей силы, которой является градиент потенциала.

Уравнение потока жидкости должно удовлетворять не только закону Дарси, но и закону сохранения материи. В математическом виде это будет представляться следующим образом:

$$\frac{\sigma}{\sigma x} V = -\frac{\sigma\omega}{\sigma t} \quad \text{или} \quad \frac{\sigma\omega}{\sigma x} \cdot \frac{\sigma\omega}{\sigma t} = -\frac{\sigma\omega}{\sigma t}. \quad (17)$$

Приравняв уравнения (16) и (17), получим:

$$\frac{\sigma\omega - \sigma}{\sigma t} k\Delta\Phi \quad \text{или} \quad \frac{\sigma\omega}{\sigma t} = \frac{\sigma}{\sigma x} k \frac{\sigma\Phi}{\sigma x}. \quad (18)$$

Уравнение (18) является общим уравнением, описывающим движение потока влаги в грунте.

Используя уравнение (18) и применив теорию линейных дифференциальных уравнений к задачам о движении воды в горизонтальном направлении, Н.П. Вырко получил зависимость (19), дающую возможность для любого промежутка времени и на различном расстоянии от источника увлажнения определить влажность грунта земляного полотна:

$$\omega_{(x,t)} = \omega_H \left[ 1 - \Phi\left(\frac{x}{2\sqrt{kt}}\right) \right] - \frac{\omega_0}{2} \left[ 2\Phi\left(\frac{x}{2\sqrt{kt}}\right) - \Phi\left(\frac{x-l}{2\sqrt{kt}}\right) - \Phi\left(\frac{x+l}{2\sqrt{kt}}\right) \right], \quad (19)$$

где  $\omega_H$  — полная влагоемкость грунта, %;  $\omega_0$  — естественная влажность грунта, %;  $l$  — расстояние от источника увлажнения, см;  $k$  — коэффициент влагопроводности грунта, см<sup>2</sup>/сутки;  $t$  — время увлажнения, сутки;  $x$  — текущая ордината, см.

Таким образом, принимая во внимание, что относительная ошибка линейных измерений значительно меньше остальных членов выражений (9)–(10), относительная ошибка определения объемов будет зависеть, в основном, от ошибки превышений и рабочей отметки.

**Выводы.** По приведенной выше методике и на основании климатических данных, указанных ранее, нами определены периоды осеннего влагонакопления и количество осадков, впитывающихся в грунт земляного полотна.

Расчеты показывают, что в условиях Новгородской области грунты земляного полотна автомобильных дорог подвергаются увлажнению атмосферными осадками в жидком виде на протяжении 70–150 суток (1 890–3 600 ч). Следует отметить, что наименьший период увлажнения наблюдается на юге области, наибольший — на северо-востоке. Протяженность периода влагонакопления обуславливает и величину осеннего влагонакопления. Количество впитывающихся осадков в грунты земляного полотна составляет более 180 мм, в то время как в южных районах области величина впитывания составляет около 70 мм. Поступление такого количества осадков в грунт земляного полотна способно переувлажнять его и существенно уменьшать прочность дорожной одежды.

Второй вид увлажнения встречается на участках с необеспеченным поверхностным стоком при застоях воды в канавах или резервах. Застоявшаяся вода является активным источником увлажнения как в весенний, так и осенний периоды, особенно при промерзании грунтов. По исследованиям Н.А. Пузакова, зона пуче-

ния в мелкозернистых грунтах ограничена изотермами 0–3–5 °С, а мощность слоя принимается равной 0,5 м. На лесовозных автомобильных дорогах очень часто встречаются участки насыпи высотой 0,5 м и менее,

устроенные из грунтов боковых резервов. При промерзании таких насыпей количество влаги в теле земляного полотна достигает больших величин.

#### *Литература*

1. Чистяков С.В. Модель движения автомобилей на участках дорог с ограниченной видимостью // Вестн. Воронежского гос. ун-та инженерных технологий. 2014. № (4). С. 81-85.
2. Skrypnikov A.V., Dorokhin S.V., Kozlov V.G., Chernyshova E.V. Mathematical Model of Statistical Identification of Car Transport Informational Provision // Journal of Engineering and Applied Sciences. January 2017. V. 12. № 2. P. 511-515.
3. Бурмистров Д.В. Математическое моделирование оптимизации и управления транспортным потоком посредством применения датчиков регистрации проходящих автомобилей и информационных устройств // Вестн. Воронежского гос. ун-та инженерных технологий. 2016. № 2. С. 102-109.
4. Skrypnikov A.V., Chernyshova E.V., Zemlyanukhin M.Yu. Firewall as a tool of implementation of security policy. Science and education: materials of the viii international research and practice. Conference, Munich, march 19th-20th, 2015 / publishing office Vela VerlagWaldkraiburg -Munich - Germany, 2015. P. 345-350.
5. Скрыпников А.В. Повышение эффективности функционирования автомобильных дорог лесного комплекса: моногр. Йошкар-Ола, 2016. 251 с.
6. Скрыпников А.В., Курьянов В.К., Рябова О.В. Стадийное повышение транспортно-эксплуатационных качеств автомобильных дорог в системе автоматизированного проектирования: моногр. Воронеж: ВГУ, 2004. 192 с.
7. Скрыпников А.В. Методы, модели и алгоритмы повышения транспортно-эксплуатационных качеств лесных автомобильных дорог в процессе проектирования, строительства и эксплуатации: моногр. М.: Изд-во ФЛИНТА: Наука, 2012. 310 с.
8. Кондрашова Е.В. Оптимизация межремонтных сроков лесовозных автомобильных дорог // Фундаментальные исследования. 2011. № 8 (Ч. 3). С. 667-671.
9. Умаров М.М. Способы оценки требуемого уровня надежности функционирования комплексного технического обеспечения // Системный анализ и моделирование процессов управления качеством в инновационном развитии агропромышленного комплекса: сб. тр. конф. (8-9 апр. 2015 г.). Воронеж, ВГУИТ, 2015. С. 587-594.

#### *References*

1. CHistyakov S.V. Model of car movement on road sections with limited visibility // Proceedings of the Voronezh State University of Engineering Technologies. 2014. № (4). P. 81-85.
2. Skrypnikov A.V., Dorokhin S.V., Kozlov V.G., Chernyshova E.V. Mathematical Model of Statistical Identification of Car Transport Informational Provision // Journal of Engineering and Applied Sciences. January 2017. V. 12. № 2. P. 511-515.
3. Burmistrov D.V. Mathematical modeling of optimization and control of the traffic flow through the use of sensors for registering passing cars and information devices // Proceedings of the Voronezh State University of Engineering Technologies. 2016. № 2. P. 102-109.
4. Skrypnikov A.V., Shernyshova E.V., Zemlyanukhin M.Yu. Firewall as a tool of implementation of security policy. Science and education: materials of the viii international research and practice. Conference, Munich, march 19th-20th, 2015 / publishing office Vela VerlagWaldkraiburg -Munich - Germany, 2015. P. 345-350.
5. Skrypnikov A.V. Improving the efficiency of the functioning of the roads of the forest complex: monogr. Yoshkar-Ola, 2016. 251 p.
6. Skrypnikov A.V., Kur'yanov V.K., Ryabova O.V. Staged improvement of the transport and operational qualities of highways in the computer-aided design system: monogr. Voronezh: VGU, 2004. 192 p.
7. Skrypnikov A.V. Methods, models and algorithms for improving the transport and operational qualities of forest roads in the process of design, construction and operation: monogr. M.: Izd-vo FLINTA: Nauka, 2012. 310 p.
8. Kondrashova E.V. Optimization of overhaul periods of timber trucks // Fundamental research. 2011. № 8 (CH. 3). P. 667-671.
9. Umarov M.M. Methods for assessing the required level of reliability of the functioning of complex technical support // Sistemnyj analiz i modelirovanie processov upravleniya kachestvom v innovacionnom razvitii agropromyshlennogo kompleksa: sb. tr. konf. (8-9 apr. 2015 g.). Voronezh, VGUIT, 2015. P. 587-594.