

11. Russell-Head, D. S. Condensed snow as a sidewalk material for the construction of a runway / D. S. Russell-Head, W. F. Budd, P. J. Moore // The cold regions of science and technology. – 1984. – No. 9. – P. 231-247.

12. Shoop, S. A. Finite element modeling of tire-terrain interaction: PhD dissertation, University of Michigan and ERDC // CRREL Technical Report 01–16. – 2001. – 210 p.

Сведения об авторах

Кручинин Игорь Николаевич – доцент кафедры транспорта и дорожного строительства, федеральное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уральский государственный лесотехнический университет», доктор технических наук, доцент, г. Екатеринбург, Российская Федерация; e-mail: kinaa.k@ya.ru

Бурмистрова Ольга Николаевна – заведующая кафедрой технологий и машин лесозаготовок, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ухтинский государственный университет», доктор технических наук, профессор, г. Ухта, Российская Федерация; e-mail: oburmistrova@ugtu.net

Information about the authors

Kruchinin Igor Nikolaevich – Associate Professor of transport and road construction, the federal budget institution of higher education «Ural State Forestry Engineering University», Phd in Engineering, Associate Professor, Ekaterinburg, Russia, e-mail: kinaa.k@ya.ru

Burmistrova Olga Nikolaevna – Head of the Department of technology and machinery of logging, Federal state budgetary educational institution of higher professional education "Ukhta state University", doctor of technical Sciences, Professor, Ukhta, Russian Federation, e-mail: oburmistrova@ugtu.net

DOI: 10.12737/article_5a3d0656ee07b2.99342186

УДК 625.7/ 517.9

ИССЛЕДОВАНИЕ СКОРОСТИ ПРОНИКНОВЕНИЯ ЖИДКОСТИ В ГРУНТ НАСЫПИ ЗЕМЛЯНОГО ПОЛОТНА

аспирант **Ю.А. Макарова**

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова»,
Воронеж, Российская Федерация

Лесовозную автомобильную дорогу можно назвать одним из наиболее значимых элементов лесопромышленного комплекса, поэтому строительство автомобильных дорог играет важную роль не только в эффективном развитии лесопромышленного комплекса, но и является незаменимым элементом для всех сфер человеческой деятельности. Учитывая существующие на сегодняшний момент способы перевозки лесоматериалов, развитие автомобильного транспорта становится наиболее эффективным в условиях нашей страны. Несмотря на это, транспортная инфраструктура в основных лесных регионах слабо развита из-за сильного воздействия неблагоприятных факторов. Поэтому первостепенной задачей для специалистов становится повышение качества дорог. Ключевой проблемой большинства лесовозных автомобильных дорог является потеря прочностных характеристик из-за влияния на них неблагоприятных природно-климатических условий. В перспективных лес-

ных регионах она выражается в сильном переувлажнении почв, возникновении паводков, селей. Воздействие паводков на поверхность откосов земляного полотна сокращает её срок службы и приводит к преждевременному старению и деформации. Рассматривая скорость проникновения жидкости в грунт насыпи земляного полотна как величину переменную, мы поставили перед собой цель вывести дифференциальное уравнение движения жидкости в пористой среде под воздействием внешних нагрузок. При проведении исследования скорости проникновения жидкости в грунт земляного полотна за основу был взят второй закон Ньютона. Расписав более подробно значения массы пласта воды, пропитывающего поверхность земляного полотна, и сил, действующие на поверхность откоса земляного полотна и включающих в себя силу давления жидкости, силу сопротивления поверхности откоса и силу сопротивления конструкции защиты, мы получили требуемое уравнение. Используя решение дифференциального уравнения движения жидкости в грунте земляного полотна под воздействием внешних нагрузок, можно определить значение скорости проникновения жидкости в грунт насыпи земляного полотна при различных значениях пути фильтрации в любой момент времени.

Ключевые слова: переувлажнение, деформация, паводки, откосы, уравнение, сила давления, сила сопротивления, скорость, масса.

INVESTIGATION OF SPEED OF LIQUID INJECTION IN FILL OF EARTH ROADBED

Post-graduate student **Y.A. Makarova**

FSBEI HE «Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov»,
Voronezh, Russian Federation

Abstract

The timber road can be called one of the most significant elements of the timber industry complex, therefore, the construction of highways plays an important role not only in the effective development of the timber industry complex, but is also an indispensable element for all spheres of human activity. Considering currently available ways of transporting timber, the development of road transport becomes the most effective in the conditions of our country. Despite of this, transport infrastructure in the main forest regions is poorly developed due to the strong impact of unfavorable factors. Therefore, the paramount task for specialists is improving the quality of roads. The key problem of the majority of logging roads is the loss of strength characteristics due to the influence of unfavorable climatic conditions on them. In promising forest regions, it is expressed in strong overmoistening of soils, occurrence of floods, mudflows. The impact of floods on the surface of slopes of the earth road bed reduces its service life and leads to premature aging and deformation. Considering the rate of penetration of liquid into the soil of roadbed as a variable value, we set ourselves the goal of deriving the differential equation of fluid motion in a porous medium under the influence of external loads. When carrying out a study of the rate of penetration of liquid into the soil of the roadbed, Newton's second law was taken as the basis. Having written in more detail the values of water mass layer impregnating the surface of the earth roadbed and forces acting on the surface of the slope of the roadbed and including the force of the fluid pressure, the resistance force of the slope surface and the resistance force of the protection structure, we obtained the required equation. Using the solution of the differential equation of fluid motion in the soil of the roadbed under the influence of external loads, it is possible to determine the value of the rate of penetration of liquid into the soil of earth roadbed at different values of filtration path at any time moment.

Keywords: overmoistening, deformation, floods, slopes, equation, pressure force, resistance force, speed, mass.

Строительство автомобильных дорог не только играет важную роль в эффективном развитии лесопромышленного комплекса, но и является незаменимым элементом для всех сфер человеческой деятельности. Они постоянно расширяются, охватывая всё большую территорию. В современных условиях перевозка лесоматериалов автотранспортом наиболее распространена по сравнению с другими видами транспортировки грузов, такими как водный и железнодорожный способы перевозки лесных материалов (рис. 1). Использование водного транспорта леса по рекам на данный момент не актуально из-за запрета молевого лесосплава, несмотря на низкую стоимость. Это привело к тому, что лесозаготовительные предприятия, примыкающие к малым и средним рекам, оказались отрезанными от автомобильных дорог, а огромные лесные массивы были исключены из ресурсов вырубki. Перевозка лесоматериалов железнодорожным транспортом также пользуется спросом. Она позволяет транспортировать одновременно большое количество материалов. Железнодорожный транспорт зачастую комбинируется с автомобильным, в связи с чем использование сухопутного транспорта при вывозке лесоматериалов является наиболее эффективным и целесообразным в условиях нашей страны [10]. Поэтому проектирование и строительство новых лесовозных автомобильных дорог помогает не только повысить объём заготавливаемой древесины, но и освоить ранее труднодоступные регионы, богатые лесными ресурсами, развитие которых было приостановлено из-за суровых природно-климатических условий исследуемого района.

Несмотря на то, что сухопутным транспортом вывозится около 60 % всего объёма древесины, транспортная инфраструктура в основных лесных регионах слабо развита [10]. В связи с этим существует необходимость проектирования, строительства и содержания лесовозных автомобильных дорог, отвечающих основным технологическим требованиям. Так как большинство автомобильных дорог из-за воздействия различных неблагоприятных факторов подвержены деформации земляного полотна, первоочередной задачей для специалистов

становится повышение их качества и долговечности.



Рис. 1. Классификация промышленного транспорта леса

В большинстве случаев лесовозные автомобильные дороги теряют свои прочностные характеристики из-за влияния природно-климатических условий на их поверхность. Для лесозаготовительных регионов это сильное переувлажнение почв из-за повышенного уровня грунтовых вод из-за продолжительных осадков и, как следствие, возникновение паводков, селей. Влияние воды на земляное полотно всегда было одним из наиболее разрушительных природных явлений [14, 16]. Это в полной мере показало наводнение в Хабаровском крае в 2013 году, когда на 0,40-2,11 м были преодолены исторические максимумы уровней воды в Амуре и его основных притоках в результате ливневых дождей, продолжавшихся около двух месяцев. Было повреждено около 1500 км дорог, а прямой экономический ущерб составил около 88,0 млрд рублей [8].

Воздействие паводков и селей на поверхность откосов земляного полотна дороги сокращает её срок службы и приводит к преждевременному старению и деформации. Это также негативно сказывается на экономике, так как в периоды весенней и осенней распутиц происходит простой транспорта и отсутствие вывозки лесоматериалов, а реконструкция и ремонт повреждённых лесовозных автомобильных дорог также требуют времени и дополнительных затрат. В лесной промышленности около 35 % от общей протяженности лесовозных магистралей постоянного действия составляют в основном дороги с гравийным и щебёночным покрытием. При сильном переувлажнении почв и постоянном подтоплении подобные лесовозные автомобильные дороги не могут выдержать негативного

воздействия водного потока и разрушаются. Стоит отметить, что при высоте насыпи менее 1,5 м в периоды весенней и осенней распутиц при возникновении паводков используемые традиционные способы и средства укрепления земляного полотна в виде различных защитных покрытий (каменная наброска, засев трав, одерновка и др.) неэффективны. Они подвержены вымыванию и не могут полностью защитить целостность автомобильной дороги от попадания воды в грунт земляного полотна (рис. 2). Поэтому в данной ситуации выбор наиболее подходящей по технологическим требованиям района строительства конструкции защиты откосов полотна играет решающую роль в дальнейшей эксплуатации автомобильной дороги и эффективном развитии лесопромышленной отрасли.

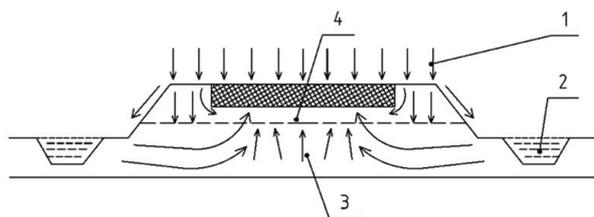


Рис. 2. Схема источников увлажнения дорожной конструкции: 1 – атмосферные осадки; 2 – вода в канавах; 3 – грунтовые воды; 4 – песчаное основание

Большое влияние на качество дорожной сети оказывает конструкция защиты откосов и поверхности земляного полотна дороги. Как и время, в течение которого автомобильная дорога подвергается воздействию паводков, используемый способ защиты земляного полотна непосредственно влияет на скорость передвижения влаги в грунтах (рис. 3).

Рассматривая скорость проникновения жидкости в грунт насыпи земляного полотна как величину переменную, выведем дифференциальное уравнение движения жидкости в пористой среде под воздействием внешних нагрузок. Предположим, что жидкость, проникающая в грунт земляного полотна автомобильной дороги, является однокомпонентной и несжимаемой [3, 4, 7, 9, 11]. При изменении давления на частицы грунта объём паводковых вод в насыпи не изменяется. При исследовании скорости проникновения жидкости в грунт насыпи используем за основу второй закон Ньюто-

на: сила, действующая на тело, равна произведению массы тела на ускорение, сообщаемое этой силой. В связи с этим уравнение течения жидкости через пласт земли можно записать так [12, 15, 17]:

$$m_b \vec{a} = \sum \vec{F}, \quad (1)$$

где m_b – масса пласта воды, пропитывающего поверхность откоса земляного полотна, кг;

\vec{a} – ускорение потока воды, м/с²;

\vec{F} – силы, действующие на поверхность откоса земляного полотна, Н.

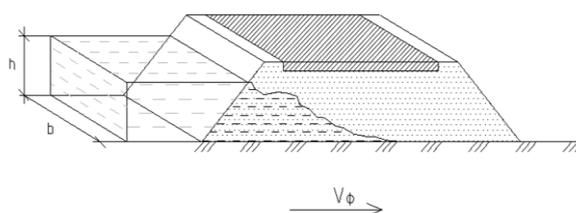


Рис. 3. Фильтрация жидкости в грунте земляного полотна под влиянием стоячей воды на поверхности откоса:

h – высота водного потока; b – ширина участка смоченной поверхности

Расписав значение ускорения потока воды, дифференциальное уравнение движения жидкости в пористой среде с течением времени в горизонтальном направлении под воздействием внешних сил станет равно

$$m \frac{dV}{dt} = \sum F, \quad (2)$$

$$m \frac{dV}{dt} = F_d \sin \alpha - F_{c.з.}, \quad (3)$$

где V – горизонтальная скорость проникновения жидкости в грунт насыпи земляного полотна с течением времени, м/с;

t – время воздействия жидкости на поверхность откоса насыпи земляного полотна, с;

F_d – сила давления жидкости на поверхность откоса насыпи земляного полотна, Н;

$F_{c.з.}$ – сила сопротивления поверхности откоса насыпи земляного полотна, Н.

Следует также учитывать, что откосы насыпи земляного полотна на исследуемом участке Гайчанской лесовозной автомобильной магистрали в Хабаровском крае были укреплены конструкцией защиты откосов земляного полотна автомобильной дороги в условиях подтоплений на основе геосин-

тетических материалов (рис. 4) [1, 5]. На основании этого уравнение движения жидкости в грунте земляного полотна (3) примет следующий вид:

$$m \frac{dV}{dt} = F_d \sin \alpha - F_{с.з.} - F_k, \quad (4)$$

где F_k – сила сопротивления конструкции защиты откосов насыпи земляного полотна при воздействии на неё воды, Н.

Сила давления жидкости на поверхность откоса насыпи земляного полотна определяется по формуле

$$F_d = \frac{\rho g H_{п.}}{2} \cdot S_k, \quad (5)$$

где g – ускорение свободного падения, м/с²;

ρ – плотность жидкости, кг/м³;

S_k – площадь контакта поверхности откоса и водного потока, м²;

α – угол заложения откоса земляного полотна, град.

Грунт насыпи земляного полотна можно представить как систему соприкасающихся между собой шаров – частиц (рис. 5). При движении воды через поры происходит обтекание шарообразных частиц грунта жидкостью, воздействующей на земляное полотно автомобильной дороги [3, 4, 6, 9, 11, 12].

Предположив, что скорость проникновения жидкости в грунт насыпи земляного полотна с течением времени скорость V вдали от шара постоянна, при обтекании одного шара вязкой жидкостью для определения силы сопротивления частицы потоку воды используем формулу Стокса [3, 6, 13, 18]

$$P' = 3\pi\mu_0 dV, \quad (5)$$

где P' – сила сопротивления частицы потоку воды, Н;

d – диаметр частицы, м;

μ_0 – динамическая вязкость флюида, Па · с.

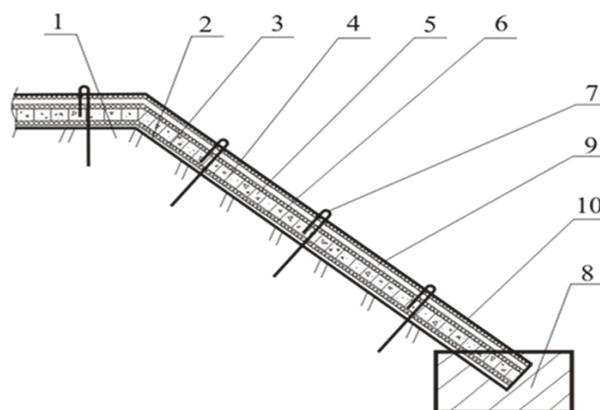


Рис. 4. Общий вид конструкции укрепления земляного полотна в условиях подтоплений: 1 – поверхность откоса; 2 – геотекстильный материал; 3 – слой гидрофобной полимерно-грунтовой смеси; 4 – геосотовый геосинтетический материал; 5 – песчано-гравийная смесь; 6 – полимерная пропитка; 7 – анкеры; 8 – бетонный упор; 9 – слой грунта; 10 – жидкий полимер

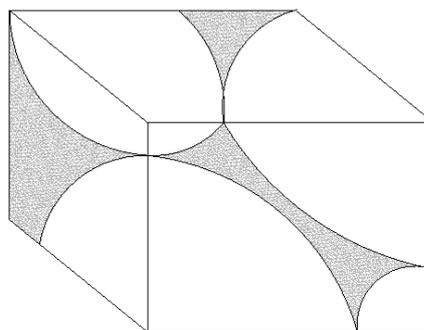


Рис. 5. Система соприкасающихся частиц грунта земляного полотна

Учитывая тот факт, что в грунте происходит обтекание не одного шара, а цепочки соприкасающихся шаров, предположим, что они находятся в канале, наружной стенкой которых является цилиндрическая поверхность, проходящая через середину слоя жидкости. Приближённая схема обтекания шаров фиктивного грунта приводит к равномерному течению вязкой жидкости в узкой области между двумя круглыми цилиндрами.

Расписав более подробно формулу (5), получим, что сопротивление одной частицы грунта земляного полотна потоку воды будет равно

$$P' = \frac{8\pi\mu_0 dV}{n_{п}^2}, \quad (6)$$

где n – просвет, характеризующий площадь прохода жидкости в самом узком месте порового канала, м².

Учитывая, что на исследуемом грунтовом пласте длиной L и площадью поперечного сечения смоченной поверхности, воздействию подвергается определённое количество частиц, их число можно найти по формуле

$$N = \frac{6(1 - m_T)}{\pi d^3} SL, \quad (7)$$

где S – площадь вертикального сечения смоченной поверхности, m^2 ;

m_T – теоретическая пористость;

L – длина пути фильтрации, м.

Площадь вертикального сечения смоченной поверхности можно найти по формуле

$$S = S_k \sin \alpha, \quad (8)$$

где S_k – площадь контакта поверхности откоса и воды, m^2 .

Следовательно, полная сила трения, возникающая при обтекании вязкой жидкостью N шарообразных частиц, находится по формуле

$$F_T = \frac{48(1 - m)\mu_0 VLS}{n_n^2 d^2}. \quad (9)$$

Сила сопротивления конструкции защиты откосов насыпи земляного полотна при воздействии на неё воды определяется по формуле

$$F_k = k_{с.к.} VS, \quad (10)$$

где $k_{с.к.}$ – коэффициент сопротивления конструкции защиты откосов насыпи земляного полотна, полученный экспериментально, $кг/(м^2с)$.

Подставив в формулу (4) выражения (5), (9) и (10), увидим, что уравнение движения жидкости в грунте земляного полотна примет вид

$$m \frac{dV}{dt} = \frac{\rho g H_n}{2} \cdot S - \frac{48(1 - m)\mu_0 VLS}{n_n^2 d^2} - k_{с.к.} VS. \quad (11)$$

Масса пласта воды, пропитывающего поверхность откоса земляного полотна, определяется по следующей формуле:

$$m = \rho SL, \quad (12)$$

где ρ – плотность жидкости, $кг/м^3$;

Подставив значение массы в формулу (11), получим

$$\rho SL \cdot \frac{dV}{dt} = \frac{\rho g H_n}{2} \cdot S - \frac{48(1 - m)\mu_0 VLS}{n_n^2 d^2} - k_{с.к.} VS. \quad (13)$$

Разделив обе части дифференциального уравнения движения жидкости на значение массы пласта воды, получим, что уравнение движения тяжёлой несжимаемой жидкости в пористых средах под воздействием внешних нагрузок примет следующий вид:

$$\frac{dV}{dt} = \frac{g H_n}{2L} - \frac{48(1 - m)\mu_0 V}{\rho n_n^2 d^2} - \frac{k_{с.к.} V}{\rho L}. \quad (14)$$

Решение этого уравнения при начальном условии $V(0)=0$ имеет вид

$$V = \frac{n_n^2 d^2 \rho g H_n}{96\mu_0 L(1 - m) + 2n_n^2 d^2 k_{с.к.}} \times \left(1 - e^{-\frac{(48\mu_0 L(1 - m) + n_n^2 d^2 k_{с.к.})t}{n_n^2 d^2 \rho L}} \right). \quad (15)$$

Отметим, что при уже небольших значениях времени t , значения скорости стабилизируются, и она принимает следующий вид:

$$V = \frac{n_n^2 d^2 \rho g H_n}{96\mu_0 L(1 - m) + 2n_n^2 d^2 k_{с.к.}}. \quad (16)$$

Таким образом, используя решение дифференциального уравнения движения тяжёлой несжимаемой жидкости в пористых средах (15) под воздействием внешних нагрузок, можно определить значение скорости проникновения жидкости в грунт насыпи земляного полотна при различных значениях пути фильтрации в любой момент времени. Зная значения скорости проникновения жидкости в грунт насыпи земляного полотна автомобильной дороги, можно подобрать наиболее действенные способы защиты откосов насыпи земляного полотна в сложных природно-климатических условиях с частым возникновением паводков и селей. Введенный в уравнение коэффициент сопротивления конструкции защиты откосов насыпи земляного полотна на основе геосинтетических материалов позволяет показать эффективность используемой конструкции защиты на исследуемом участке Гайчанской лесовозной автомобильной магистрали.

Библиографический список

1. Автомобильные дороги. Защита откосов автомобильных дорог от размыва [Текст] : обзорная информация. – М. : Росавтодор, 1992. – 84 с.
2. Першин, М. Н. Дорожное грунтоведение [Текст] / М. Н. Першин, А. М. Кулижников, В. П. Радов. – СПб., 1998. – 153 с.
3. Лейбензон, Л. С. Движения природных жидкостей и газов в пористой среде [Текст] / Л. С. Лейбензон. – М. : Государственное издательство технико-теоретической литературы, 1947. – 244 с.
4. Баренблатт, Г. И. Движение жидкостей и газов в природных пластах [Текст] / Г. И. Баренблатт, В. М. Енгов, В. М. Рыжик. – М. : Недра, 1984. – 211 с.
5. Макарова, Ю. А. Использование геосинтетических материалов для защиты откосов земляного полотна лесовозной автомобильной дороги в условиях подтоплений [Текст] / Ю. А. Макарова, А. Ю. Мануковский // Лесной журнал. – 2017. – № 3. – С. 114-122.
6. Механика насыщенных пористых сред [Текст] / В. Н. Николаевский, К. С. Басниев, А. Т. Горбунов, Г. А. Зотов. – М. : Недра, 1970. – 339 с.
7. Савельев, В. В. Мелиорация лесосплавных путей и гидротехнические сооружения [Текст] : учеб. / В. В. Савельев. – М. : Лесн. пром-сть, 1982. – 280 с.
8. Наводнение-2013 [Текст]. –Талакан, 2014. – 144 с.
9. Ольховская, В. А. Подземная гидромеханика [Текст] / В. А. Ольховская. – Самара, 2004. – 148 с.
10. Транспорт леса. В 2 т. Т. 1. Сухопутный транспорт [Текст] : учеб. / Э.О. Салминен [и др.] – М. : Академия, 2009. – 368 с.
11. Коллинз, Р. Течения жидкостей через пористые материалы [Текст] / Р. Коллинз. – М. : Мир, 1964. – 350 с.
12. Требин, Г. Ф. Фильтрация жидкостей и газов в пористых средах [Текст] / Г. Ф. Требин. – М. : Гостоптехиздат, 1959. – 160 с.
13. Wang, C. Y. Exact solutions of the steady-state Navier–Stokes equations [Text] / C. Y. Wang // Annu. Rev. Fluid Mech. – 1991. – 23 (1). – P. 159-177.
14. Bednarouk, S. Flood Prevention and Protection in Russia [Text] / S. Bednarouk, E. Ovcharov // United Nation. Seminar on Flood Prevention and Protection. Berlin, 7-8 oct. 1999. – No. 37. – P. 1-4.
15. Fluid kinematics on a deformable surface [Text] / J.-Z. Wu, Y.-T. Yang, Y.-B. Luo, C. Pozrikidis // Fluid Mech. – 2005. – 541. – P. 371-381.
16. Ward, R. Floods: A Geographical Perspective [Text] / R. Ward. – London; Basingstoke: Mac Millan Press, 1978. – 244 p.
17. Pozrikidis, C. Introduction to Theoretical and Computational Fluid Dynamics [Text] / C. Pozrikidis. – 2nd ed. – New York : Oxford University Press, Inc., 2011. – XXX, 1243 p.
18. Barraclough, D. The effect of molecular size on diffusion characteristics in soil [Text] / D. Barraclough, P. H. Nye // J. Soil Sci. – 1979. – 30(1). – P. 29-42.

References

1. *Avtomobil'nye dorogi. Zashchita otkosov avtomobil'nykh dorog ot razmyva* [Score Protection of Road Slopes]. – Moscow, 1992. – 84 p.
2. Pershin M. N. *Dorozhnoegruntovedenie* [Road soil science] / M. N. Pershin, A. M. Kulizhnikov, V. P. Radov. – St. Petersburg, 1998. – 153 p.
3. Lejbenzon L. S. *Dvizhenija prirodnyh zhidkostej i gazov v poristoj srede* [Movement of natural liquids and gases in a porous medium] / L. S. Lejbenzon. – Moscow : State Publishing House of Technical and Theoretical Literature, 1947. – 244 p.

4. Barenblatt G. I. *Dvizheniezhidkostejjgazov v prirodnyhplastah* [Movement of liquids and gases in natural formations] / G. I. Barenblatt, V. M. Entov, V. M. Ryzhik. – M. : Nedra, 1984. – 211 p.
5. Makarova Yu. A. *Ispol'zovanie geosinteticheskikh materialov dlja zashchity otkosov zemljanogo polotna lesovoznoj avtomobil'noj dorogi v uslovijah podtoplenij* [Geosynthetics for Slope Protection of the Truck Haul Road Subgrade Under Conditions of Underflooding] / Yu. A. Makarova, A. Yu. Manukovskiy // *Lesnoy zhurnal* [Forestry journal]. – 2017. – No. 3. – P. 114-122.
6. *Mehanika nasyshhennykh poristyh sred* [Mechanics of saturated porous media] / V. N. Nikolaevsky, K. S. Basniev, A. T. Gorbunov, G. A. Zotov. – Moscow : Nedra, 1970. – 339 p.
7. Savel'ev V. V. *Melioracija lesosplavnykh putej I gidrotehnicheskie sooruzhenija* [Melioration of logging tracks and hydraulic structures] : Textbook for high schools / V. V. Savel'ev. – Moscow : Lesn. Prom-st, 1982. – 280 p.
8. *Navodnenie-2013* [Flood-2013]. – Thalakan. – 2014. – 144 p.
9. Olkhovskaya V. A. *Podzemnaja gidromehanika* [Underground hydromechanics] / V. A. Olkhovskaya. – Samara: Samara State Technical University, 2004. – 148 p.
10. *Transport lesa. V dvuh tomah. Tom 1. Suhoputnyj transport: Uchebnik* [Transport of forest. In two volumes. Volume 1. Land Transport: A Textbook] / E. O. Salminen [et al.]. – Moscow : Academy, 2009. – 368 p.
11. Collins R. *Techenija zhidkостей cherez poristye materialy* [Flows of liquids through porous materials] / R. Collins. – Moscow : Mir, 1964. – 350 p.
12. Trebin G. F. *Fil'tracija zhidkостей I gazov v poristyh sredah* [Filtration of liquids and gases in porous media] / G. F. Trebin. – Moscow : Gostoptekhizdat, 1959. – 160 p.
13. Wang C. Y. Exact solutions of the steady-state Navier–Stokes equations / C. Y. Wang // *Annu. Rev. Fluid Mech.* – 1991. – 23 (1). – P. 159-177.
14. Bednarouk S. Flood Prevention and Protection in Russia / S. Bednarouk, E. Ovcharov // United Nation. Seminar on Flood Prevention and Protection. Berlin, 7-8 oct. 1999. – No. 37. – P. 1-4.
15. Fluid kinematics on a deformable surface / J.-Z. Wu, Y.-T. Yang, Y.-B. Luo, C. Pozrikidis // *Fluid Mech.* – 2005. – 541. – P. 371-381.
16. Ward R. *Floods: A Geographical Perspective* / R. Ward. – London; Basingstoke: Mac Millan Press, 1978. – 244 p.
17. Pozrikidis C. *Introduction to Theoretical and Computational Fluid Dynamics* / C. Pozrikidis. – 2nd ed. – New York : Oxford University Press, Inc., 2011. – XXX, 1243 p.
18. Barraclough D. The effect of molecular size on diffusion characteristics in soil / D. Barraclough, P. H. Nye // *J. Soil Sci.* – 1979. – 30(1). – P. 29-42.

Сведения об авторе

Макарова Юлия Александровна – аспирант кафедры промышленного транспорта, строительства и геодезии ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», г. Воронеж, Российская Федерация; e-mail: juliamja@mail.ru

Information about the author

Makarova Julia Aleksandrovna – Graduate student of department of the of industrial transport, construction and geodesy of Federal State Budget Educational Institution of Higher Education "Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov", Voronezh, Russian Federation; e-mail: juliamja@mail.ru