



**№19 (3)**

ISSN 2307-0048

# **Resources and Technology**

**научный журнал**

**2022**

**Министерство науки и высшего образования Российской Федерации**

# **Resources and Technology**

## **№19 (3)**

Сетевое издание зарегистрировано в Федеральной службе по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций.

Свидетельство о регистрации средства массовой информации ЭЛ № ФС 77 - 57768 от 18.04.2014.

Учредитель – ФГБОУ ВО Петрозаводский государственный университет.

Адрес электронной почты журнала: [rt@petsu.ru](mailto:rt@petsu.ru). Номер телефона: 8 (8142) 76-97-11.

**Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation**

# **Resources and Technology**

## **№19 (3)**

Mass media registration certificate #ФC77-57768 (18/04/2014).

Founder: Petrozavodsk State University.

E-mail: [rt@petsu.ru](mailto:rt@petsu.ru). Phone number: 8 (8142) 76-97-11.

## **Редакционная коллегия:**

### **Главный редактор:**

**Васильев Сергей Борисович** (Россия) доктор технических наук, профессор, *servas@psu.karelia.ru*.

### **Заместитель главного редактора:**

**Колесников Геннадий Николаевич** (Россия) доктор технических наук, профессор, *kgn@psu.karelia.ru*.

**Тихонов Евгений Андриянович** (Россия) кандидат технических наук, доцент, *tihonov@psu.karelia.ru*.

## **Редакционный совет:**

**Гаврилова Ольга Ивановна** (Россия) доктор сельскохозяйственных наук, профессор, *ogavril@mail.ru*.

**Добрынина Оксана Леонидовна** (Россия) Кандидат педагогических наук, доцент, *oksdobr@mail.ru*.

**Григорьев Игорь Владиславович** (Россия) Доктор технических наук, профессор, *silver73@inbox.ru*.

**Карвинен Сари** (Финляндия) Магистр естественных наук, *sari.karvinen@metla.fi*.

**Левин Валерий Михайлович** (Мексика) Доктор физико-математических наук, профессор, *vlevine@imp.mx*.

**Ледницкий Андрей Викентьевич** (Республика Беларусь) Кандидат экономических наук, доцент, *ledniz@inbox.ru*.

**Мануковский Андрей Юрьевич** (Россия) Доктор технических наук, профессор, *mayu1964@mail.ru*.

**Мельник Пётр Григорьевич** (Россия) Кандидат сельскохозяйственных наук, доцент, *melnik\_petr@bk.ru*.

**Саастамойнен Олли** (Финляндия) Доктор наук, *olli.saastamoinen@uef.fi*.

**Саливоник Александр Владимирович** (Россия) Кандидат технических наук, *salivonik@rambler.ru*.

**Сюнёв Владимир Сергеевич** (Россия) Доктор технических наук, профессор, *siounev@psu.karelia.ru*.

## **Editorial staff:**

### **Editor-in-chief:**

**Prof. Dr. Vasilyev, Sergey** (Russia), *servas@psu.karelia.ru*.

### **Deputy editor:**

**Prof. Dr. Kolesnikov, Gennady** (Russia), *kgn@psu.karelia.ru*.

**Prof. Dr. Tikhonov, Eugeny** (Russia), *tihonov@psu.karelia.ru*.

## **Editorial board:**

**Prof. Dr. Gavrilova, Olga I.** (Russia), *ogavril@mail.ru*.

**Dr. Dobrinina, Oksana** (Russia), *oksdobr@mail.ru*.

**Prof. Dr. Grigoryev, Igor** (Russia), *silver73@inbox.ru*.

**M. Sc. Karvinen, Sari** (Finland), *sari.karvinen@metla.fi*.

**Prof. Dr. Levin, Valery** (Mexico), *vlevine@imp.mx*.

**Prof. Dr. Lednitskij, Andrej** (Belarus), *ledniz@inbox.ru*.

**Prof. Dr. Manukovsky, Andrey** (Russia), *mayu1964@mail.ru*.

**Dr. Melnik, Petr** (Russia), *melnik\_petr@bk.ru*.

**Prof. Emeritus, Dr. Sc., Saastamoinen Olli** (Finland), *olli.saastamoinen@uef.fi*.

**Prof. Dr. Salivonik, Alexander** (Russia), *salivonik@rambler.ru*.

**Prof. Dr. Syunev, Vladimir** (Russia), *siounev@psu.karelia.ru*.

## Содержание №3, Т. 19, 2022

<i>До Т. А., Григорьев Г. В., Каляшов В. А., Гурьев А. Ю., Григорьева О. И., Хитров Е. Г.</i>	Теоретические исследования работы лесных машин с гусеничным двигателем на склонах	1 - 29
<i>Сапелкин Р. С., Меерсон В. Э., Меерсон М. В., Скрыпников А. В., Казачек М. Н.</i>	Особенности районов строительства лесовозных автомобильных дорог	30 - 43
<i>Беляев А. Н., Тришина Т. В., Афоничев Д. Н.</i>	Анализ боковых реакций почвы на колесах трактора при повороте	44 - 56
<i>Ильюшенко Д. А., Локштанов Б. М., Орлов В. В., Куницкая О. А., Пелюхов Р. В., Швецова В. В.</i>	Математическое описание процесса движения сыпучего материала в горизонтальных барабанах непрерывного действия	57 - 68
<i>Тихомиров П. В., Скрыпников А. В., Козлов В. Г., Тверитнев О. Н., Григорьев И. В.</i>	Методика последовательного анализа и определения стандартов отклонений от проектных параметров лесовозных автомобильных дорог	69 - 82
<i>Беляев С. В., Левина М. С.</i>	Проблемы и перспективы получения и применения топлив из биомассы, снижающих выбросы парниковых газов	83 - 100
<i>Графова Е. О., Сюнёв В. С.</i>	Сравнительный анализ трёх вариантов рекультивации загрязнённых лесных территорий	101 - 123

## Content №3, Vol. 19, 2022

<i>Do T. A., Grigorev G., Kalyashov V., Gurjev A., Grigoreva O., Khitrov Y.</i>	Theoretical studies of forest machines with a tracked mover on slopes	1 - 29
<i>Sapelkin R. S., Meerson V. E., Meerson M. V., Skrypnikov A. V., Kazachek M. N.</i>	Features of regions for forest roads construction	30 - 43
<i>Belyaev A. N., Trishina T. V., Afonichev D. N.</i>	Analysis of lateral reactions of soil on tractor wheels when turning	44 - 56
<i>Il'yushenko D., Lokshtanov B., Orlov V., Kunickaya O., Pelyukhov R., SHvecova V.</i>	Mathematical description of the process of bulk material movement in horizontal continuous drums	57 - 68
<i>Tikhomirov P. V., Skrypnikov A. V., Kozlov V. G., Tveritnev O. N., Grigoriev I. V.</i>	The method of sequential analysis and determination of standards of deviations from the design parameters of logging roads	69 - 82
<i>Belyaev S., Levina M.</i>	Problems and prospects of obtaining and using biomass fuels that reduce greenhouse gas emissions	83 - 100
<i>Grafova E., Syuney V.</i>	Comparative analysis of three options for reclamation of polluted forest areas	101 - 123

УДК 674.81

DOI: 10.15393/j2.art.2022.6183

Статья

## Теоретические исследования работы лесных машин с гусеничным двигателем на склонах

**До Туан Ань**

*преподаватель, Вьетнамский национальный университет лесного хозяйства (Социалистическая Республика Вьетнам), [anhdo.dhln@gmail.com](mailto:anhdo.dhln@gmail.com)*

**Григорьев Глеб Владимирович**

*кандидат технических наук, доцент, Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет им. С. М. Кирова (Российская Федерация), [vil-lta@mail.ru](mailto:vil-lta@mail.ru)*

**Каляшов Виталий Анатольевич**

*кандидат технических наук, доцент, Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет (Российская Федерация), [vit832@yandex.ru](mailto:vit832@yandex.ru)*

**Гурьев Александр Юрьевич**

*аспирант, Арктический государственный агротехнологический университет (Российская Федерация), [sashafuryjager96@gmail.com](mailto:sashafuryjager96@gmail.com)*

**Григорьева Ольга Ивановна**

*кандидат сельскохозяйственных наук, доцент, Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет им. С. М. Кирова (Российская Федерация), [grigoreva\\_o@list.ru](mailto:grigoreva_o@list.ru)*

**Хитров Егор Германович**

*доктор технических наук, доцент, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (Российская Федерация), [yegorkhitrov@gmail.com](mailto:yegorkhitrov@gmail.com)*

*Получена: 28 февраля 2022 / Принята: 9 сентября 2022 / Опубликовано: 15 сентября 2022*

---

**Аннотация:** Во многих странах мира достаточно большие запасы лесных ресурсов находятся на горных склонах. Работы по заготовке древесины в условиях горных лесосек существенно снижают производительность и повышают риски для людей и техники. Во многих индустриально развитых странах мира преобладают машинные способы заготовки древесины, включая освоение лесов на горных склонах. Колёсные лесные машины, работающие на горных склонах, прежде всего, оснащаются специальными гусеницами. Необходимо учитывать, что экосистемы горных лесов являются очень ранимыми, при неправильном проведении работ,



избыточном негативном воздействии на почвогрунт на них могут возникать и быстро развиваться процессы водной и ветровой эрозии. Особенно опасным для экосистем лесов на склонах является процесс образования колеи под воздействием движителей лесных машин. Именно колея волока служит концентратором водной и часто ветровой эрозии. Кроме того, превышение несущей способности почвогрунта может приводить к возникновению оползней, соскальзыванию машины по склону. В статье представлено теоретическое обоснование допустимого среднего давления движителя работающей на склоне лесной машины на почвогрунт при ограничении глубины образующейся колеи. Кроме того, получены новые зависимости, позволяющие на практике, без итераций, рассчитать: несущую способность почвогрунта, находящегося под воздействием гусеничного движителя, в зависимости от физико-механических свойств почвогрунта с учётом угла склона; глубину колеи, образующейся под воздействием гусеничного движителя лесной машины, работающей на склоне; допустимое среднее давление гусеничного движителя на почвогрунт, ограниченное глубиной образующейся колеи; коэффициент сопротивления движению гусеничной машины, движущейся вдоль склона; коэффициент сцепления гусеничного движителя с грунтовой поверхностью с учётом ослабления почвогрунта при срезе.

**Ключевые слова:** горные леса, леса на склонах, лесосечные работы, лебёдки, трелёвка, почвогрунты

---

DOI: 10.15393/j2.art.2022.6183

Article

## Theoretical studies of forest machines with a tracked mover on slopes

**Do Tuan An'**

*Lecturer, Vietnam National University of Forestry (Socialist Republic of Vietnam),  
anhdo.dhln@gmail.com*

**Gleb Grigorev**

*Ph. D. in engineering, associate professor, St. Petersburg State Forest Engineering University named after S. M. Kirov (Russian Federation), vtl-lta@mail.ru*

**Vitalij Kalyashov**

*Ph. D. in engineering, associate professor, St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (Russian Federation), vit832@yandex.ru*

**Aleksandr Gur'ev**

*Ph. D. student, Arctic State Agrotechnological University (Russian Federation),  
sashafuryjager96@gmail.com*

**Olga Grigoreva**

*Ph. D. in agriculture, associate professor, St. Petersburg State Forest Engineering University named after S. M. Kirov (Russian Federation), grigoreva\_o@list.ru*

**Egor Khitrov**

*D. Sc. in engineering, associate professor, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (Russian Federation), yegorkhitrov@gmail.com*

*Received: 28 February 2022 / Accepted: 9 September 2022 / Published: 15 September 2022*

---

**Abstract:** In many countries around the world quite large reserves of forest resources are located on mountain slopes. Logging operations in mountainous areas significantly reduce productivity and increase risks for people and machinery. In many industrialized countries of the world machine logging methods dominate including harvesting operations on mountain slopes. Wheeled forest machines operating on mountain slopes are primarily equipped with special tracks. Ecosystems of mountainous forests are very vulnerable and violation of standard operations might result in excessive negative impact on soil, water and wind erosion processes. Especially dangerous for forest ecosystems on slopes is the process of rut formation under the influence of forest machine track driver. It is the track ruts that are concentrators of water and wind erosion. Besides, exceeding the

load bearing capacity of the soil might lead to landslides and sliding of the machine down the slope. The article presents theoretical substantiation of permissible average pressure of the forest machine mover on a slope when the depth of the formed rut is limited. The authors present new dependences allowing in practice, without iterations, to calculate: the bearing capacity of the soil under the influence of the track mover, depending on the physical and mechanical properties of the soil. They take into account the angle of the slope; the depth of the rut formed under the influence of the track mover of the forest machine operating on the slope; admissible average pressure of a track vehicle on the subsoil, limited by the depth of the rut formed; coefficient of resistance to movement of a track vehicle moving along a slope; coefficient of traction of a track vehicle with the subsoil surface taking into account sliced subsoil weakening.

**Keywords:** Mountain forests, forests on slopes, logging, winches, skidding, soils

---

## 1. Введение

Проблема повышения эффективности лесосечных работ складывается из экономических и экологических показателей. Экономические показатели считаются хорошими при достижении возможного минимума себестоимости заготовленной древесины, т. е. минимизации затрат на подготовительные, вспомогательные и основные работы, объём которых во многом зависит от принятой системы машин, режима их работы, технологического процесса и схемы разработки лесосеки [1—5].

Экологические показатели лесосечных работ считаются хорошими при достижении возможного минимума отрицательного воздействия на лесную экосистему и, соответственно, при достижении минимума затрат на последующее лесовосстановление. При этом степень отрицательного воздействия лесосечных работ на лесную экосистему также во многом зависит от принятой системы машин, режима их работы, технологического процесса и схемы разработки лесосеки [6—10].

Во многих странах мира для освоения запасов древесины в эксплуатационных лесах на крутых склонах были разработаны многочисленные системы машин, включая различные средства воздушного транспорта (легче и тяжелее воздуха), различные системы канатных трелёвочных установок (лесных кранов), самоходные лебёдки, лесные машины с интегрированными в их трансмиссию лебёдками.

В других странах мира (например, США, Япония, Новая Зеландия, Австрия) выпускается широкая линейка техники для работы в горных лесах. Каждый вариант этой техники имеет свои достоинства и недостатки.

Одним из наиболее распространённых в России вариантов при машинной заготовке древесины на склонах является использование лесных машин, оснащённых встроенными в трансмиссию лебёдками. Такой вариант позволяет лесной машине намного эффективнее работать на крутых склонах, но утяжеляет машину конструктивно и значительно удорожает. Кроме этого, недостатками такого варианта являются негативное воздействие движителей лесных машин на почвогрунты [11—13], а также то, что при смене дислокации машины, например переходе на разработку равнинных лесосек, снять эту лебёдку нельзя, машина работает с дополнительным весом технологического оборудования и, соответственно, с дополнительным расходом топлива на перемещение.

## 2. Материалы и методы

Использованы справочные данные о физико-механических свойствах лесных почвогрунтов. Математические модели предложены на основе положений механики грунтов и теории движения автомобильного транспорта в условиях бездорожья. При получении итоговых зависимостей использованы методы аппроксимации численных данных.

### 3. Результаты

#### 3.1. Влияние угла склона на несущую способность почвогрунта

С точки зрения воздействия движителя на грунт и его тягово-цепных свойств работа лесных машинах на пересечённой местности и склонах связана с отклонением вектора результирующей нагрузки от нормали к опорной поверхности [14]. Это явление, в свою очередь, вызывает снижение несущей способности грунтового основания под воздействием движителя [15], [16]. Вначале рассмотрим вопрос о количественной оценке данного снижения.

Известно, что несущая способность грунтового основания под воздействием движителя определяется по формуле [16]

$$p_s = p_{s0} \alpha, \quad (1)$$

где  $p_{s0}$  — несущая способность грунтового основания без учёта глубины распространения деформаций,  $\alpha$  — коэффициент учёта глубины распространения деформаций в грунтовом основании.

Несущая способность грунтового основания без глубины распространения деформаций оценивается по уравнению [16]

$$p_{s0} = 0,5J_1B_1N_1b\gamma + N_2\gamma h + J_3B_3N_3C, \quad (2)$$

где  $\gamma$  — удельный вес грунта,  $C$  — удельное сцепление частиц грунтового основания,  $h$  — глубина колеи, образовавшейся под воздействием движителя (здесь учтено постепенное «укрепление» грунта по мере уплотнения),  $J_1$ ,  $J_3$  — коэффициенты, учитывающие соотношение сторон пятна контакта с грунтовым основанием [15], [16]:

$$J_1 = \frac{l}{l + 0,4b}, \quad J_3 = \frac{l + b}{l + 0,5b}, \quad (3)$$

где  $l$  — средняя длина пятна контакта,  $b$  — средняя ширина пятна контакта,  $N_1$ ,  $N_2$ ,  $N_3$  — коэффициенты, учитывающие влияние угла внутреннего трения частиц грунтового основания на его несущую способность [15], [16]:

$$N_1 = \frac{1 - \text{III}^4}{\text{III}^5}, \quad N_2 = \frac{1}{\text{III}^2}, \quad N_3 = \frac{2 \cdot (1 + \text{III}^2)}{\text{III}^3}, \quad \text{III} = \text{tg} \frac{\pi - 2\varphi}{4}, \quad (4)$$

$B_1$ ,  $B_2$  — коэффициенты, учитывающие влияние отклонения вектора результирующей нагрузки от нормали к опорной поверхности на несущую способность [15], [16]:

$$B_1 = \frac{\pi - 4\beta \text{tg} \varphi}{\pi + 4\beta \text{tg} \varphi}, \quad B_3 = \frac{3\pi - 2\beta}{3\pi + 2\beta}, \quad (5)$$

где  $\beta$  — угол отклонения вектора результирующей нагрузки от нормали к опорной поверхности.

Известно уравнение для расчёта коэффициента учёта глубины распространения деформаций в грунтовом основании [16]:

$$\alpha = 1 + \frac{0,5hH^*}{H \cdot (H - h - 0,25H^* \exp(-0,1|\beta|))}, \quad (6)$$

где  $H$  — глубина распространения деформаций в грунтовом основании,  $H^*$  — вспомогательное обозначение [16]:

$$H^* = \frac{\sqrt{2}}{2} b \operatorname{tg} \varphi \cos \frac{3\varphi}{4} \exp\left(\left(\frac{\pi}{4} + \frac{3\varphi}{4}\right) \operatorname{tg} \frac{3\varphi}{4}\right), \quad (7)$$

Расчёты показывают, что отклонение вектора от нормали приводит к существенному снижению несущей способности грунта под воздействием движителя, что особо ярко выражено на несвязных грунтах (песках), где несущая способность при  $\beta = 30^\circ$  снижается практически в два раза по сравнению с  $\beta = 0^\circ$ .

Формулы (1)–(7) неоднократно проверены экспериментально и позволяют получить оценку несущей способности, хорошо согласующуюся с практическими результатами в области изучения проходимости лесных машин. Однако их использование в математических моделях связано со сложностями в проведении расчётов, с усложнением алгоритмов и программ для численного решения уравнений для оценки глубины колеи и тягово-сцепных свойств движителей лесных машин, что сужает область их практического применения при обосновании параметров и режимов работы движителей гусеничных машин, отвечающих условиям нашего исследования. Решим задачу о получении приближения оценки несущей способности основания, для этого осуществим вычислительный эксперимент. Выявим факторы, оказывающие наиболее существенное влияние на несущую способность грунта, с целью получить приближенные зависимости, пригодные для практического использования.

Введём обозначения:

$$q_s = p_s(\beta)|_{\beta=0}, \quad (8)$$

$$\delta_\beta = \frac{p_s(\beta)|_{\beta=\text{var}}}{p_s(\beta)|_{\beta=0}} \quad (9)$$

и получим функцию несущей способности в виде:

$$p_s = q_s \delta_\beta. \quad (10)$$

Результаты расчётов несущей способности  $q_s$  без учёта уклона получены при случайных равномерно распределённых величинах:  $C = 0,005 \text{ МПа} \dots 0,05 \text{ МПа}$ ,  $\varphi = 5^\circ \dots 30^\circ$ ,  $\gamma = 0,015 \text{ МН/м}^3 \dots 0,025 \text{ МН/м}^3$ ,  $b = 0,4 \text{ м} \dots 0,7 \text{ м}$ ,  $\beta = 0^\circ$ ,  $h = 0,01 \text{ м} \dots 0,39 \text{ м}$ ,  $H = 2b$ ,  $l = 5b$  (1000 сочетаний). В результате аппроксимации результатов расчётов при помощи метода наименьших квадратов получено уравнение, позволяющее определить  $q_s$  практически функционально точно ( $R^2 > 0,98$ ):

$$q_s = 5,22C + \frac{109C + 1,5B}{10000} \varphi^2. \quad (11)$$

Аналогично выполнены расчёты и оценка коэффициента  $\delta_s$ , учитывающего снижение несущей способности при отклонении вектора нагрузки от нормали к опорной поверхности. Данные получены при  $C = 0,005 \text{ МПа} \dots 0,05 \text{ МПа}$ ,  $\varphi = 5^\circ \dots 30^\circ$ ,  $\gamma = 0,015 \text{ МН/м}^3 \dots 0,025 \text{ МН/м}^3$ ,  $b = 0,4 \text{ м} \dots 0,7 \text{ м}$ ,  $\beta = 1^\circ \dots 30^\circ$ ,  $h = 0,01 \text{ м} \dots 0,39 \text{ м}$ ,  $H = 2b/\cos\beta$ ,  $l = 5b$ . В результате аппроксимации результатов расчётов получено уравнение, позволяющее определить  $\delta_\beta$  практически функционально точно ( $R^2 > 0,98$ ):

$$\delta_\beta = 1 - \frac{56 + \varphi}{10000} \beta. \quad (12)$$

Таким образом, на основе выражений (10)—(12) получим формулу, позволяющую на практике рассчитать несущую способность грунта под воздействием гусеничного движителя с учётом отклонения вектора результирующей нагрузки:

$$p_s = \left( 5,22C + \frac{109C + 1,5B}{10000} \varphi^2 \right) \cdot \left( 1 - \frac{56 + \varphi}{10000} \beta \right). \quad (13)$$

Полученное уравнение (13) используем при разработке математической модели для расчёта тягово-цепных свойств гусеничного движителя, работающего на склоне.

### 3.2. Обоснование допустимого среднего давления движителя на почвогрунт при ограничении глубины образующейся колеи

Известно уравнение для расчёта глубины колеи, образующейся под воздействием движителя [17], [18]:

$$h = \frac{p_s}{p_s - p} \cdot \frac{Jpab}{E \sqrt{1 - \frac{Jp}{E}}} \operatorname{arctg} \frac{H - h}{ab \sqrt{1 - \frac{Jp}{E}}}, \quad (14)$$

где  $p$  — среднее давление движителя по пятну контакта,  $E$  — модуль общей деформации грунтового основания,  $J$  — коэффициент, учитывающий соотношение сторон пятна контакта,  $a$  — коэффициент, учитывающий глубину распространения деформаций в грунтовом основании.

Уравнение (14) сложно в использовании на практике, поскольку его решение возможно лишь итерационным путём. Зададимся целью получить упрощённую зависимость, позволяющую определить глубину колеи  $h$ .

Введём обозначения:

$$A = \frac{p_s}{p_s - p} \cdot \frac{Jpab}{E \sqrt{1 - \frac{Jp}{E}}}, \quad (15)$$

$$C = ab \sqrt{1 - \frac{Jp}{E}} \quad (16)$$

и исследуем правую часть уравнения (14):

$$f(h) = A \operatorname{arctg} \frac{H - h}{C}. \quad (17)$$

Приближим функцию  $f(h)$  методом интерполяции:

$$f(h) \approx g(h), \quad (18)$$

причём

$$g(h) = \sum_{i=0}^n a_i h^i, \quad (19)$$

где  $a_i$  — числовые коэффициенты,  $n$  — степень интерполяционного полинома.

Примем  $n = 2$ , тогда

$$g(h) = a_0 + a_1 h + a_2 h^2. \quad (20)$$

По условию интерполяции имеет место равенство

$$g(h_i) = A \operatorname{arctg} \frac{H - h_i}{C}, \quad (21)$$

следовательно, с учётом формулы (20) запишем:

$$a_0 + a_1 h_i + a_2 h_i^2 = A \operatorname{arctg} \frac{H - h_i}{C}. \quad (22)$$

Примем узлы интерполяции:  $h_0 = 0$ ,  $h_1 = H/2$ ,  $h_2 = H$ , тогда

$$\begin{cases} a_0 = A \operatorname{arctg} \frac{H}{C} \\ a_0 + a_1 \frac{H}{2} = A \operatorname{arctg} \frac{H}{2C} \\ a_0 + a_1 \frac{H}{2} + a_2 \frac{H^2}{4} = 0 \end{cases} \quad (23)$$

Решая систему уравнений (23) относительно  $a_0$ ,  $a_1$ ,  $a_2$ , получим:



$$\begin{cases} a_0 = A \operatorname{arctg} \frac{H}{C} \\ a_1 = \frac{A \left( 4 \operatorname{arctg} \frac{H}{2C} - 3 \operatorname{arctg} \frac{H}{C} \right)}{H} \\ a_2 = - \frac{2A \left( 2 \operatorname{arctg} \frac{H}{2C} - \operatorname{arctg} \frac{H}{C} \right)}{H^2} \end{cases} \quad (24)$$

После подстановки формулы (2.23) в выражения (2.16), (2.17), (2.19) получим уравнение

$$h = A \operatorname{arctg} \frac{H}{C} + \frac{A \left( 4 \operatorname{arctg} \frac{H}{2C} - 3 \operatorname{arctg} \frac{H}{C} \right)}{H} h - \frac{2A \left( 2 \operatorname{arctg} \frac{H}{2C} - \operatorname{arctg} \frac{H}{C} \right)}{H^2} h^2, \quad (25)$$

имеющее два действительных корня, из которых физическому смыслу решаемой задачи ( $h \geq 0$  м) удовлетворяет следующий:

$$h = \frac{H \left( H + A \left( 3 \operatorname{arctg} \frac{H}{C} - 4 \operatorname{arctg} \frac{H}{2C} \right) - \sqrt{\left( H + A \left( \operatorname{arctg} \frac{H}{C} - 4 \operatorname{arctg} \frac{H}{2C} \right) \right)^2 + 4HA \operatorname{arctg} \frac{H}{C}} \right)}{4A \left( \operatorname{arctg} \frac{H}{C} - 2 \operatorname{arctg} \frac{H}{2C} \right)}. \quad (26)$$

Более компактную запись (26) получим в виде:

$$h = \frac{H \left( H + A(3x_1 - 4x_2) - \sqrt{(H + A(x_1 - 4x_2))^2 + 4H Ax_1} \right)}{4A(x_1 - 2x_2)}, \quad (27)$$

где обозначено:

$$x_1 = \operatorname{arctg} \frac{H}{ab \sqrt{1 - \frac{Jp}{E}}}, \quad x_2 = \operatorname{arctg} \frac{H}{2ab \sqrt{1 - \frac{Jp}{E}}}, \quad A = \frac{p_s}{p_s - p} \cdot \frac{Jpab}{E \sqrt{1 - \frac{Jp}{E}}} \quad (28)$$

Следует отметить, что при неограниченной толщине деформируемого слоя (для слабонесущих почвогрунтов) из формулы (27) следует оценка:

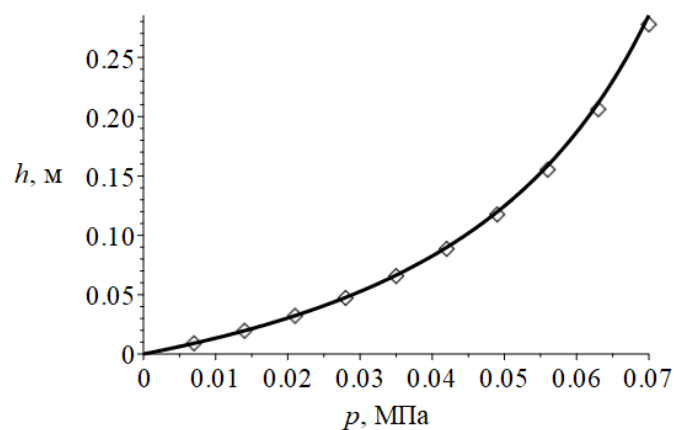
$$h_m = \lim_{H \rightarrow \infty} h = Ax_1 = \frac{p_s}{p_s - p} \cdot \frac{Jpab}{2E \sqrt{1 - \frac{Jp}{E}}} \quad (29)$$

Для завершения формирования математической модели, позволяющей рассчитать глубину колеи, образующейся под воздействием гусеничного движителя, работающего на склоне, приведём уравнения для расчёта параметров  $J, a$  [15], [16]:

$$J = \frac{0,03 + \frac{l}{b}}{0,6 + 0,43 \frac{l}{b}} \quad (30)$$

$$a = 0,64 \frac{H + b}{H} \quad (31)$$

Значения глубины колеи, полученные по предлагаемому уравнению (27), сопоставлены с результатами решения уравнения (14) на рисунке 1 (расчёт выполнен при  $E = 1$  МПа,  $p_s = 0,1$  МПа,  $b = 0,6$  м,  $\beta = 15^\circ$ ,  $H = 2b/\cos\beta$ ,  $l = 5b$ ).



**Рисунок 1.** Сопоставление результатов решения уравнения (14) (маркеры) и значений глубины колеи по предлагаемому уравнению (27) (сплошная линия)

**Figure 1.** Comparison of the results of equation (14) solution (markers) and the rut depth values according to the proposed equation (27) (solid line)

График показывает хорошую сходимость результатов, полученных по уравнению (14), апробированному ранее, и по предлагаемому уравнению (27). При изменении исходных данных к решению в пределах, характерных для гусеничных лесных машин, сходимость аналогична.

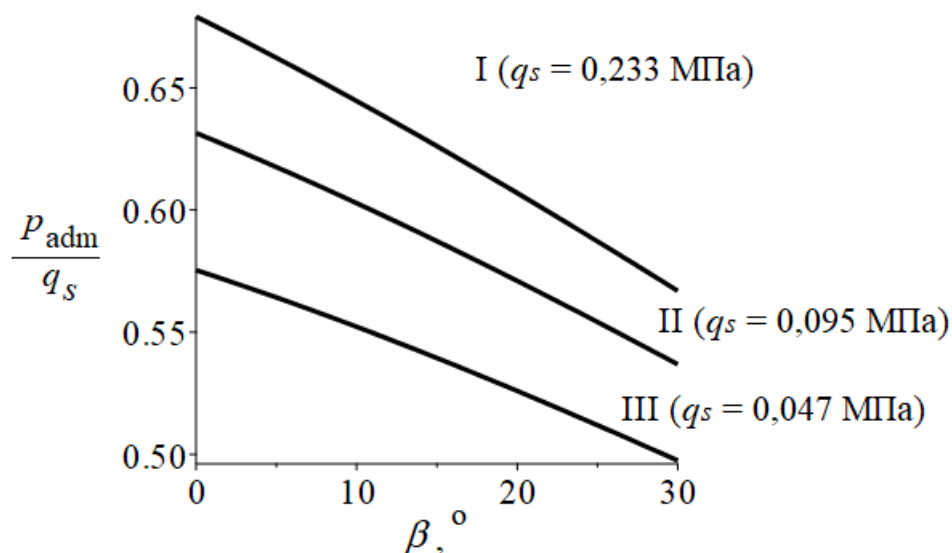
Для обоснования параметров движителей гусеничных лесных машин, обеспечивающих надёжную работу техники на склонах, вначале примем критерий допустимой глубины колеи. Известны результаты исследований, показывающие, что глубина колеи свыше 0,2 м неприемлема с точки зрения экологического воздействия на почвогрунт, кроме того, при колее свыше 0,2 м существенно снижаются показатели проходимости техники. Выполним расчёт давления  $p = p_{adm}$ , при котором расчётное значение глубины колеи  $h$  по формуле (27) не превысит 0,2 м. Угол склона оставим переменной величиной  $\beta = var$ , прочие параметры для расчёта:  $b = 0,6$  м,  $l = 5b$ ,  $H = 2b/\cos\beta$ . Рассмотрим три категории прочности почвогрунта, физико-механические свойства которых изменяются в соответствии с данными таблицы 1.

**Таблица 1.** Физико-механические свойства почвогрунта по категориям прочности [17—22]

**Table 1.** Physical and mechanical properties of the soil by strength categories [17—22]

Параметры	Категории прочности		
	III (слабый)	II (средней прочности)	I (прочный)
$E$ , МПа	0,4	1	3
$G$ , МПа	0,74	1,99	6,53
$C$ , кПа	0,005	0,012	0,024
$\varphi$ , °	11	15	16
$q_{s2}$ , МПа	0,047	0,095	0,233

На рисунке 2 проиллюстрировано соотношение допустимого среднего давления гусеничного движителя, ограниченного глубиной колеи 0,2 м, и несущей способности почвогрунта в зависимости от угла наклона опорной поверхности.



**Рисунок 2.** Соотношение допустимого среднего давления гусеничного движителя, ограниченного глубиной колеи 0,2 м, и несущей способности почвогрунта в зависимости от угла наклона

**Figure 2.** Ratio of the permissible average pressure of the track mover, limited by the rut depth of 0.2 m, and the bearing capacity of the soil, depending on the inclination angle

Поскольку в общем случае угол наклона опорной поверхности является переменной величиной на участке, где работает лесная техника, следует задаться его верхней оценкой. Исходя из рекомендаций производителей, ограничивающих максимальный наклон

поверхности движения машин, примем предельно допустимое значение  $\beta = 30^\circ$ . Тогда получим оценки среднего давления гусеничного движителя, допустимого по критерию глубины образующейся колеи, представленные в таблице 2.

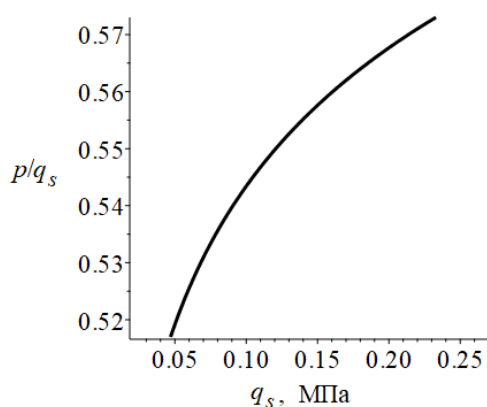
**Таблица 2.** Среднее давление гусеничного движителя, допустимое по критерию глубины образующейся колеи на склоне  $30^\circ$

**Table 2.** Average pressure of the track mover, admissible according to the criterion of the depth of the formed rut on a slope of  $30^\circ$

Показатель	Категория прочности почвогрунта		
	III (слабый)	II (средней прочности)	I (прочный)
Допустимое среднее давление $p_{adm}$ , МПа	0,024	0,051	0,132
Несущая способность грунта $q_s$ , МПа	0,047	0,095	0,233
Соотношение давления и несущей способности $p_{adm}/q_s$	0,51	0,54	0,57

В случае, если задаётся количественная характеристика прочности почвогрунта (несущая способность  $q_s$ ), среднее давление гусеничного движителя, допустимое по глубине колеи, можно оценить при помощи графика, построенного на основе данных таблицы 2 (рисунок 3), либо рассчитать по формуле, полученной в результате аппроксимации табличных данных:

$$p_{adm} = q_s \cdot (0,642 + 0,035 \ln q_s). \quad (32)$$



**Рисунок 3.** Среднее давление гусеничного движителя, допустимое по критерию глубины образующейся колеи на склоне  $30^\circ$

**Figure 3.** Average pressure of the track mover, admissible according to the criterion of the depth of the formed rut on a slope of  $30^\circ$

### 3.3. Оценка тягово-цепных свойств движителя гусеничной машины, работающей на склоне

Применим полученные уравнения и оценки допустимого среднего давления при расчёте тягово-цепных свойств движителей гусеничных машин.

Сила сопротивления движению машины, возникающая со стороны деформируемого грунта, определяется по уравнению [15—17], [23]

$$F_R = b \int_0^h p(h)dh. \quad (33)$$

Для расчёта определённого интеграла в выражении (33) понадобится аналитическая зависимость  $p(h)$ , что неудобно с точки зрения математических преобразований (выразить  $p$  через  $h$  по формулам (14), (27) затруднительно). Выполним замену [17], [23]:

$$b \int_0^h p(h)dh = bhp - b \int_0^p h(p)dh, \quad (34)$$

что позволит использовать уже имеющуюся зависимость (27) для расчёта  $F_R$  [17], [18]:

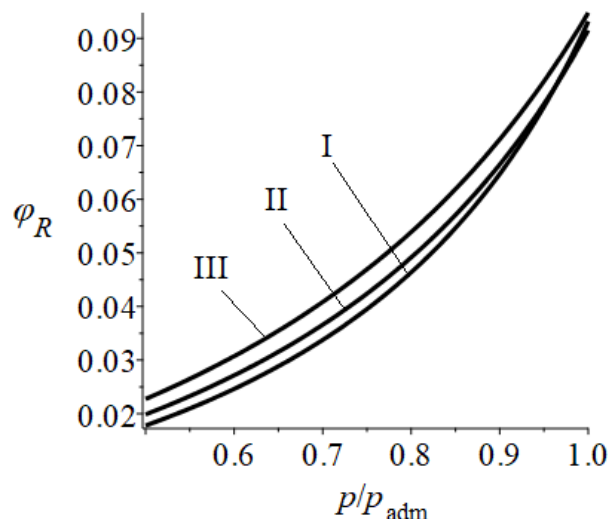
$$F_R = bhp - b \int_0^p h(p)dh. \quad (35)$$

Далее определяется коэффициент сопротивления движению [17], [18]:

$$\varphi_R = \frac{h}{l} - \frac{1}{pl} \int_0^p h(p)dh. \quad (36)$$

Численное интегрирование выражений (35), (36) с учётом формулы (27) не представляет сложностей с точки зрения проведения расчётов.

Обобщим полученные данные и представим результаты расчёта коэффициента сопротивления относительно соотношения среднего и допустимого давления движителя на почвогрунт. На рисунке 4 представлены результаты численного интегрирования (36) при угле склона  $\beta = 30^\circ$  для различных категорий прочности почвогрунта.



**Рисунок 4.** Коэффициент сопротивления движению гусеничной машины, вызванного образованием колеи, в зависимости от соотношения среднего и допустимого давления движителя на грунт

**Figure 4.** Coefficient of resistance to tracked machine movement caused by rutting, depending on the ratio of the average and permissible pressure of the vehicle on the soil

Результаты расчётов обобщим в таблице 3.

**Таблица 3.** Коэффициент сопротивления движению гусеничной машины, вызванного образованием колеи, в зависимости от соотношения среднего и допустимого давления движителя на грунт (на склоне 30°, курсив — на горизонтальной поверхности)

**Table 3.** Coefficient of resistance to track machine movement caused by rutting, depending on the ratio of the average and permissible pressure of the mover on the soil (on a slope of 30°, in italics - on a horizontal surface)

Соотношение среднего и допустимого давления $p/p_{adm}$	Категория прочности почвогрунта		
	III (слабый)	II (средней прочности)	I (прочный)
0,5	0,0227	0,0199	0,0178
	0,0201	0,0174	0,0153
0,75	0,0469	0,0424	0,0395
	0,0378	0,0332	0,0298
1	0,0948	0,0915	0,0932
	0,0658	0,0593	0,0549

В результате аппроксимации результатов расчётов, выполненных при  $\beta = \text{var}$ , получим функцию коэффициента сопротивления движению гусеничной машины, вызванного образованием колеи, в следующем виде:

$$\varphi_R = \varphi_{R0} \delta_{R\beta}, \quad (37)$$

где  $\varphi_{R0}$  — коэффициент сопротивления на горизонтальной опорной поверхности,  $\delta_{R\beta}$  — коэффициент, учитывающий влияние угла склона на сопротивление движению:

$$\varphi_{R0} = 0,0306 - 0,0246q_s - 0,0829 \frac{p}{p_{\text{adm}}} + 0,115 \left( \frac{p}{p_{\text{adm}}} \right)^2. \quad (38)$$

$$\delta_{R\beta} = 1 + 0,016\beta. \quad (39)$$

В итоге запишем:

$$\varphi_R = \left( 0,0306 - 0,0246q_s - 0,0829 \frac{p}{p_{\text{adm}}} + 0,115 \left( \frac{p}{p_{\text{adm}}} \right)^2 \right) (1 + 0,016\beta), \quad (40)$$

Сила сцепления движителя с грунтом определяется по уравнению [15—17], [23]

$$F_T = b \int_0^l \tau_x(x) dx, \quad (41)$$

где  $\tau_x$  — касательное напряжение, распределённое вдоль пятна контакта,  $x$  — координата по оси, параллельной опорной поверхности движения машины.

Функция распределения  $\tau_x$  известна [15], [17], [23]:

$$\tau_x(x) = \frac{1}{\frac{1}{\tau_{\text{max}}} + \frac{t_{\text{гр}}}{Gj(x)}}, \quad (42)$$

где  $t_{\text{гр}}$  — шаг грунтозацепов,  $G$  — модуль сдвига грунта,  $j$  — сдвиговая деформация грунта,  $\tau_{\text{max}}$  — максимальное сопротивление грунта сдвигу.

Как правило, принимают линейную функцию деформации сдвига по координате  $x$  [15—17], [23]:

$$j(x) = Sx, \quad (43)$$

где  $S$  — коэффициент буксования движителя.

Максимальное сопротивление грунта сдвигу следует определять с учётом его физико-механических и прочностных свойств [14—17], [23]:

$$\tau_{\text{max}} = C\xi(j) + p \tan \varphi, \quad (44)$$

где  $\xi(j)$  — функция, учитывающая снижение сопротивления грунта при срезе [15—17], [23]:

$$\xi(j) = \begin{cases} 1, & j - j_0 \leq 0 \\ 1 - \frac{j - j_0}{t_{\text{гр}}}, & j - j_0 > 0 \\ 0, & j - j_0 \geq t_{\text{гр}} \end{cases}, \quad (45)$$

где  $j_0$  — значение сдвиговой деформации грунта, при которой происходит его срез.

Известно выражение для оценки  $j_0$  [14—17], [23]:

$$j_0 = \frac{\tau_0 t_{\text{гр}}}{G} \left( \sqrt{\frac{G}{C}} - 1 \right), \quad (46)$$

где  $\tau_0$  — максимальное сопротивление грунта сдвигу без учёта среза [15—19]:

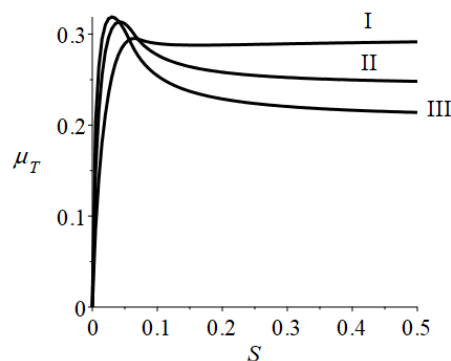
$$\tau_0 = C + p \tan \varphi. \quad (47)$$

При вычисленном значении  $F_T$  рассчитывается коэффициент сцепления движителя с грунтом [14—17], [23]:

$$\mu_T = \frac{F_T}{pbl} = \frac{1}{pl} \int_0^l \tau_x(x) dx. \quad (48)$$

Обратим внимание на ступенчатый характер функции  $\zeta(j)$ , характеризующей снижение сопротивления сдвигу при развитии деформаций среза почвогрунта. Ввиду переменного характера  $j(x)$  по длине пятна контакта, интегрирование выражений (41), (48) сложно. Для исследования выражений (41), (48) применим метод численного интегрирования.

На рисунке 5 представлены результаты расчёта коэффициента сцепления для различных категорий прочности почвогрунта при  $S = \text{var}$ ,  $p = p_{\text{adm}}$  (см. таблицу 2).



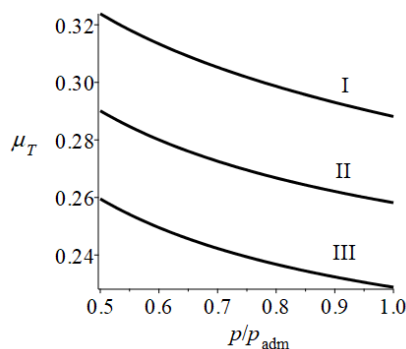
**Рисунок 5.** Связь коэффициента сцепления гусеничного движителя с опорной поверхностью и коэффициента буксования

**Figure 5.** Relationship between the traction coefficient of the tracked mover and the skidding coefficient



Согласно рекомендациям [17], [18], [24], следует исходить из верхней оценки коэффициента буксования  $S = 0,2$  (наличие буксования обусловлено как сопротивлением грунта, так и конструктивными особенностями движителя). Результаты расчётов показывают, что для гусеничного движителя при  $S > 0,1$  коэффициент сцепления изменяется незначительно, в связи с чем примем оценку [17], [18], [24] в нашем исследовании.

Проведём вычисления коэффициента сцепления по формуле (41) для различных категорий почвогрунта при изменении давления в пределах  $p = 0,5p_{adm} \dots p_{adm}$  при  $S = 0,2$ ; результаты представлены на рисунке 6.



**Рисунок 6.** Коэффициент сцепления гусеничного движителя в зависимости от отношения среднего давления к допустимому для категории прочности почвогрунта

**Figure 6.** Caterpillar traction coefficient as a function of the ratio of average pressure to the permissible pressure for the soil strength category

Тогда получим оценки коэффициента сцепления гусеничного движителя в зависимости от отношения среднего давления к допустимому для различных категорий прочности почвогрунта, представленные в таблице 4.

**Таблица 4.** Коэффициент сцепления гусеничного движителя в зависимости от отношения среднего давления к допустимому

**Table 4.** Caterpillar traction coefficient as a function of the ratio of average pressure to permissible pressure

Соотношение среднего и допустимого давления $p/p_{adm}$	Категория прочности почвогрунта		
	III (слабый)	II (средней прочности)	I (прочный)
0,50	0,260	0,290	0,324
0,75	0,239	0,270	0,302
1,00	0,229	0,258	0,288

В результате аппроксимации табличных данных получим формулу для расчёта коэффициента сцепления гусеничного движителя со склоном в зависимости от соотношения среднего и допустимого давления, а также несущей способности (при коэффициенте буксования движителя  $S = 0,2$ ):

$$\mu_T = 0,253 - 0,066 \frac{p}{p_{\text{adm}}} + 0,925q_s - 2,11q_s^2. \quad (49)$$

### 3.4. Обоснование технологических параметров, связанных с тягово-сцепными свойствами гусеничной машины, работающей на склоне

Рассмотрим порядок обоснования технологических параметров, связанных с тягово-сцепными свойствами гусеничной машины. Для обеспечения проходимости гусеничной машины на склоне необходимо выполнение условий [17], [18], [25—29]:

$$\begin{cases} F_T \geq F_R - T \\ N \geq \frac{F_R v}{\eta} \\ p \leq p_{\text{adm}} \end{cases}, \quad (50)$$

где  $v$  — заданная скорость движения,  $N$  — мощность двигателя машины,  $\eta$  — коэффициент полезного действия трансмиссии,  $T$  — сила, буксирующая машину.

При работе на склоне запишем:

$$F_T = \mu_T G \cos \beta, \quad (51)$$

$$F_R = \varphi_R G \cos \beta + G \sin \beta + P, \quad (52)$$

где  $G$  — вес гусеничной машины, связанный со средним давлением движителя на грунт:

$$G = 2b l p. \quad (53)$$

Тогда, после несложных преобразований, запишем на основе формулы (50):

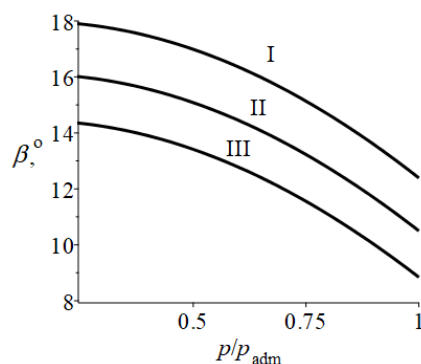
$$\begin{cases} \mu_T \cos \beta \geq \varphi_R \cos \beta + \sin \beta - \frac{T}{G} \\ \frac{N}{G} \geq \frac{v}{\eta} \left( \varphi_R \cos \beta + \sin \beta + \frac{P}{G} \right) \\ p \leq p_{\text{adm}} \end{cases}, \quad (54)$$

Если гусеничная машина движется самостоятельно, без буксировки, то можем записать:

$$\begin{cases} \mu_T \cos \beta \geq \varphi_R \cos \beta + \sin \beta \\ K_{\text{Э}} = \frac{N}{M} \geq \frac{v g}{\eta} (\varphi_R \cos \beta + \sin \beta), \\ p \leq p_{\text{adm}} \end{cases}, \quad (55)$$

где  $g$  — ускорение свободного падения,  $M$  — масса гусеничной машины,  $K_{\Sigma}$  — коэффициент энергонасыщенности машины.

Решение системы неравенств (55) позволит определить максимальный угол склона, вдоль которого способна перемещаться машина. На рисунке 7 приведены результаты расчёта максимального значения угла  $\beta$ , удовлетворяющего первому неравенству системы (55) при среднем давлении  $p \leq p_{adm}$ . Графики построены относительно частного среднего и допустимого по колее давления на грунт. В таблице 5 приведены числовые результаты расчётов.



**Рисунок 7.** Оценка максимального угла склона в зависимости от соотношения среднего и допустимого давления гусеничного движителя на грунт

**Figure 7.** Evaluation of the maximum slope angle depending on the ratio of the average and permissible pressure of the tracked mover on the ground

**Таблица 5.** Оценка максимального угла склона в зависимости от соотношения среднего и допустимого давления гусеничного движителя на почвогрунт

**Table 5.** Evaluation of the maximum slope angle depending on the ratio of the average and permissible pressure of the track mover on the soil

Соотношение среднего и допустимого давления $p/p_{adm}$	Категория прочности почвогрунта		
	III (слабый)	II (средней прочности)	I (прочный)
0	14,3	16,0	17,9
0,5	13,4	15,1	17,0
0,75	11,6	13,2	15,1
1	8,8	10,5	12,4

В результате аппроксимации расчётных данных получим следующую зависимость для оценки максимального угла склона:

$$\beta_0 = 12,3 + 49,2q_s + 1,69 \frac{p}{p_{adm}} - 108q_s^2 - 7,23 \left( \frac{p}{p_{adm}} \right)^2. \quad (56)$$

Решение второго неравенства системы (55) позволяет установить нижнюю оценку коэффициента энергонасыщенности гусеничной машины, при котором возможно поступательное движение вдоль склона, в зависимости от соотношения среднего и допустимого давления движителя. При этом угол преодолеваемого склона определяется по уравнению (56). Результаты расчётов представлены в таблице 6 и на рисунке 8. В таблице 6  $K_{Э}$  указан в [кВт/т], данные получены при  $v = 5$  км/ч,  $\eta = 0,9$ .

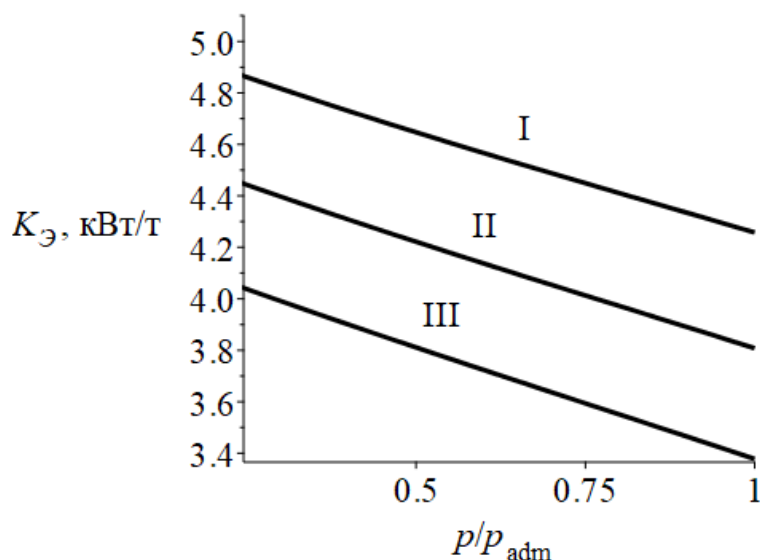
**Таблица 6.** Оценка коэффициента энергонасыщенности гусеничной машины, при котором возможно поступательное движение вдоль склона, в зависимости от соотношения среднего и допустимого давления движителя

**Table 6.** Evaluation of the energy ratio of the track machine when forward movement along the slope is possible depending on the ratio of the average and permissible pressure of the mover

Соотношение среднего и допустимого давления $p/p_{adm}$	Категория прочности почвогрунта		
	III (слабый)	II (средней прочности)	I (прочный)
0,25	4,04	4,44	4,86
0,5	3,81	4,22	4,65
0,75	3,59	4,01	4,45
1	3,38	3,81	4,26

Энергонасыщенность техники существенно выше значений, указанных в таблице 6, не рациональная с точки зрения использования мощности двигателя: большая мощность не будет реализована на преодоление сопротивления движению, поскольку при увеличении угла склона не будет выполняться ограничение по сцеплению движителя с опорной поверхностью. Приближенная зависимость для оценки коэффициента энергонасыщенности имеет вид:

$$K_{Э} = 4,12 + 4,24q_s - 0,84 \frac{p}{p_{adm}}. \quad (57)$$



**Рисунок 8.** Оценка коэффициента энергонасыщенности гусеничной машины, при котором возможно поступательное движение вдоль склона, в зависимости от соотношения среднего и допустимого давления движителя

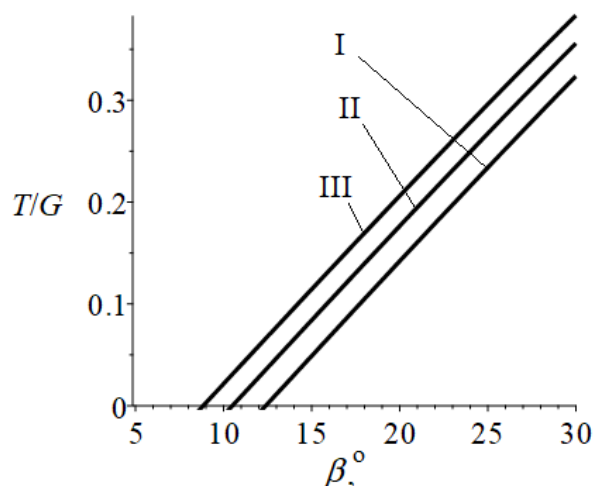
**Figure 8.** Evaluation of the energy ratio of the track machine when forward movement along the slope is possible depending on the ratio of the average and permissible pressure of the mover

На более крутых склонах, которые машина не способна преодолеть самостоятельно по сцеплению движителя с опорной поверхностью, возникает необходимость в буксировке. На практике это обстоятельство должен определить оператор по характеру работы машины [30—34]. При помощи первого неравенства системы (54) получим оценку соотношения силы, буксирующей гусеничную машину на склоне, и силы тяжести самой машины. Результаты решения при  $p = p_{adm}$  представлены на рисунке 9.

Аппроксимация результатов расчётов приводит к получению уравнения

$$\frac{T}{G} = -0,155 + 0,0185\beta - 0,326q_s. \quad (58)$$

Результаты расчёта по уравнению (58) проиллюстрированы на рисунке 9.



**Рисунок 9.** Соотношение силы, требующейся для буксировки машины на крутом склоне, и веса машины

**Figure 9.** Ratio of the force required to tow the machine on a steep slope to the weight of the machine

#### 4. Обсуждение и заключение

Таким образом, в результате выполненных теоретических исследований получены новые зависимости, позволяющие на практике, без итераций, рассчитать:

- несущую способность грунтовой поверхности, находящейся под воздействием гусеничного движителя, в зависимости от физико-механических свойств грунта с учётом угла склона;
- глубину колеи, образующейся под воздействием гусеничного движителя лесной машины, работающей на склоне;
- допустимое среднее давление гусеничного движителя на грунт, ограниченное глубиной образующейся колеи;
- коэффициент сопротивления движению гусеничной машины, движущейся вдоль склона;
- коэффициент сцепления гусеничного движителя с грунтовой поверхностью с учётом ослабления почвогрунта при срезе.

Полученные математические модели позволяют получать результаты, важные для практики. Например, гусеничная машина массой  $M = 15$  т, работает на уклоне до  $\beta = 20^\circ$ , несущая способность почвогрунта  $q_s = 0,09$  МПа. Геометрические параметры движителя: ширина пятна контакта  $b = 0,6$  м, длина пятна контакта  $l = 5b = 3$  м. Вес машины составляет  $G = 0,147$  МН; среднее давление движителя на почвогрунт  $p = 0,041$  МПа, что меньше допустимого значения  $p_{adm} = 0,05$  МПа по формуле (32). Коэффициент энергонасыщенности по формуле (57) составляет 3,82 кВт/т. Таким образом, мощность двигателя машины следует

принять ориентировочно 57,3 кВт (существенно бóльшая мощность не будет реализована). Уклон, который машина способна преодолеть по сцеплению, по формуле (56) составляет  $\beta_0 = 12,4^\circ$ , что меньше заданного значения, следовательно, в паре с машиной должна работать лебёдка, причём тяговое усилие  $T$  по формуле (58) должно составлять не менее  $T = 0,0273 \text{ МН} = 27,3 \text{ кН}$ .

## 5. Авторский вклад

До Туан Ань: проведение расчётов и интерпретация их результатов (50 %); Григорьев Г. В.: разработка программы для проведения расчётов (12,5 %), Каляшов В. А.: разработка программы для проведения расчётов (12,5 %); Гурьев А. Ю.: анализ проблематики исследования (10 %); Григорьева О. И.: анализ проблематики исследования (10 %); Хитров Е. Г.: общее руководство работой (5 %).

*Работа выполнена в рамках научной школы «Инновационные разработки в области лесозаготовительной промышленности и лесного хозяйства». Исследование частично выполнено на средства гранта Российского научного фонда № 22-26-00009, <https://rscf.ru/project/22-26-00009/>.*

## Список литературы

1. Пути повышения эффективности работы лесных машин / И. В. Григорьев, О. А. Куницкая, С. Е. Рудов, А. Б. Давтян // Энергия: экономика, техника, экология. 2020. № 1. С. 55—63.
2. Перспективы создания лесозаготовительных комплексов на базе отечественных строительных и сельскохозяйственных машин / И. В. Григорьев, О. А. Куницкая, А. А. Просужих, А. Б. Давтян, С. Е. Рудов // Ремонт. Восстановление. Модернизация. 2020. № 10. С. 3—10.
3. Современные подходы к повышению энергоэффективности и экономичности лесных машин / А. Ю. Мануковский, М. В. Зорин, А. А. Просужих, О. А. Куницкая, И. В. Григорьев // Приоритетные направления инновационной деятельности в промышленности: Сб. науч. ст. по итогам Шестой междунар. науч. конф. Казань, 2020. С. 138—140.
4. Куницкая О. А. Проактивный сервис для лесных машин // Повышение эффективности лесного комплекса: Материалы Шестой Всерос. национал. научно-практич. конф. с междунар. участием. Петрозаводск, 2020. С. 86—87.
5. Организационно-технические решения для повышения коэффициента технической готовности лесных машин / О. А. Куницкая, А. А. Просужих, А. Б. Давтян, М. Ф. Григорьев, А. И. Григорьева // Энергоэффективность и энергосбережение в современном производстве и обществе: Материалы междунар. научно-практич. конф. Воронеж, 2020. С. 162—167.
6. Рудов С. Е., Куницкая О. А. Теоретические исследования экологической совместимости колёсных лесных машин и мерзлотных почвогрунтов лесов криолитозоны // Транспортные и транспортно-технологические системы: Материалы Междунар. научно-техн. конф. / Отв. ред. Н. С. Захаров. Тюмень, 2020. С. 323—326.
7. Моделирование процесса динамического уплотнения почвогрунта / И. В. Григорьев, О. А. Куницкая, М. Ф. Григорьев, А. И. Григорьева // IX Международная конференция

по математическому моделированию, посвящённая 75-летию Владимира Николаевича Врагова: Тез. докл. / Северо-Восточный федеральный университет, Академия наук Республики Саха (Якутия). Якутск, 2020. С. 144.

8. *Никитина Е. И., Куницкая О. А., Николаева Ф. В.* Проект организации лесозаготовок в условиях Алданского лесничества с применением многооперационных лесозаготовительных комплексов // Современные проблемы и достижения аграрной науки в Арктике: Сб. науч. ст. по материалам Всерос. студ. научно-практич. конф. с междунар. участием в рамках «Северного форума — 2020» (29—30 сентября 2020 г., Якутск) и Международной научной онлайн летней школы — 2020 (6—20 июля 2020 г., Якутск). Якутск, 2020. С. 138—148.
9. Modeling the effect of wheeled tractors and skidded timber bunches on forest soil compaction / I. Grigorev, O. Kunickaya, A. Burgonutdinov, E. Tikhonov, V. Makuev, S. Egipko, E. Hertz, M. Zorin // *Journal of Applied Engineering Science*. 2021. Vol. 19, no. 2. P. 439—447.
10. Pressure control systems for tyre preservation in forestry machinery and forest soils / O. Kunickaya, E. Hertz, I. Kruchinin, E. Tikhonov, N. Ivanov, N. Dolmatov, M. Zorin, I. Grigorev // *Asian Journal of Water, Environment and Pollution*. 2021. Vol. 18, no. 3. P. 95—102.
11. Экспериментальные исследования производительности форвардера с учётом его эксплуатационных характеристик, параметров лесосеки и физико-механических свойств почвогрунта / О. Н. Бурмистрова, А. А. Просужих, С. Е. Рудов, О. А. Куницкая, И. В. Григорьев // *Resources and Technology*. 2021. Т. 18, № 1. С. 94—124.
12. Обоснование исходных требований математической модели взаимодействия колёсных транспортных средств на пневматиках низкого давления с лесными почвогрунтами / О. Н. Бурмистрова, Е. В. Тетеревлева, С. Е. Рудов, И. В. Григорьев, О. А. Куницкая // *Системы. Методы. Технологии*. 2020. № 2 (46). С. 94—99.
13. Методика и результаты экспериментальных исследований взаимодействия колёсных транспортных средств на пневматиках низкого давления с лесными почвогрунтами / О. Н. Бурмистрова, Е. В. Тетеревлева, С. Е. Рудов, И. В. Григорьев, О. А. Куницкая // *Системы. Методы. Технологии*. 2020. № 1 (45). С. 66—71.
14. *Хитров Е. Г., Бартенев И. М.* Влияние угла поперечного наклона поверхности качения на тягово-сцепные свойства колёсного движителя // *Лесотехнический журнал*. 2016. № 4 (24). С. 225—232.
15. *Агейкин Я. С.* Проходимость автомобилей. М.: Машиностроение, 1981. 232 с.
16. *Ларин В. В.* Методы прогнозирования опорной проходимости многоосных колёсных машин на местности: Дис. ... д-ра техн. наук: 05.05.03. М., 2007. 530 с.
17. *Хахина А. М.* Методы прогнозирования и повышения проходимости колёсных лесных машин: Дис. ... д-ра техн. наук: 05.21.01. СПб., 2018. 318 с.
18. *Хитров Е. Г.* Комплексное обоснование параметров и режимов работы движителей лесных машин: Дис. ... д-ра техн. наук: 05.21.01. Воронеж, 2020. 319 с.
19. Расчёт тяговых и сцепных свойств колёсного скиддера с использованием данных зарубежных коллег / С. Е. Рудов, Е. Г. Хитров, М. Е. Рудов, В. В. Устинов // *Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика*. 2015. Т. 3, № 1 (12). С. 223—228.
20. *Kochnev A., Khitrov E.* Theoretical models for rut depth evaluation after a forestry machine's wheel Passover // 18th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2018: Conference proceedings. 2018, pp. 1005—1012.
21. Исследование коэффициента фильтрации лесной почвы (случай дерново-подзолистой почвы) / А. В. Калистратов, В. А. Иванов, Р. К. Коротков, Е. Г. Хитров, Г. В. Григорьев // *Системы. Методы. Технологии*. 2014. № 2 (22). С. 190—193.



22. Экспериментальное определение времени релаксации напряжений лесного грунта / И. В. Григорьев, А. И. Никифорова, А. А. Пельмский, Е. Г. Хитров, А. М. Хахина // Учёные записки Петрозаводского государственного университета. 2013. № 8 (137). С. 77—80.
23. Лухминский В. А. Совершенствование моделей и методов прогнозирования проходимости гусеничных лесных машин: Дис. ... канд. техн. наук: 05.21.01. СПб., 2018. 179 с.
24. Review of terramechanics models and their applicability to real-time applications / R. He, C. Sandu, A. K. Khan, A. G. Guthrie, P. Schalk Els, H. A. Hamersma // Journal of Terramechanics. 2019. Vol. 81. P. 3—22.
25. Impulse control technology for improving steering control systems of the tracked vehicles / R. Dobretsov, I. Grigorev, E. Tikhonov, A. Mikheev, A. Khakhina, T. Storodubtseva, S. Shiryaev, A. Burgonutdinov // International Review of Automatic Control. 2021. Vol. 14, no. 3. P. 172—178.
26. Добрецов Р. Ю., Григорьев И. В., Куницкая О. А. Шасси гусеничного трелёвочного трактора с «диагональной» системой управления поворотом // Ремонт. Восстановление. Модернизация. 2020. № 1. С. 42—48.
27. Адаптация принципа низкочастотного импульсного управления поворотом к трансмиссиям лесных и транспортно-тяговых гусеничных машин / Р. Ю. Добрецов, И. В. Григорьев, О. А. Куницкая, Н. Л. Фам // Ремонт. Восстановление. Модернизация. 2020. № 11. С. 29—35.
28. Добрецов Р. Ю., Григорьев И. В. Квазибесступенчатые трансмиссии для лесных гусеничных машин // Лесной вестник. Forestry Bulletin. 2018. Т. 22, № 1. С. 68—77.
29. Добрецов Р. Ю., Григорьев И. В. Перспективные трансмиссии лесных гусеничных машин // Повышение эффективности лесного комплекса: Материалы IV Всерос. научно-практич. конф. с междунар. участием. Петрозаводск, 2018. С. 57—58.
30. Увеличение подвижности гусеничных и колёсных машин / Р. Ю. Добрецов, И. В. Григорьев, С. Е. Рудов, Е. В. Тетеревлева, Ю. М. Чемшикова // Ремонт. Восстановление. Модернизация. 2019. № 11. С. 4—10.
31. Куницкая О. А., Григорьев И. В. Оценка эффективности работы операторов лесных машин // Транспортные и транспортно-технологические системы: Материалы Междунар. научно-техн. конф. / Отв. ред. Н. С. Захаров. Тюмень, 2019. С. 184—188.
32. Куницкая О. А., Григорьев И. В., Нгуен Т. Н. Современные методы и формы обучения операторов лесных машин // Инновации в химико-лесном комплексе: тенденции и перспективы развития: Сб. материалов Всерос. научно-практич. конф. / Отв. ред.: Ю. А. Безруких, Е. В. Мельникова. Красноярск, 2020. С. 277—280.
33. Григорьев И. В., Куницкая О. А., Фам Н. Л. Применение мобильных технологий для мониторинга, контроля и управления процессами сервиса лесных машин // Инновации в химико-лесном комплексе: тенденции и перспективы развития: Сб. материалов Всерос. научно-практич. конф. / Отв. ред.: Ю. А. Безруких, Е. В. Мельникова. Красноярск, 2020. С. 143—146.
34. Григорьев И. В., Рудов С. Е. Особенности эксплуатации колёсных лесных машин в сложных почвенно-грунтовых и рельефных условиях // Forest engineering: Материалы научно-практич. конф. с междунар. участием. Якутск, 2018. С. 67—71.

## References

1. Grigorev I. V., Kunitskaya O. A., Rudov S. E., Davtyan A. B. Ways to increase the efficiency of forest machines. *Energy: Economics, Technology, Ecology*, 2020, no. 1, pp. 55—63. (In Russ.)

2. Grigorev I. V., Kunitskaya O. A., Proshikh A. A., Davtyan A. B., Rudov S. E. Prospects for creating logging complexes on the basis of domestic construction and agricultural machinery. *Repair. Restoration. Modernization*, 2020, no. 10, pp. 3—10. (In Russ.)
3. Manukovsky A. Yu., Zorin M. V., Proshikh A. A., Kunitskaya O. A., Grigorev I. V. Modern approaches to improving energy efficiency and efficiency of forest machines. *Priority directions of innovative activity in industry. collection of scientific articles of the sixth international scientific conference*. Kazan, 2020, pp. 138—140. (In Russ.)
4. Kunitskaya O. A. Proactive service for forest machines. *Increasing the efficiency of the forestry complex. Proceedings of the Sixth All-Russian National Scientific and Practical Conference with international participation*. Petrozavodsk, 2020, pp. 86—87. (In Russ.)
5. Kunitskaya O. A., Proshikh A. A., Davtyan A. B., Grigorev M. F., Grigoreva A. I. Organizational and technical solutions to increase the coefficient of technical readiness of forest machines. *Energy Efficiency and Energy Saving in Modern Production and Society. Materials of International Scientific-Practical Conference*. Voronezh, 2020, pp. 162—167. (In Russ.)
6. Rudov S. E., Kunitskaya O. A. Theoretical studies of ecological compatibility of wheeled forest machines and permafrost soils of cryolithozone forests. *Transport and transport-technological systems. Materials of the International Scientific and Technical Conference*. Ed. N. S. Zakharov. Tyumen, 2020, pp. 323—326. (In Russ.)
7. Grigorev I. V., Kunitskaya O. A., Grigorev M. F., Grigoreva A. I. Modeling of process of dynamic compaction of soil. *IX International Conference on Mathematical Modelling, devoted to 75th anniversary of Vladimir Nikolaevich Vragov. Theses of reports*. North-Eastern Federal University, Academy of Sciences of the Republic of Sakha (Yakutia). Yakutsk, 2020, p. 144. (In Russ.)
8. Nikitina E. I., Kunitskaya O. A., Nikolaeva F. V. Project of logging organization in the conditions of Aldansky lesnichestvo with the use of multi-operational logging complexes. *Modern problems and achievements of agricultural science in the Arctic. Collection of scientific articles on the materials of All-Russian student scientific-practical conference with international participation in the framework of «Northern Forum — 2020» (September 29—30, 2020, Yakutsk) and International scientific online summer school — 2020 (July 6—20, 2020, Yakutsk)*. Yakutsk, 2020, pp. 138—148. (In Russ.)
9. Grigorev I., Kunitskaya O., Burgonutdinov A., Tikhonov E., Makuev V., Egipko S., Hertz E., Zorin M. Modeling the effect of wheeled tractors and skidded timber bunches on forest soil compaction. *Journal of Applied Engineering Science*, 2021, vol. 19, no. 2, pp. 439—447.
10. Kunitskaya O., Hertz E., Kruchinin I., Tikhonov E., Ivanov N., Dolmatov N., Zorin M., Grigorev I. Pressure control systems for tyre preservation in forestry machinery and forest soils. *Asian Journal of Water, Environment and Pollution*, 2021, vol. 18, no. 3, pp. 95—102.
11. Burmistrova O. N., Proshikh A. A., Rudov S. E., Kunitskaya O. A., Grigorev I. V. Experimental studies of forwarder productivity taking into account its operating characteristics, logging parameters, and physical and mechanical properties of soil. *Resources and Technology*, 2021, vol. 18, no. 1, pp. 94—124. (In Russ.)
12. Burmistrova O. N., Teterlevleva E. V., Rudov S. E., Grigorev I. V., Kunitskaya O. A. Justification of initial requirements of mathematical model of interaction of wheeled vehicles on low-pressure pneumatics with forest soils. *Sistem. Methods. Technologies*, 2020, no. 2 (46), pp. 94—99. (In Russ.)
13. Burmistrova O. N., Teterlevleva E. V., Rudov S. E., Grigorev I. V., Kunitskaya O. A. Methodology and results of experimental studies of interaction of wheeled vehicles on low-pressure pneumatics with forest soils. *Sistem. Methods. Technologies*, 2020, no. 1 (45), pp. 66—71. (In Russ.)

14. Khitrov E. G., Bartenev I. M. Influence of angle of cross slope of rolling surface on traction and traction properties of wheeled mover. *Forest Engineering Journal*, 2016, no. 4 (24), pp. 225—232. (In Russ.)
15. Ageikin Y. S. *Drivability of cars*. Moscow, Mashinostroenie, 1981. 232 p. (In Russ.)
16. Larin V. V. *Methods of predicting the supportability of multi-axle wheeled vehicles on the ground*: Diss. ... dokt. in Technical Sciences: 05.05.03. Moscow, 2007. 530 p. (In Russ.)
17. Khakhina A. M. *Methods to predict and improve the passability of wheeled forest machines*: Diss. ... dokt. in Technical Sciences: 05.21.01. St. Petersburg, 2018. 318 p. (In Russ.)
18. Khitrov E. G. Complex substantiation of parameters and operating modes of forest machine engines: Diss. ... dokt. in Technical Sciences: 05.21.01. Voronezh, 2020. 319 p. (In Russ.)
19. Rudov S. E., Khitrov E. G., Rudov M. E., Ustinov V. V. Calculation of traction and coupling properties of wheeled skidder using data of foreign colleagues. *Actual directions of scientific research of the XXI century: theory and practice*, 2015, vol. 3, no. 1 (12), pp. 223—228. (In Russ.)
20. Kochnev A., Khitrov E. Theoretical models for rut depth evaluation after a forestry machine's wheel Passover. *18th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2018. Conference proceedings*, 2018, pp. 1005—1012.
21. Kalistratov A. V., Ivanov V. A., Korotkov R. K., Khitrov E. G., Grigorev G. V. Study of forest soil filtration coefficient (case of sod-podzolic soil). *Systems. Methods. Technologies*, 2014, no. 2 (22), pp. 190—193. (In Russ.)
22. Grigorev I. V., Nikiforova A. I., Pelymsky A. A., Khitrov E. G., Khakhina A. M. Experimental determination of stress relaxation time of forest soil. *Scientific Notes of Petrozavodsk State University*, 2013, no. 8 (137), pp. 77—80. (In Russ.)
23. Lukhminsky V. A. Improvement of models and methods of forecasting the permeability of tracked forest machines: Diss. ... kand. of Technical Sciences: 05.21.01. St. Petersburg, 2018. 179 p. (In Russ.)
24. He R., Sandu C., Khan A. K., Guthrie A. G., Schalk Els P., Hamersma H. A. Review of terramechanics models and their applicability to real-time applications. *Journal of Terramechanics*, 2019, vol. 81, pp. 3—22.
25. Dobretsov R., Grigorev I., Tikhonov E., Mikheev A., Khakhina A., Storodubtseva T., Shiryaev S., Burgonutdinov A. Impulse control technology for improving steering control systems of the tracked vehicles. *International Review of Automatic Control*, 2021, vol. 14, no. 3, pp. 172—178.
26. Dobretsov R. Y., Grigorev I. V., Kunitskaya O. A. Chassis of caterpillar skidder tractor with «diagonal» turn control system. *Repair. Restoration. Modernization*, 2020, no. 1, pp. 42—48. (In Russ.)
27. Dobretsov R. Y., Grigorev I. V., Kunitskaya O. A., Pham N. L. Adaptation of the principle of low-frequency pulse control of turning to transmissions of forestry and transport-traction crawler machines. *Repair. Restoration. Modernization*, 2020, no. 11, pp. 29—35. (In Russ.)
28. Dobretsov R. Y., Grigorev I. V. Quasi-stage transmissions for forestry tracked machines. *Forestry Bulletin. Forestry Bulletin*, 2018, vol. 22, no. 1, pp. 68—77. (In Russ.)
29. Dobretsov R. Y., Grigorev I. V. Prospective transmissions of forest tracked machines. *Increasing the efficiency of the forestry complex. Proceedings of IV All-Russian scientific-practical conference with international participation*. Petrozavodsk, 2018, pp. 57—58. (In Russ.)
30. Dobretsov R. Y., Grigorev I. V., Rudov S. E., Teterlevleva E. V., Chemshikova Yu. M. Increase mobility of tracked and wheeled machines. *Repair. Restoration. Modernization*, 2019, no. 11, pp. 4—10. (In Russ.)

31. Kunitskaya O. A., Grigorev I. V. Assessment of the efficiency of forest machine operators. *Transport and transport-technological systems. Materials of the International Scientific and Technical Conference*. Ed. N. S. Zakharov. Tyumen, 2019, pp. 184—188. (In Russ.)
32. Kunitskaya O. A., Grigorev I. V., Nguyen T. N. Modern methods and forms of training forest machine operators. *Innovations in the chemical and forestry complex: trends and prospects for development. Proceedings of the All-Russian Scientific and Practical Conference*. Ed.: Yu. A. Bezrukikh, E. V. Melnikova. Krasnoyarsk, 2020, pp. 277—280. (In Russ.)
33. Grigorev I. V., Kunitskaya O. A., Pham N. L. Application of mobile technologies for monitoring, control and management of forest machine service processes. *Innovations in the chemical and forestry complex: trends and prospects for development. Proceedings of the All-Russian Scientific and Practical Conference*. Ed.: Yu. A. Bezrukikh, E. V. Melnikova. Krasnoyarsk, 2020, pp. 143—146. (In Russ.)
34. Grigorev I. V., Rudov S. E. Features of the operation of wheeled forest machines in complex soil and terrain conditions. *Forest engineering. materials of scientific and practical conference with international participation*. Yakutsk, 2018, pp. 67—71. (In Russ.)

© До Туан Ань, Григорьев Г. В., Каляшов В. А., Гурьев А. Ю., Григорьева О. И.,  
Хитров Е. Г., 2022

DOI: 10.15393/j2.art.2022.6323

УДК 630.383

Статья

## Особенности районов строительства лесовозных автомобильных дорог

**Сапелкин Роман Сергеевич**

*экстерн, Воронежский государственный университет инженерных технологий  
(Российская Федерация), [sapelrs90@mail.ru](mailto:sapelrs90@mail.ru)*

**Меерсон Вера Эдуардовна**

*кандидат технических наук, доцент кафедры корпоративных информационных систем и программирования, Воронежский государственный университет инженерных технологий  
(Российская Федерация), [meerson@yandex.ru](mailto:meerson@yandex.ru)*

**Меерсон Мария Владимировна**

*экстерн, Воронежский государственный университет инженерных технологий  
(Российская Федерация), [marivladresh@yandex.ru](mailto:marivladresh@yandex.ru)*

**Скрыпников Алексей Васильевич**

*доктор технических наук, профессор кафедры информационной безопасности,  
Воронежский государственный университет инженерных технологий  
(Российская Федерация), [skrypnikovvsafe@mail.ru](mailto:skrypnikovvsafe@mail.ru)*

**Казачек Мария Николаевна**

*аспирант, Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г. Ф. Морозова  
(Российская Федерация), [kaza4yok-marya@ya.ru](mailto:kaza4yok-marya@ya.ru)*

*Получена: 15 апреля 2022 / Принята: 9 сентября 2022 / Опубликовано: 15 сентября 2022*

---

**Аннотация:** Авторами рассматривается расчёт промерзания грунтов и зимнего влагонакопления при строительстве лесовозных автомобильных дорог. Приведены физико-технические показатели лёгкой супеси с учётом оттепелей, рекомендованы значения процента обеспеченности и переходного коэффициента для категорий дорог. Произведён анализ многолетнего статистического наблюдения за температурным режимом на устойчивость земляного полотна. Рассмотрено распределение температуры грунта по глубине, влияние величины влагонакопления в земляном полотне. Приведены таблицы амплитуды колебания температуры воздуха и грунта на разных глубинах. Определена необходимость регулирования водного и температурного режимов дорожных конструкций.

Для установления расчётных глубин промерзания грунтов земляного полотна лесовозных автомобильных дорог применён метод «аналога», который заключается в сопоставлении параллельных наблюдений за глубиной промерзания под снежным покровом и без него. Рассмотрены климатические условия Новгородской области и определено, что в данных климатических условиях создаются неблагоприятные условия для нормального протекания водно-тепловых процессов в грунтах земляного полотна и дорожных одеждах лесовозных автомобильных дорог. Переувлажнение грунтов земляного полотна приводит к уменьшению прочности дорожных одежд, которые под действием лесовозных автопоездов частично или полностью разрушаются. Для улучшения протекания водно-тепловых процессов предложено предусматривать инженерные мероприятия, способствующие регулированию как водного, так и температурного режимов дорожных конструкций.

**Ключевые слова:** амплитуда колебания температуры воздуха и грунта на разных глубинах, разность температур верхних слоёв грунта и воздуха, глубина промерзания, переходный коэффициент

---

DOI: 10.15393/j2.art.2022.6323

Article

## Features of regions for forest roads construction

### **Roman Sapelkin**

*external student of the Voronezh State University of Engineering Technologies (Russian Federation), [sapelrs90@mail.ru](mailto:sapelrs90@mail.ru)*

### **Vera Meerson**

*candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the corporate information systems and programming department of the Voronezh State University of Engineering Technologies (Russian Federation), [meerson@yandex.ru](mailto:meerson@yandex.ru)*

### **Maria Meerson**

*external student of the Voronezh State University of Engineering Technologies (Russian Federation), [marivladresh@yandex.ru](mailto:marivladresh@yandex.ru)*

### **Aleksey Skrypnikov**

*Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Information Security, Voronezh State University of Engineering Technologies (Russian Federation), [skrypnikovvsafe@mail.ru](mailto:skrypnikovvsafe@mail.ru)*

### **Maria Kazachek**

*post-graduate student of the automotive faculty, Voronezh State Forest Engineering University named after G. F. Morozova (Russian Federation), [kaza4yok-marya@ya.ru](mailto:kaza4yok-marya@ya.ru)*

*Received: 15 April 2022 / Accepted: 9 September 2022 / Published: 15 September 2022*

---

**Abstract:** The authors calculated soil freezing and winter moisture accumulation during the construction of logging roads. The physical and technical indicators of light sandy loam are given in regard to thaws, and the values of the availability index and the transition coefficient for road categories are recommended. The authors analyzed the long-term statistical observation of the temperature regime for the subgrade stability. They also considered the distribution of soil temperature in depth, the influence of the amount of moisture accumulation in the subgrade. Tables of the amplitude of fluctuations in air and soil temperatures at different depths are given. The authors note that regulation of the water and temperature regimes of road structures is required. To establish the estimated depths of freezing of subgrade soils of logging roads, the

“analogue” method was used to compare parallel observations of the freezing depth under and without snow cover. The climatic conditions of the Novgorod region were considered and it is determined that in these climatic conditions unfavorable conditions are created for the normal course of water-thermal processes in the subgrade soils and logging roads base. Waterlogging of subgrade soils leads to a decrease in the strength of road base resulting in its partial or complete destruction by timber tracks. To improve the water-thermal processes behavior the authors propose to arrange engineering measures that contribute to the regulation of both water and temperature regimes of road structures.

**Keywords:** amplitude of air and soil temperature fluctuations at different depths, temperature difference between the upper layers of soil and air, freezing depth, transition coefficient

---



## 1. Введение

По естественно-историческим условиям территория Новгородской области неоднородна. Климатические и геологические изменения в прошлом определили особенности рельефа, состава и строения грунтообразующих пород, географии и гидрологии её частей.

Средние температуры января колеблются до  $-8,2^{\circ}\text{C}$ . Средняя температура самого тёплого месяца (июль)  $+19,5^{\circ}\text{C}$ . Годовые амплитуды температур воздуха составляют  $23^{\circ}\text{C}$ .

Зима начинается с 13—22 ноября и продолжается 130—140 дней. Наиболее низкие температуры достигают до  $-34^{\circ}\text{C}$ . Зима богата оттепелями, часто длительными. В декабре и феврале на каждые три дня приходится один день оттепелей. Обычно зима заканчивается в конце марта — в первой декаде апреля. Температура воздуха весной быстро растёт, достигая  $+15^{\circ}$  и  $+28^{\circ}\text{C}$ . Снег тает интенсивно, что вызывает обильный поверхностный сток.

Лето по продолжительности является вторым длинным сезоном года. Его продолжительность 105—119 дней. По средним многолетним данным, лето является умеренно-тёплым и достаточно влажным. Среднемесячные температуры повышаются до  $+38^{\circ}\text{C}$ . Июль — самый тёплый месяц ( $+17—19^{\circ}\text{C}$ ). Лето характеризуется наименьшей облачностью.

Осень начинается с 4—14 сентября. Продолжительность её составляет 70—73 дня. Когда средняя суточная температура переходит через ноль, размокший грунт начинает замерзать, и осень переходит в зиму.

Температурный режим Новгородской области характеризуется постепенным понижением температуры воздуха с юго-запада на северо-восток. Так, колебания среднегодовых температур воздуха составляют от  $7,4$  до  $4,4^{\circ}\text{C}$ . Частые оттепели формируют неблагоприятный водно-тепловой режим, т. к. создаются условия для накопления дополнительной влаги в земляном полотне автомобильных лесовозных дорог. В метеорологии различают три типа оттепелей: адвективные, связанные с общим повышением температуры воздуха; радиационные, вызываемые действием солнечной радиации, и смешанные. Среднее количество дней с оттепелями составляет 62—102 за зиму.

## 2. Материалы и методы

Анализ статистических многолетних наблюдений за температурным режимом показал, что на устойчивость земляного полотна оказывают влияние лишь продолжительные оттепели (более 5 суток), связанные с общим повышением температуры воздуха.

Количество дней с оттепелями, которое следует учитывать при расчёте промерзания грунтов и зимнего влагонакопления в них, колеблется на территории Новгородской области от 8 до 25 дней. Повторяемость таких зим происходит с периодом 14 лет для юго-западных районов и 10—12 лет для северо-восточных районов [16].

Результаты наблюдений на опытных участках показывают, что за счёт продолжительных зимних оттепелей относительная влажность грунтов земляного полотна, в зависимости

от природных и конструктивных особенностей участков дорог, увеличивается на 0,10—0,35 без учёта увеличения влажности в первый период промерзания. В таблице 1 в качестве примера приведены физико-технические характеристики лёгкой пылеватой супеси в зависимости от продолжительности оттепелей.

**Таблица 1.** Физико-технические показатели лёгкой супеси с учётом оттепелей

**Table 1.** Physical and technical parameters of light sandy loam with regard to thaws

Число дней с оттепелями	$W_{отт}$	h, см	E кг/см <sup>2</sup>	c, кг/см <sup>2</sup>	$\varphi$ , град
Сухие места					
5	0,8	2,5	240	0,10	13
10	0,82	3,6	230	0,09	12
15	0,82	3,6	230	0,09	12
20	0,84	4,5	220	0,08	11
25	0,86	5,4	210	0,07	11
Сырые места					
5	0,85	5,0	210	0,07	11
10	0,88	5,8	205	0,06	11
15	0,90	7,0	200	0,05	10
20	0,93	8,6	190	0,04	9
25	0,95	9,2	180	0,03	8
Мокрые места					
5	0,9	7,0	200	0,05	10
10	0,92	8,4	190	0,04	9
15	0,85	9,2	180	0,03	8
20	0,98	12,6	170	—	—
25	1,0	17,0	160	—	—

Данные таблицы 1 свидетельствуют о том, что при расчёте дорожных одежд нежесткого типа для районов Новгородской области необходимо учитывать оттепели, которые способствуют увеличению влагонакопления в грунтах земляного полотна.

Температура грунта существенно влияет на величину влагонакопления в земляном полотне. Большой интерес представляет температурный режим грунтов по глубине для строителей, дорожников, сельского хозяйства и других отраслей промышленности [32], [46].

Температура верхних слоёв грунта всецело зависит от температуры воздуха, но большое влияние на температурный режим грунтов оказывают механический состав и тип грунта, его

влажность, цвет и другие свойства. Однако влияние этих факторов ещё недостаточно изучено.

В таблице 2 приведены данные разности между температурой верхних слоёв грунта и воздуха в летний период.

**Таблица 2.** Разность между температурами верхних слоёв грунта и воздуха ( $t^{\circ}$ )

**Table 2.** The difference between the temperatures of the upper layers of soil and air ( $t^{\circ}$ )

Грунт	Месяцы					
	V	VI	VII	VIII	IX	X
Глубина 0,05 м						
Супесчаный	1,6	2,2	2,6	1,8	1,2	0,5
Суглинистый	0,6	1,3	2,0	1,3	1,0	0,5
Торф	-0,4	0,8	1,2	1,0	1,0	0,4
Глубина 0,1 м						
Супесчаный	1,2	2,0	2,3	1,8	1,2	0,5
Суглинистый	0,2	0,9	1,5	1,0	0,9	0,5
Торф	-1,0	0,3	0,6	0,5	0,4	0,4

Из таблицы 2 видно, что средняя месячная температура поверхности грунта в летнее время отличается от того же показателя температуры воздуха. Данная разность уменьшается в зимний период.

Представляет интерес распределение температуры грунта по глубине. Температура грунта гораздо более устойчива, чем температура воздуха, и устойчивость её повышается с глубиной. Об этом свидетельствует амплитуда колебания (разность между максимальной и минимальной температурами) на разных глубинах (таблица 3).

Температура грунта на больших глубинах, так же, как и на малых, зависит от механического состава грунта.

Летом супесчаный грунт самый тёплый, на 2—3 °С теплее суглинистого, а зимой более тёплый грунт суглинистый, как более влажный; то же самое наблюдается в супесчаных грунтах и торфах.

**Таблица 3.** Амплитуда колебания температуры воздуха и грунта на разных глубинах

**Table 3.** Amplitude of air and soil temperature fluctuations at different depths

Глубина, м	Месяцы											
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
	Амплитуда колебания температуры, °С											
В воздухе	44	46	55	45	39	36	33	37	36	47	55	47
0,2	10	12	19	19	17	17	18	14	16	13	12	17
0,4	9	9	13	15	12	12	9	8	11	10	9	15
0,8	5	4	7	11	9	9	5	4	4	7	6	8
1,6	3	3	3	6	6	8	4	3	4	5	5	6
3,2	3	2	2	3	3	4	3	2	2	2	3	3

Глубина промерзания грунтов является важным показателем, определяющим водно-тепловой режим дорог. Она зависит от многих факторов: от состава и влажности грунта, высоты снежного покрова, рельефа местности, температуры грунта, гидрологических условий и др. [4], [7].

Как указывалось выше, существенным фактором, влияющим на глубину промерзания грунтов, является снежный покров. При большом снежном покрове (более 15 см) глубина промерзания резко уменьшается при одной и той же интенсивности морозов. В результате исследований выявлено, что разность глубины промерзания грунтов между оголёнными участками и участками, покрытыми снегом, находилась в пределах от 3 до 69 см.

Вопросами определения глубины промерзания грунтов и теплофизическими процессами, происходящими при этом, занимались многие учёные и исследователи. Предложено немало формул, по которым можно определить глубину промерзания грунта [10], [13].

Для установления расчётных глубин промерзания грунтов земляного полотна лесовозных автомобильных дорог нами использован метод «аналога», который заключается в сопоставлении параллельных наблюдений за глубиной промерзания под снежным покровом и без него.

В результате проведённых исследований получен переходный коэффициент, позволяющий определить глубину промерзания грунта, оголённого от снежного покрова при известной глубине промерзания под снегом. Переходный коэффициент колеблется в пределах от 1,7 до 2,3.

Переходный коэффициент  $k_n$  и процент обеспеченности следует принимать в зависимости от категории дороги. Для автомобильных лесовозных дорог рекомендуются следующие их значения (таблица 4, рисунок).

**Таблица 4.** Рекомендуемые значения процента обеспеченности и переходного коэффициента

**Table 4.** Recommended values of the availability index and the transition coefficient

Категория дороги	Процент обеспеченности	Коэффициент перехода
1	5	1,82
2	10	1,92
3	20	2,04

Существенным фактором, влияющим на величину влагонакопления и прочность земляного полотна, является скорость промерзания и оттаивания. Установлено, что скорость промерзания по оси дороги 1,2—2,2, на обочине 0,8—1,8 см/сут. при продолжительности периода промерзания около 125 сут. Скорость оттаивания по оси 2,5—3,8, а на обочине 1,8—3,4 см/сут.

Снежный покров на территории Новгородской области, где зима длится около четырёх месяцев, является фактором, существенно влияющим на формирование климата в зимний и осенний периоды. Он определяет водно-тепловой режим лесовозных автомобильных дорог и оказывает существенное влияние на температурный режим и промерзание почвы. В малоснежную тёплую зиму глубина промерзания была значительно больше, чем в холодную с высоким снежным покровом [1], [11], [13], [16].

Снежный покров в Новгородской области появляется в течение декабря. В то же время наблюдались зимы, когда снежный покров устанавливался в середине или в конце января. Высота снежного покрова всецело зависит от устойчивости отрицательных температур и количества осадков на зимний период. Средняя высота из наибольших декадных высот снежного покрова на защищённых от ветра местах колеблется от 20 см на юго-западе до 45 см на северо-востоке. На открытых полях и лугах высота снежного покрова на 5—10 см меньше. В таблице 5 приведены данные по высоте снежного покрова.

В отдельные годы могут наблюдаться значительные отклонения от средней многолетней высоты снежного покрова. Данные таблицы 5 показывают, в каких пределах может колебаться высота снежного покрова.

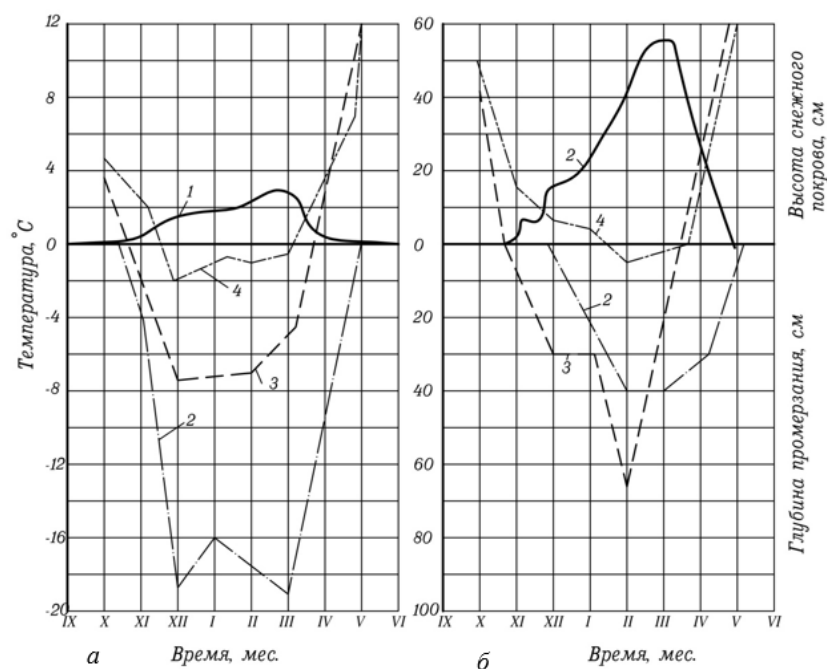
Снеготаяние начинается в начале марта, а к концу марта уже на всей территории Новгородской области устойчивый снежный покров разрушается. Число дней со снежным покровом в среднем за зиму составляет 70—90 дней.

Плотность снега постепенно увеличивается в течение зимы от 0,10—0,15 г/см<sup>3</sup> в начале до 0,30—0,40 г/см<sup>3</sup> в конце зимы.

**Таблица 5.** Наибольшая за зиму декадная высота снежного покрова различной обеспеченности

**Table 5.** The highest ten-day height of snow cover of various levels of coverage during the winter

Средняя, см	Минимум, см	Обеспеченность высоты указанной и большей, %							Максимум, см
		95	92	75	50	25	10	5	
45	15	18	22	32	45	58	73	78	90
40	12	15	18	27	40	51	66	73	85
35	9	12	15	23	34	46	60	67	80
30	6	9	12	19	29	39	53	60	72
25	5	6	9	15	24	33	45	52	63
20	3	4	7	11	19	27	37	42	50
15	2	2	5	8	14	22	18	32	37
10	1	1	3	4	8	15	19	20	25



**Рисунок.** Глубина промерзания почвы: а — в малоснежную зиму; б — в многоснежную зиму; 1 — высота снежного покрова; 2 — глубина промерзания; 3 — температура воздуха; 4 — температура почвы

**Figure 1.** The depth of soil freezing a) – during dry winter; b) – during snowy winter; 1 – the height of the snow cover; 2 - the depth of freezing; 3 – air temperature; 4 – soil temperature

Представляет интерес запас воды в снежном покрове, т. к. он оказывает существенное влияние на влажность грунтов и дорожно-строительных материалов. В результате обработки многолетних данных метеостанций разработана схематическая карта распределения запаса воды в снежном покрове по территории области. В лесу и на лесных полянах запас воды в снегу обычно больше на 15—40 мм, чем в поле [2—6], [14]. Запас воды в снегу от года к году может значительно меняться.

### 3. Результаты

Атмосферные осадки на территории Новгородской области выпадают неравномерно, т. к. на их распределение большое влияние оказывают не только общециркуляционные факторы, но и высота места, форма рельефа, наличие лесных массивов, водоёмов и речных долин. С высотой увеличивается и количество осадков. Их количество уменьшается с северо-запада на юго-восток [13], [15], [16].

В Новгородской области в среднем за год выпадает от 540 до 700 мм атмосферных осадков. В отдельные годы количество осадков значительно отклоняется от средних многолетних данных.

Для решения дорожных и транспортных задач необходимо знать вид осадков. В среднем за год доля осадков, выпадающих в твёрдом виде, колеблется от 10 % на юго-западе до 15 % на востоке, в жидком — от 80 % на юго-западе до 70 % на востоке; смешанные осадки (мокрый снег со льдом) по всей территории составляют 12—13 %. Число дней с осадками различного вида распределяется несколько по-другому. На долю осадков в твёрдом виде приходится 20—30 %, в жидком виде — 55—65 % и смешанном — 10—15 % от годового числа дней с осадками. Общая продолжительность осадков за год колеблется на территории от 1000—1100 ч на юге до 1300 ч на севере.

### 4. Обсуждение и заключение

Из вышеизложенного следует, что климатические условия Новгородской области, определяющие мягкий климат с большим количеством осадков, частыми оттепелями зимой и затяжными дождями весной и осенью, создают неблагоприятные условия для нормального протекания водно-тепловых процессов в грунтах земляного полотна и дорожных одеждах лесовозных автомобильных дорог. Переувлажнение грунтов земляного полотна приводит к уменьшению прочности дорожных одежд, которые под действием лесовозных автопоездов частично или полностью разрушаются. Для улучшения протекания водно-тепловых процессов необходимо предусматривать инженерные мероприятия, способствующие регулированию как водного, так и температурного режимов дорожных конструкций.

## Список литературы

1. Методика определения влияния природных факторов на стоимость строительства земляного полотна лесовозных дорог / Д. В. Бурмистров [и др.] // Системы. Методы. Технологии. 2016. № 2 (30). С. 179—184.
2. Гусев Ю. В. Проектирование структуры информационного обеспечения лесовозного автомобильного транспорта // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2016. № 217. С. 131—141.
3. Комплексные экспериментальные исследования изменения параметров и характеристик дорожных условий, транспортных потоков и режимов движения под влиянием климата и погоды / Ю. А. Зеликова [и др.] // Лесотехнический журнал. 2018. Т. 8, № 2 (30). С. 156—168. DOI: 10.12737/article\_5b240611858af4.37544962.
4. Исследования по использованию укрепленных грунтов, местных материалов и отходов промышленности для строительства дорожных одежд лесовозных дорог / А. А. Камусин [и др.]. Saint-Louis, Missouri, USA: Science and Innovation Center Publishing House, 2017. 184 с.
5. Влияние погодно-климатических факторов на системы комплекса «водитель — автомобиль — дорога — среда» / В. Г. Козлов [и др.] // Транспорт. Транспортные сооружения. Экология. 2019. № 1. С. 30—36.
6. Котляров Р. Н. Теоретическое обоснование условий безопасности движения лесовозных автопоездов в автомобильных потоках // Лесотехнический журнал. 2011. № 2. С. 41—44.
7. Методологическое обоснование особенностей проектирования трассы по методу опорных элементов / В. С. Логойда [и др.] // Фундаментальные исследования. 2016. № 12-1. С. 62—68.
8. Ломакин Д. В., Микова Е. Ю. Оценка влияния на скорость движения постоянных параметров плана и профиля при различных состояниях поверхности дороги // Лесной вестник. 2017. Т. 21, № 6. С. 43—49. DOI: 10.18698/2542-1468-2017-6-43-49.
9. Рябова О. В. Воздействие автодорожного комплекса на окружающую среду: состояние и прогноз // Научный вестник Воронежского ГАСУ: Материалы межрегионал. научно-практич. конф. «Высокие технологии в экологии». 2010. № 1. С. 170—174.
10. Рябова О. В. Проектирование энергосберегающих конструкций автомобильных дорог // Информационные технологии моделирования и управления. 2008. № 1 (44). С. 106—113.
11. Сиденко В. М., Батраков О. Т., Леушин А. И. Технология строительства автомобильных дорог. Ч. 2. Технология строительства дорожных одежд. Киев: Вища школа, 1970. 230 с.
12. Chernyshova E. V., Mogutnov R. V., Levushkin D. M. Mathematical modeling of damage function when attacking file server // Paper presented at the Journal of Physics: Conference Series. 2018. No. 1015 (3). DOI: 10.1088/1742-6596/1015/3/032069.
13. Gulevsky V. A., Logoyda V. S., Menzhulova A. S. Method of individual forecasting of technical state of logging machines // Paper presented at the IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018. No. 327 (4). DOI: 10.1088/1757-899X/327/4/042056.
14. Development of the method for individual forecasting of technical state of logging machines / V. S. Logoyda, P. V. Tikhomirov, V. A. Zelikov [et al.] // International Journal of Engineering and Advanced Technology. 2019. № 8 (5). P. 2178—2183.
15. Dorokhin S. V., Chernyshova E. V. Mathematical model of statistical identification of car transport informational provision // ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. 2017. Vol. 12, no. 2. P. 511—515.



16. Enhancing quality of road pavements through adhesion improvement / S. I. Sushkov, I. N. Kruchinin, I. V. Grigorev [et al.] // Journal of the Balkan Tribological Association. 2019. No. 25 (3). P. 678—694.

## References

1. Burmistrov D. V. [et al.]. Methodology for determining the influence of natural factors on the cost of construction of subgrade timber roads. *Systems. Methods. Technology*, 2016, no. 2 (30), pp. 179—184. (In Russ.)
2. Gusev Yu. V. Designing the structure of information support for timber road transport. *Proceedings of the St. Petersburg Forestry Academy*, 2016, no. 217, pp. 131—141. (In Russ.)
3. Zelikova Yu. A. [et al.]. Kompleksnye eksperimental'nye issledovaniya izmeneniya parametrov i kharakteristik dorozhnykh usloviyakh, vehicular flow i rezhimov dvizheniya pod vliyanie klimata i weatera [Comprehensive experimental studies of changes in the parameters and characteristics of road conditions, traffic flows and traffic regimes under the influence of climate and weather]. *Forestry journal*, 2018, vol. 8, no. 2 (30), pp. 156—168. doi: 10.12737/article\_5b240611858af4.37544962. (In Russ.)
4. Kamusin A. A. [et al.]. *Research on the use of reinforced soils, local materials and industrial waste for the construction of road pavements for logging roads*. Saint-Louis, Missouri, USA, Science and Innovation Center Publishing House, 2017. 184 p. (In Russ.)
5. Kozlov V. G. [et al.]. Influence of weather and climatic factors on the systems of the complex «driver — car — road — environment». *Transport. Transport facilities. Ecology*, 2019, no. 1, pp. 30—36. (In Russ.)
6. Kotlyarov R. N. Theoretical substantiation of traffic safety conditions for logging road trains in automobile flows. *Forestry journal*, 2011, no. 2, pp. 41—44. (In Russ.)
7. Logoida V. S. [et al.]. Methodological substantiation of the design features of the route according to the method of supporting elements. *Fundamental research*, 2016, no. 12-1, pp. 62—68. (In Russ.)
8. Lomakin D. V., Mikova E. Yu. Evaluation of the influence on the speed of movement of constant parameters of the plan and profile under various conditions of the road surface. *Forest Bulletin*, 2017, vol. 21, no. 6, pp. 43—49. doi: 10.18698/2542-1468-2017-6-43-49. (In Russ.)
9. Ryabova O. V. The impact of the road complex on the environment: state and forecast. *Scientific Bulletin of the Voronezh GASU: Materials of interregional. scientific-practical. conf. «High technologies in ecology»*, 2010, no. 1, pp. 170—174. (In Russ.)
10. Ryabova O. V. Design of energy-saving structures of automobile roads. *Information technologies of modeling and management*, 2008, no. 1 (44), pp. 106—113. (In Russ.)
11. Sidenko V. M., Batrakov O. T., Leushin A. I. *Road construction technology. Part 2. Construction technology of pavements*. Kyiv, Vishcha school, 1970. 230 p. (In Russ.)
12. Chernyshova E. V., Mogutnov R. V., Levushkin D. M. Mathematical modeling of damage function when attacking file server. *Paper presented at the Journal of Physics: Conference Series*, 2018, no. 1015 (3). doi: 10.1088/1742-6596/1015/3/032069.
13. Gulevsky V. A., Logoyda V. S., Menzhulova A. S. Method of individual forecasting of technical state of logging machines. *Paper presented at the IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2018, no. 327 (4). doi: 10.1088/1757-899X/327/4/042056.

14. Logoyda V. S., Tikhomirov P. V., Zelikov V. A. [et al.]. Development of the method for individual forecasting of technical state of logging machines. *International Journal of Engineering and Advanced Technology*, 2019, no. 8 (5), pp. 2178—2183.
15. Dorokhin S. V., Chernyshova E. V. Mathematical model of statistical identification of car transport informational provision. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*, 2017, vol. 12, no. 2, pp. 511—515.
16. Sushkov S. I., Kruchinin I. N., Grigorev I. V. [et al.]. Enhancing quality of road pavements through adhesion improvement. *Journal of the Balkan Tribological Association*, 2019, no. 25 (3), pp. 678—694.

© Сапелкин Р. С., Меерсон В. Э., Меерсон М. В., Скрыпников А. В., Казачек М. Н., 2022

DOI: 10.15393/j2.art.2023.6363

УДК 629.015/62-94

Статья

## **Анализ боковых реакций почвы на колёсах трактора при повороте**

**Беляев Александр Николаевич**

*доктор технических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I» (Российская Федерация),  
[aifkm\\_belyaev@mail.ru](mailto:aifkm_belyaev@mail.ru)*

**Тришина Татьяна Владимировна**

*кандидат технических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I» (Российская Федерация),  
[t.v.trishina@gmail.com](mailto:t.v.trishina@gmail.com)*

**Афоничев Дмитрий Николаевич**

*доктор технических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I» (Российская Федерация),  
[dmafonichev@yandex.ru](mailto:dmafonichev@yandex.ru)*

*Получена: 24 апреля 2023 / Принята: 12 сентября 2022 / Опубликовано: 16 сентября 2022*

---

**Аннотация:** Задачей проведённых исследований явилось аналитическое определение боковых реакций на колёсах трактора со стороны опорной поверхности на участках «вход в поворот» и «установившийся поворот» кругового беспетлевого поворота. Объекты исследований: навесной комбинированный широкозахватный агрегат КРШ-8,1 + НП-5,4 + ЛТЗ-155 + ССТ-18 и кинематические способы поворота трактора (передние управляемые колёса; передние и задние управляемые колёса — поворот их относительно остова в разные стороны). Расчёт выполнен численной реализацией математической модели криволинейного движения машинно-тракторного агрегата в интерактивной среде программирования Matlab/Simulink. При расчётах принято, что переход от прямолинейного движения на траекторию большой кривизны совершается при одном и том же законе равномерного вращения рулевого колеса и, следовательно, при том же законе поворота управляемых колёс. Установлено

отрицательное влияние поворота задних колёс на управляемость и устойчивость движения машинно-тракторного агрегата: с одной стороны, при способе поворота четырьмя управляемыми колёсами мгновенный радиус поворота уменьшается, но интенсивность и величина отклонения его от заданной траектории движения увеличиваются. Боковая сила увеличивается также при повышении скорости движения за счёт роста центробежной силы инерции и момента сопротивления повороту вследствие более интенсивного динамического воздействия микропрофиля опорной поверхности. В простейшем случае, когда направляющими являются колёса только переднего моста, величина боковой реакции, приходящейся на его колёса, при входе в поворот со скоростью движения 0,68 м/с выше в 6,6—8,8 раза, чем на колёса задней оси, а со скоростью 1,37 м/с — в 2,0—2,3 раза. При всех управляемых колёсах получены следующие результаты: при скорости 0,68 м/с — 1,16—1,20 раза, при 1,37 м/с — 1,50—1,52 раза. Полученный характер изменения боковых реакций и перераспределения их по осям трактора обусловлен величинами и соотношениями касательных сил тяги, сил сопротивления качению и вертикальных сил на колёсах, условиями их качения, изменением положения центра тяжести машинно-тракторного агрегата, ускорений вертикальных колебаний и геометрических характеристик поворота. Более равномерное распределение боковых сил по мостам трактора при входе в поворот всеми управляемыми колёсами способствует лучшей управляемости и устойчивости агрегата, несмотря на то, что вертикальная нагрузка, приходящаяся на передний мост, в 1,56—1,63 раза выше, чем на задний, во всех вариантах расчёта. При этом создаются наиболее благоприятные условия качения колёс и реализации силы тяги. Таким образом, рациональным с точки зрения создания наиболее благоприятных условий для улучшения управляемости и повышения устойчивости движения при повороте является применение способа поворота передними и задними колёсами на всех этапах кругового беспетлевого поворота.

**Ключевые слова:** трактор, вход в поворот, установившийся поворот, сила инерции, боковая реакция

---

DOI: 10.15393/j2.art.2023.6363

Article

## Analysis of lateral reactions of soil on tractor wheels when turning

**Alexander Belyaev**

*D. Sc. in engineering, associate professor, Federal State Budget Education Institution of Higher Education «Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great» (Russian Federation), [aifkm\\_belyaev@mail.ru](mailto:aifkm_belyaev@mail.ru)*

**Tatiana Trishina**

*Ph. D. in engineering, associate professor, Federal State Budget Education Institution of Higher Education «Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great» (Russian Federation), [t.v.trishina@gmail.com](mailto:t.v.trishina@gmail.com)*

**Dmitry Afonichev**

*D. Sc. in engineering, professor, Federal State Budget Education Institution of Higher Education «Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great» (Russian Federation), [dmafonichev@yandex.ru](mailto:dmafonichev@yandex.ru)*

*Received: 24 April 2023 / Accepted: / Published:*

---

**Abstract:** The objective of the research was to determine lateral reactions on tractor wheels from the side of the support surface in the "entrance to the turn" and "steady turn" sections of the circular loop-free turn. The objects of research included a mounted combined broad-cut unit KRSH-8,1+NP-5,4+LTZ-155+SST-18 and kinematic ways of turning the tractor (front steerable wheels; front and rear steerable wheels when turning relative to the frame in different directions). The calculation was performed by using a mathematical model of the curvilinear motion of a machine-tractor unit in an interactive programming environment Matlab/Simulink. It was assumed that the transition from rectilinear motion to a trajectory of great curvature followed the same law of uniform rotation of the steering wheel and, consequently, the same law of rotation of the steering wheels. The authors have established the negative effect of turning the rear wheels on the controllability and stability of the movement of the machine-tractor unit. When turning four controlled wheels, the instantaneous turning radius decreases, but the intensity and magnitude of its deviation from the specified trajectory of movement increase. The lateral force also increases with an increase in the speed of movement due to an increase in the centrifugal force of inertia and the moment of resistance to rotation due to a more intense dynamic effect of the micro profile of the support surface. In the

simplest case, when the wheels of the front axle are the guides, the magnitude of the lateral reaction occurring on its wheels when entering a turn at a speed of 0.68 m / s is 6.6...8.8 times higher than on the wheels of the rear axle, and at a speed of 1.37 m / s it is 2.0... 2.3 times higher . With all steerable wheels the following results were obtained: at a speed of 0.68 m/s it was 1.16...1.20 times and at 1.37 m/s it was 1.50 ...1.52 times higher. The resulting character of the change in lateral reactions and their redistribution along the tractor axes is due to the values and ratios of tangential traction forces, rolling resistance forces and vertical forces on the wheels, their rolling conditions, changes in the position of the center of gravity of the machine-tractor unit, accelerations of vertical vibrations and geometric characteristics of turning. In all calculation options a more uniform distribution of lateral forces across the tractor axles when entering a turn with all controlled wheels obviously contributes to better controllability and stability of the unit, despite the fact that the vertical load on the front axle is 1.56...1.63 times higher than on the rear. At the same time the most favorable conditions of rolling wheels and realization of traction force occur. Thus, it is not advisable to control the tractor only with the front wheels when turning with frontal aggregation. Therefore, it is reasonable to use the method of turning the front and rear wheels at all stages of a circular loop-free turn to create the most favorable conditions for improving controllability and increasing the stability of movement on turns.

**Keywords:** tractor, turn entry, steady turn, inertia force, lateral reaction

---

## 1. Введение

При повороте на колёсную машину всегда действуют боковые силы, и в тех случаях, когда боковая реакция на её колёсах со стороны опорной поверхности не может им противодействовать, происходит боковой увод шин колёс, их скольжение и занос [1], [2].

С целью выявления основных закономерностей изменения боковых сил на колёсах трактора при криволинейном движении в настоящей работе рассмотрим, каков общий характер их изменения и перераспределения по мостам при входе в поворот — в процессе увеличения кривизны траектории и при установившемся повороте — при движении по траектории с постоянной кривизной и скоростью. Принимая, что траектория движения трактора на участке «выход из поворота» абсолютно «зеркальная», полученная для входа в поворот, и т. к. при этом происходит переход от более динамически нагруженного состояния к менее нагруженному, то исследования в данном направлении на указанном этапе поворота, как правило, не проводятся [3].

При определении боковых сил и реакций, действующих на трактор, сложно выделить те или иные определяющие факторы, формирующие их, надо учитывать практически все действующие силы и моменты. Известно, что на величины, направления, интенсивность изменения, характер перераспределения боковых реакций осей трактора в общем случае его криволинейного движения наиболее существенное влияние оказывают следующие основные факторы [4], [5]:

1. Скорость движения  $V$  трактора и радиус поворота  $R$ , определяющие величину нормальной составляющей силы инерции  $F_u$ , приложенной в центре тяжести и распределяемой пропорционально массам, приходящимся на соответствующую ось.

2. Ускорение трактора.

3. Максимальный угол поворота  $\alpha_{\max}$  и угловая скорость поворота управляемых колёс.

4. Момент сопротивления повороту, вызванный, в основном, разностью касательных сил тяги колёс бортов трактора и обусловленный, главным образом, характеристиками межколёсной и межосевой связей.

5. Продольная реакция колёс осей.

Известно [4], [5], что при малых рабочих скоростях движения на повороте основное влияние на формирование величины боковой реакции  $P_b$  почвы на колёсах оказывает момент сопротивления повороту, являющийся функцией разностей касательных сил тяги бортов трактора, а при высоких скоростях — результирующая боковой составляющей силы инерции, в основном центробежной.

При входе в поворот сцепление колёс с почвой, как в поперечном, так и продольном направлениях с уменьшением радиуса поворота и увеличением скорости движения, резко уменьшается, что оказывает негативное влияние не только на его кинематику, но и на динамику, в т. ч. при этом возрастают силы инерции и снижаются величины суммарной боковой реакции почвы  $P_b$  и осложняется характер перераспределения их по осям и бортам [6]. Под действием силы инерции происходит перераспределение боковых реакций

между внутренними и наружными колёсами, т. е. между бортами, и в вертикально-продольной плоскости — между колёсами осей ( $P_b = P_{b1} + P_{b2}$ , где  $P_{b1}$  — боковая реакция со стороны опорной поверхности на колёсах передней оси трактора, Н;  $P_{b2}$  — боковая реакция со стороны опорной поверхности на колёсах задней оси трактора, Н). Неравномерное распределение боковых сил по осям может привести не только к уводу и скольжению, но и заносу задней оси [7], [8].

Исходя из вышеизложенного, задачей проведённых исследований явилось аналитическое определение боковых реакций на колёсах трактора со стороны опорной поверхности на участках «вход в поворот» и «установившийся поворот» кругового беспетлевого поворота.

## 2. Материалы и методы

Объекты исследований: навесной комбинированный широкозахватный агрегат КРШ-8,1+НП-5,4+ЛТЗ-155+ССТ-18 и кинематические способы поворота трактора (передние управляемые колёса; передние и задние управляемые колёса — поворот их относительно остова в разные стороны) [3]. Расчёт выполнен численной реализацией математической модели криволинейного движения машинно-тракторного агрегата (МТА) в интерактивной среде программирования Matlab/Simulink [9—11].

При расчётах принято, что переход от прямолинейного движения на траекторию большой кривизны совершается при одном и том же законе равномерного вращения рулевого колеса:  $\varphi = \omega t$ , где  $\omega$  — угловая скорость вращения рулевого колеса,  $t$  — время поворота рулевого колеса от нейтрального положения (угол поворота  $\varphi = 0$ ) до  $\varphi = \varphi_{max}$  (время входа в поворот) и, следовательно, при том же законе поворота управляемых колёс.

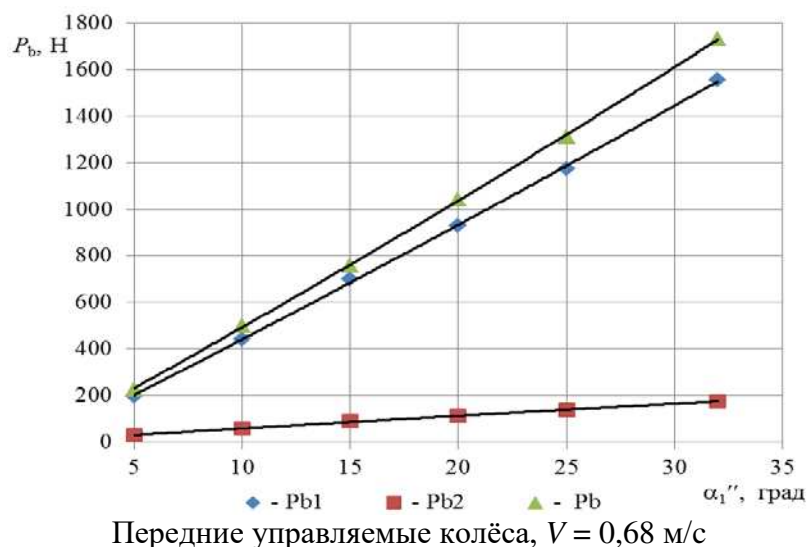
## 3. Результаты

В работе [12] получены расчётные значения величин боковых реакций со стороны деформируемой почвы на колёса трактора при входе в круговой беспетлевой поворот и установлена их взаимосвязь с инерционными силами. Выявлено, что на участке «вход в поворот» происходит наиболее заметное отклонение от теоретической траектории движения, именно на этом этапе поворота наблюдается значительная потеря устойчивости и управляемости из-за бокового увода и скольжения колёс под решающим влиянием на этот негативный процесс боковых сил. Величины и характер изменения расчётных значений силы инерции позволили сделать вывод, что при этом она оказывает значительное влияние на формирование боковых реакций и, следовательно, на изменение траектории криволинейного движения.

Как выявлено в результате расчётов, при совершении манёвра передними и задними управляемыми колёсами центробежная сила инерции выше в 1,8—2,0 раза, чем при повороте передними управляемыми колёсами, что обуславливает увеличение боковой реакции на колёсах (рисунки 1—4). Как следствие, отклонение от заданной траектории движения

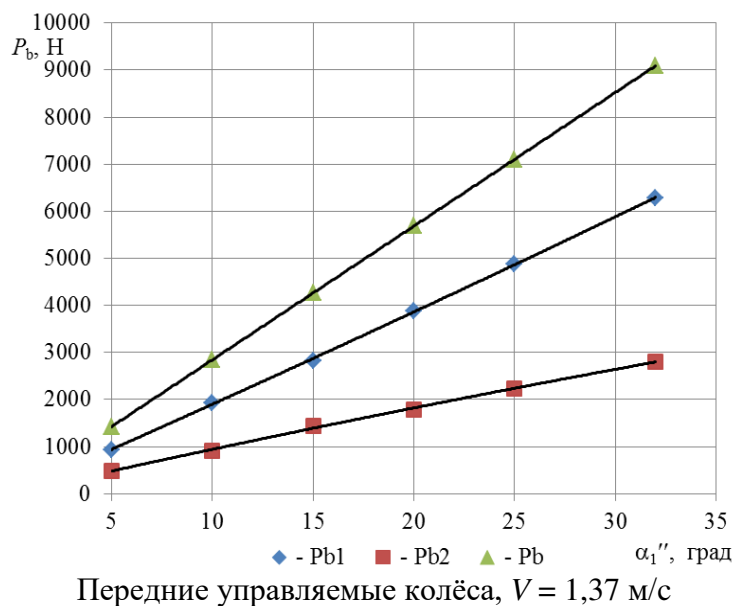


при этом происходит значительнее ввиду более интенсивного роста мгновенного радиуса поворота.



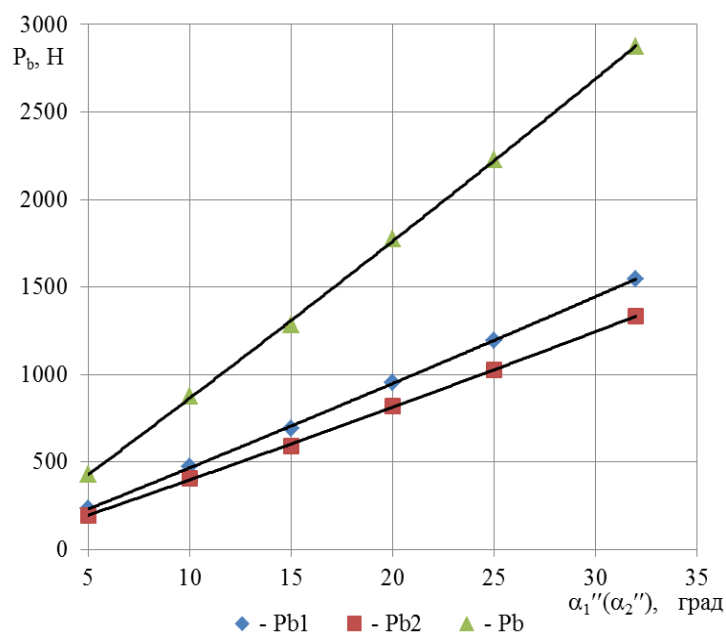
**Рисунок 1.** Зависимости боковой реакции от угла поворота внутреннего управляемого колеса

**Figure 1.** The dependence of the lateral reaction on the angle of rotation of the internal controlled wheel



**Рисунок 2.** Зависимости боковой реакции от угла поворота внутреннего управляемого колеса

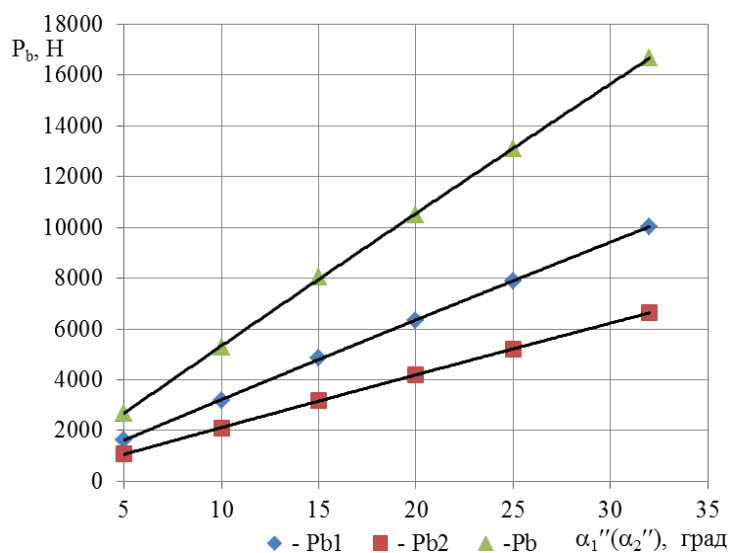
**Figure 2.** The dependence of the lateral reaction on the angle of rotation of the internal controlled wheel



Передние и задние управляемые колёса,  $V = 0,68$  м/с

**Рисунок 3.** Зависимости боковой реакции от углов поворота внутренних управляемых колёс

**Figure 3.** The dependence of the lateral reaction on the angles of rotation of the internal controlled wheels

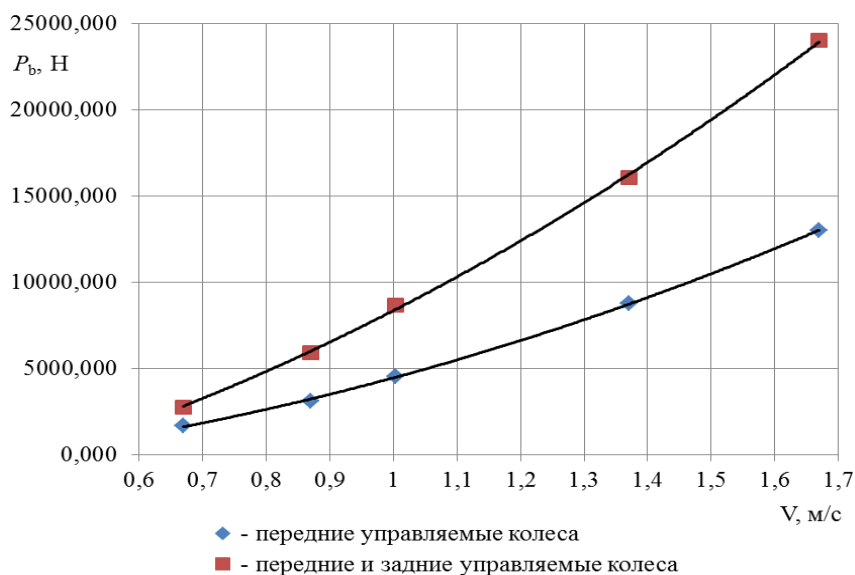


Передние и задние управляемые колёса,  $V = 1,37$  м/с

**Рисунок 4.** Зависимости боковой реакции от углов поворота внутренних управляемых колёс

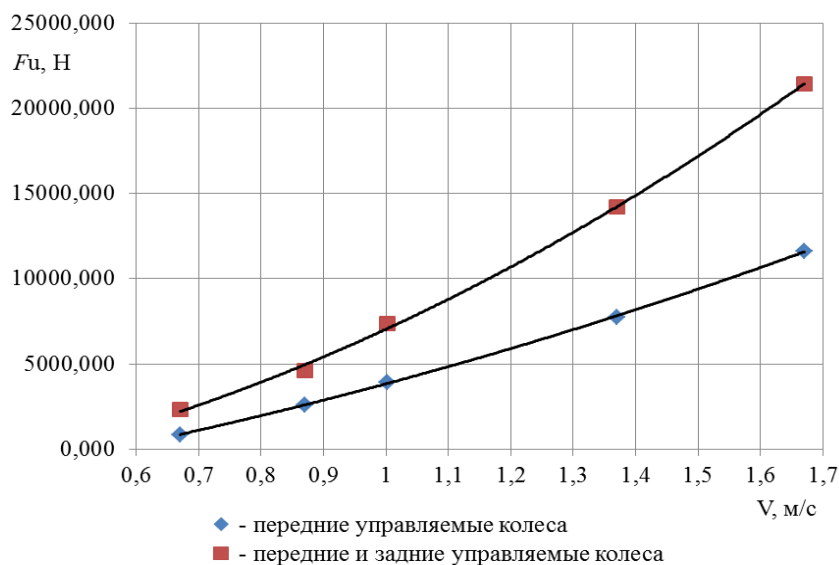
**Figure 4.** The dependence of the lateral reaction on the angles of rotation of the internal controlled wheels

При установившемся режиме поворота значения боковых реакций с увеличением скорости движения МТА по всем вариантам способов поворота возрастают (рисунок 5) вследствие изменения характера и возрастания частоты динамического воздействия микропрофиля опорной поверхности на колёса трактора, центробежной силы инерции (рисунок 6) и крутящих моментов (рисунок 7).



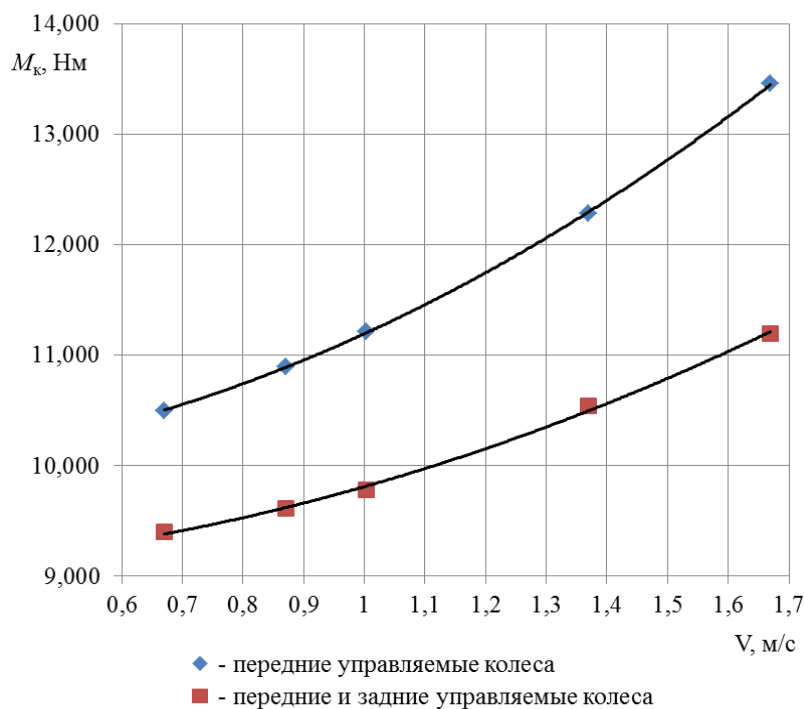
**Рисунок 5.** Зависимости боковой реакции от скорости движения

**Figure 5.** The dependence of the lateral reaction on the speed of movement



**Рисунок 6.** Зависимости силы инерции от скорости движения

**Figure 6.** The dependence of the inertia force on the speed of movement



**Рисунок 7.** Зависимости крутящих моментов от скорости движения

**Figure 7.** Dependence of torques on the speed of movement

#### 4. Обсуждение и заключение

Установлено отрицательное влияние поворота задних колёс на управляемость и устойчивость движения МТА: с одной стороны, при способе поворота четырьмя управляемыми колёсами мгновенный радиус поворота уменьшается, но интенсивность и величина отклонения его от заданной траектории движения увеличиваются.

Боковая сила увеличивается также при повышении скорости движения за счёт роста центробежной силы инерции и момента сопротивления повороту вследствие более интенсивного динамического воздействия микропрофиля опорной поверхности.

В простейшем случае, когда направляющими являются колёса только переднего моста, величина боковой реакции, приходящейся на его колёса, при входе в поворот со скоростью движения  $V = 0,68$  м/с выше в 6,6—8,8 раза, чем на колёса задней оси (см. рисунок 1), а со скоростью  $v = 1,37$  м/с — в 2,0—2,3 раза (см. рисунок 2). При всех управляемых колёсах получены следующие результаты: при  $V = 0,68$  м/с — 1,16—1,20 раза (см. рисунок 3), при  $V = 1,37$  м/с — 1,50—1,52 раза (рисунок 4).

Полученный характер изменения боковых реакций и перераспределения их по осям трактора обусловлен величинами и соотношениями касательных сил тяги, сил сопротивления качению и вертикальных сил на колёсах, условиями их качения, изменением положения центра тяжести МТА, ускорений вертикальных колебаний и геометрических характеристик поворота.

Более равномерное распределение боковых сил по мостам трактора при входе в поворот всеми управляемыми колёсами, очевидно, способствует лучшей управляемости и устойчивости МТА, несмотря на то, что вертикальная нагрузка, приходящаяся на передний мост, в 1,56—1,63 раза выше, чем на задний, во всех вариантах расчёта. При этом создаются наиболее благоприятные условия качения колёс и реализации силы тяги. Таким образом, управление трактором только передними колёсами на повороте при фронтальном агрегатировании не целесообразно.

Сравнение зависимостей боковой реакции  $P_b$  и силы инерции  $F_u$  на установившемся участке поворота (см. рисунки 5 и 6) показывает, что значения  $F_u$  всего на 12—18 % ниже  $P_b$  по всем вариантам расчётов, что позволяет сделать вывод о её самодостаточности для определения боковой реакции. При этом величины боковой реакции при повороте всеми колёсами на рассматриваемом участке примерно в 1,8 раза больше, а крутящие моменты на колёсах трактора — на 10—16 % выше в сравнении со способом поворота передними колёсами (рисунок 7).

Таким образом, рациональным с точки зрения создания наиболее благоприятных условий для улучшения управляемости и повышения устойчивости движения при повороте является применение способа поворота передними и задними колёсами на всех этапах кругового беспетлевого поворота.

## Список литературы

1. *Troyanovskaya I. P., Voinash S. A.* Model for stationary turn of an arbitrary vehicle // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Electronic Edition. 2018. P. 032035. Available at: <http://iopscience.iop.org/volume/1757-899X/450>. Text. Image: electronic.
2. *Troyanovskaya I. P., Pozin B. M., Noskov N. K.* Ploughing tractor lateral withdrawal model // Procedia Engineering. Сер. «International Conference on Industrial Engineering, ICIE 2017». 2017. P. 1540—1546. Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705817353596>. Text. Image: electronic.
3. Determination of theoretical path of vehicle motion upon cornering / A. N. Belyaev, T. V. Trishina, V. P. Shatsky, V. G. Kozlov, I. A. Vysotskaya // Journal of Applied Science and Engineering (Taiwan). 2022. Vol. 25, no. 5. P. 741—747. Available at: <http://jase.tku.edu.tw/articles/jase-202210-25-5-0004>. Text. Image: electronic.
4. *Носков Н. К., Позин Б. М., Трояновская И. П.* Математическая модель бокового увода трактора // Известия МГТУ МАМИ. 2017. № 1 (31). С. 35—39.
5. *Носков Н. К., Трояновская И. П., Титов С. А.* Математическая модель силового взаимодействия колеса с грунтом при повороте машины // Вестник ЮУрГУ. 2017. Т. 17, № 3. С. 5—15. DOI: 10.14529/engin170301.
6. *Жилейкин М. М.* Исследование автоколебательных процессов в зоне взаимодействия эластичной шины с твёрдым опорным основанием // Известия вузов. Сер. Машиностроение. 2021. № 10. С. 3—15. URL: [http://izvuzmash.ru/catalog/mechanical/mach\\_scienc/1883.html](http://izvuzmash.ru/catalog/mechanical/mach_scienc/1883.html). Текст : электронный.
7. *Antonyan A., Zhileykin M., Eranosyan A.* The algorithm of diagnosing the development of a skid when driving a two-axle vehicle // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Design Technologies for Wheeled and Tracked Vehicles, MMBC. 2020.

- P. 012003. Available at: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757899X/820/1/012003/pdf>. Text. Image: electronic.
8. Zhileykin M., Eranosyan A. Method of torque distribution between the axles and the wheels of the rear axle to improve the manageability of two-axle all-wheel drive vehicles // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Design Technologies for Wheeled and Tracked Vehicles, MMBC*. 2019. 2020. P. 012008. Available at: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/820/1/012008/pdf>. Text. Image: electronic.
  9. Сиротин П. В., Жилейкин М. М. Исследование динамики движения зерно- и кормоуборочных комбайнов методами математического и имитационного моделирования // *Тракторы и сельскохозяйственные машины*. 2019. № 1. С. 53—59.
  10. Field R. V., Hurtago E. J. Modeling of dynamic forces of a tractor in the MATLAB-simulink program environment. New York: Society of Automotive Engineers, 2003. 112 p.
  11. Klee H., Allen R. Simulation of Dynamic Systems with MATLAB and Simulink. Taylor & Francis Group, LLC, 2018. 853 p. Available at: <https://doi.org/10.1201/9781315154176>. Text. Image: electronic.
  12. Исследование движения колёсной машины по криволинейной траектории / А. Н. Беляев, Т. В. Тришина, А. Е. Новиков, Ю. В. Дяченко, И. А. Высоцкая // *Вестник Воронежского государственного аграрного университета*. 2021. Т. 14, № 4 (71). С. 21—29.

## References

1. Troyanovskaya I. P., Voinash S. A. Model for stationary turn of an arbitrary vehicle. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Electronic Edition*, 2018, pp. 032035. Available at: <http://iopscience.iop.org/volume/1757-899X/450>. Text. Image: electronic.
2. Troyanovskaya I. P., Pozin B. M., Noskov N. K. Ploughing tractor lateral withdrawal model. *Procedia Engineering. CEP. «International Conference on Industrial Engineering, ICIE 2017»*, 2017, pp. 1540—1546. Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705817353596>. Text. Image: electronic.
3. Belyaev A. N., Trishina T. V., Shatsky V. P., Kozlov V. G., Vysotskaya I. A. Determination of theoretical path of vehicle motion upon cornering. *Journal of Applied Science and Engineering (Taiwan)*, 2022, vol. 25, no. 5, pp. 741—747. Available at: <http://jase.tku.edu.tw/articles/jase-202210-25-5-0004>. Text. Image: electronic.
4. Noskov N. K., Pozin B. M., Troyanovskaya I. P. Matematicheskaya model' bokovogo uvoda traktora. *Izvestiya MGTU MAMI*, 2017, no. 1 (31), pp. 35—39. (In Russ.)
5. Noskov N. K., Troyanovskaya I. P., Titov S. A. Matematicheskaya model' silovogo vzaimodejstviya koleasa s gruntom pri povorote mashiny. *Vestnik YUUrGU*, 2017, vol. 17, no. 3, pp. 5—15. doi: 10.14529/engin170301. (In Russ.)
6. Zhilejkin M. M. Issledovanie avtokolebatel'nyh processov v zone vzaimodejstviya elastichnoj shiny s tverdyim opornym osnovaniem. *Izvestiya VUZov. Ser. Mashinostroenie*, 2021, no. 10, pp. 3—15. Available at: [http://izvuzmash.ru/catalog/mechanical/mach\\_scienc/1883.html](http://izvuzmash.ru/catalog/mechanical/mach_scienc/1883.html). Text. Image: electronic (In Russ.)
7. Antonyan A., Zhileykin M., Eranosyan A. The algorithm of diagnosing the development of a skid when driving a two-axle vehicle. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Design Technologies for Wheeled and Tracked Vehicles, MMBC*, 2020, pp. 012003. Available at: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757899X/820/1/012003/pdf>. Text. Image: electronic.

8. Zhileykin M., Eranosyan A. Method of torque distribution between the axles and the wheels of the rear axle to improve the manageability of two-axle all-wheel drive vehicles. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Design Technologies for Wheeled and Tracked Vehicles, MMBC. 2019, 2020*, pp. 012008. Available at: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/820/1/012008/pdf>. Text. Image: electronic.
9. Sirotin P. V., Zhilejkin M. M. Issledovanie dinamiki dvizheniya zerno- i kormouborochnyh kombajnov metodami matematicheskogo i imitacionnogo modelirovaniya. *Traktory i sel'skohozyajstvennyye mashiny*, 2019, no. 1, pp. 53—59. (In Russ.)
10. Field R. V., Hurtago E. J. *Modeling of dynamic forces of a tractor in the MATLAB-simulink program environment*. New York, Society of Automotive Engineers, 2003. 112 p.
11. Klee H., Allen R. *Simulation of Dynamic Systems with MATLAB and Simulink*. Taylor & Francis Group, LLC, 2018. 853 p. Available at: <https://doi.org/10.1201/9781315154176>. Text. Image: electronic.
12. Belyaev A. N., Trishina T. V., Novikov A. E., Dyachenko YU. V., Vysockaya I. A. Issledovanie dvizheniya kolesnoj mashiny po krivolinejnoj traektorii. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*, 2021, vol. 14, no. 4 (71), pp. 21—29. (In Russ.)

© Беляев А. Н., Тришина Т. В., Афоничев Д. Н., 2022

УДК 674\*02

DOI: 10.15393/j2.art.2022.6403

Статья

## **Математическое описание процесса движения сыпучего материала в горизонтальных барабанах непрерывного действия**

**Ильюшенко Дмитрий Александрович**

*кандидат технических наук, доцент, Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет им. С. М. Кирова (Российская Федерация), [diliium@yandex.ru](mailto:diliium@yandex.ru)*

**Локштанов Борис Моисеевич**

*кандидат технических наук, доцент, Военная академия связи им. Маршала Советского Союза С. М. Будённого (Российская Федерация), [blokshtanov@mail.ru](mailto:blokshtanov@mail.ru)*

**Орлов Виталий Владимирович**

*кандидат технических наук, Военная академия связи им. Маршала Советского Союза С. М. Будённого (Российская Федерация), [artictvetal1987@gmail.com](mailto:artictvetal1987@gmail.com)*

**Куницкая Ольга Анатольевна**

*доктор технических наук, профессор, Арктический государственный агротехнологический университет (Российская Федерация), [ola.ola07@mail.ru](mailto:ola.ola07@mail.ru)*

**Пелюхов Роман Владимирович**

*преподаватель, Военная академия связи им. Маршала Советского Союза С. М. Будённого (Российская Федерация), [sosиска007@rambler.ru](mailto:sosиска007@rambler.ru)*

**Швецова Виктория Викторовна**

*кандидат технических наук, доцент, Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет (Российская Федерация), [vikt.schvetzova2012@yandex.ru](mailto:vikt.schvetzova2012@yandex.ru)*

*Получена: 28 апреля 2022 / Принята: 16 сентября 2022 / Опубликовано: 21 сентября 2022*

---

**Аннотация:** В статье рассмотрен процесс перемещения единичной частицы, находящейся в сыпучей среде, которой частично заполнен горизонтально расположенный вращающийся барабан непрерывного действия. Учитывая, что степень заполнения сыпучего материала в барабане (сегмент заполнения) на входе в барабан больше степени заполнения материала на выходе из барабана, образуется наклонная плоскость из сыпучего материала, благодаря которой происходит



перемещение частицы вдоль продольной оси барабана. Приведено математическое описание процесса движения частицы сыпучего материала в горизонтальном вращающемся барабане. Установлено, что процесс движения частицы пульсирующий и описывается уравнением подъёма частицы по окружности (по цилиндру) вместе с сегментом заполнения и уравнением движения частицы по плоскости обрушения. Установлено, что за один цикл обрушения частица перемещается вдоль оси барабана по поверхности плоскости обрушения на величину следующего сечения, в котором степень заполнения будет меньше и начало координат движения частицы изменится. Параметры плоскости обрушения зависят от свойств материала (динамического угла обрушения), степени заполнения барабана материалом на входе и выходе, длины барабана. Математически описана пространственная линия обрушения частицы, находящейся на поверхности плоскости обрушения. В статье представлены формулы, описывающие траектории движения частицы сыпучего материала в барабане, и приведены рисунки, наглядно демонстрирующие эти траектории. На основе математического описания процесса и расчётов обосновано оптимальное заполнение барабана сыпучим материалом и предложены конструкции барабанов, поддерживающие оптимальные условия обработки сыпучего материала.

**Ключевые слова:** барабан, сыпучий материал, угол динамического откоса, линия обрушения

---

DOI: 10.15393/j2.art.2022.6403

Article

## Mathematical description of the process of bulk material movement in horizontal continuous drums

**Dmitrij Il'yushenko**

*Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, St. Petersburg State Forest Engineering University named after S. M. Kirov (Russian Federation), dilium@yandex.ru*

**Boris Lokshtanov**

*Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Military Academy of Communications named after Marshal of the Soviet Union S. M. Budyonny (Russian Federation), blokshtanov@mail.ru*

**Vitalij Orlov**

*Candidate of Technical Sciences, Military Academy of Communications named after Marshal of the Soviet Union S. M. Budyonny (Russian Federation), artictvetal1987@gmail.com*

**Olga Kunickaya**

*Doctor of Technical Sciences, Professor, Arctic State Agrotechnological University (Russian Federation), ola.ola07@mail.ru*

**Roman Pelyukhov**

*Educator, Military Academy of Communications named after Marshal of the Soviet Union S. M. Budyonny (Russian Federation), cocucka007@rambler.ru*

**Viktoriya Shvecova**

*Candidate of Technical Sciences, Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (Russian Federation), vikt.schvetzova2012@yandex.ru*

*Received: 28 April 2022 / Accepted: 16 September 2022 / Published: 21 September 2022*

---

**Abstract:** The article considers the process of moving a single particle in a bulk medium, which partially fills a horizontally placed rotating drum of continuous action. As the degree of the bulk material filling in the drum (filling segment) at the inlet to the drum is greater than that at the outlet of the drum, an inclined plane of bulk material is formed, through which the particle moves along the longitudinal axis of the drum. The mathematical description of the process of the bulk material particles moving in a horizontal rotating drum is given. It is established that the process of motion of a particle is pulsating. The process is described by the equation of a particle rise along a circle (along the cylinder) together with the filling segment and by the equation of a particle

motion along a rupture plane. It is found that during one period of rupture the particle moves along the drum axis along the surface of the rupture plane by the value of the next section, in which the degree of filling will decrease and the origin of coordinates of particle motion will change. Parameters of the rupture plane depend on material properties (dynamic rupture angle), on degree of the drum filling with the material at the inlet and outlet, on the length of the drum. The spatial line of a particle rupture located on the surface of the rupture plane is described mathematically. In the article the formulas describe the trajectories of the bulk material particles movement in the drum and the drawings visually demonstrate these trajectories. Mathematical description of the process and calculations justify the optimal filling of the drum with bulk material. The authors propose the design of the drums to ensure optimal conditions for bulk material treatment. The research was performed within the framework of the scientific school «Innovative developments in the field of logging industry and forestry».

**Keywords:** drum, loose material, dynamic slope angle, rupture line

---

## 1. Введение

Горизонтально расположенный барабан для обработки сыпучих веществ (сушка, измельчение, смешивание, сортирование и т. д.) обычно заполняют на 0,2—0,8 его объёма (сегмента заполнения в его сечении). Использование барабанных установок достаточно широко распространено в различных отраслях — пищевой, дорожной, горнорудной и др. [1], [2]. В лесном хозяйстве барабанные установки используются для обработки семян [3], [4], в лесной промышленности — в технологических процессах древесно-подготовительных цехов [5].

При вращении барабана сегмент поворачивается на определённый угол, обусловленный углом трения скольжения материала, который зависит от свойств самого сыпучего материала [6], [7].

Если сыпучий материал достаточно сцеплён с внутренней поверхностью барабана, то происходит обрушение свободного поверхностного слоя сегмента [8]. В связи с тем, что сыпучий материал постоянно поступает в барабан и выходит из барабана, то степень заполнения барабана на входе больше, чем на выходе, за счёт чего происходит некоторый сдвиг свободной поверхности сегмента обрушения к выходу барабана (по плоскости обрушения).

## 2. Материалы и методы

Задача заключается в том, чтобы математически описать движение сыпучего материала в горизонтально расположенном вращающемся барабане.

Так как степень загрузки и выгрузки сыпучего материала в барабане различна, то плоскость, по которой происходит обрушение, наклонена к горизонтальной оси барабана под некоторым углом  $\gamma$ , т. е. имеет место пересечение наклонной плоскости с горизонтальным цилиндром. Интерес представляют хорда сегмента заполнения и её размеры, т. к. этот показатель характеризует некоторые процессы при обрушении материала (перемешивание, сушка и т. д.). Наибольшая хорда у сегмента, расположенного при заполнении барабана на 0,5, т. е. хорда равна диаметру цилиндра (барабана).

В некоторых случаях желательно иметь степень заполнения барабана на 0,5 по всей его длине. Один из вариантов решения этой задачи — сделать барабан многосекционным, а ось каждой секции смещать по вертикали на величину  $h$ , которую можно рассчитать по формуле [9], [10]

$$h = l \cdot \tan \gamma,$$

где  $l$  — длина секции каскадного барабана.

### 3. Результаты

Так как обрушение сыпучего материала определяет процессы, происходящие с материалом, рассмотрим траекторию движения центра тяжести единичного материала и сделаем некоторые допущения. Считаем, что сыпучий материал перемещается по плоскости, наклонённой к горизонту под углом динамического откоса  $\beta$ , а к оси барабана — под углом  $\gamma$ . Угол динамического откоса зависит от размеров частиц материала, их формы, состояния (влажности), коэффициента внутреннего трения материала и т. д. Некоторые величины угла динамического откоса  $\beta$  (в движении) и естественного откоса (в покое) для различных материалов приведены в таблице. Примем, что угол динамического откоса  $\beta$  данного сыпучего материала в барабане постоянен, а обрушение происходит по прямой линии по свободной поверхности сегмента заполнения.

**Таблица.** Угол динамического и естественного откоса некоторых сыпучих материалов

**Table.** Angle of dynamic and natural slope of some bulk materials

Материал	Угол естественного откоса, град.	
	в покое	в движении
Каменный уголь	27—45	20—40
Кокс	30—35	27—31
Известняк	37,5—51,5	35—40
Гравий	30,5—45	28—39
Торф сухой	45—50	39—45
Песок строительный	37—44	34—37
Щепа технологическая	43—47	39—41
Опилки сухие	45—50	39—45
Кора измельчённая	43—47	40—44
Рис и др.	26—30	25—26

Уравнение цилиндра (барабана), показанного на рисунке 1, имеет вид:

$$x^2 + (z - R)^2 = R^2, \quad (1)$$

а уравнение плоскости обрушения сыпучего материала в общем виде будет:

$$ax + by - cz + d = 0. \quad (2)$$

Так как проекция вектора нормали  $\vec{n}$  ( $a, b, c$ ) плоскости обрушения на оси  $X, Y, Z$  должна удовлетворять условию  $a^2 + b^2 + c^2 = 1$ , найдём  $a, b, c$ . Из условия, что угол наклона плоскости обрушения с плоскостью  $z = 0$  равен  $\beta$ , а угол наклона плоскости обрушения с осью цилиндра равен  $\gamma$ , имеем  $\vec{n} \cdot \vec{c} = c \cdot \cos \beta$ ,  $\vec{n} \cdot \vec{r} = b = \sin \gamma$ , значит,

$$a = \sqrt{1 - e^2 - c^2} = \sqrt{\sin^2 \beta - \sin^2 \gamma}. \quad (3)$$

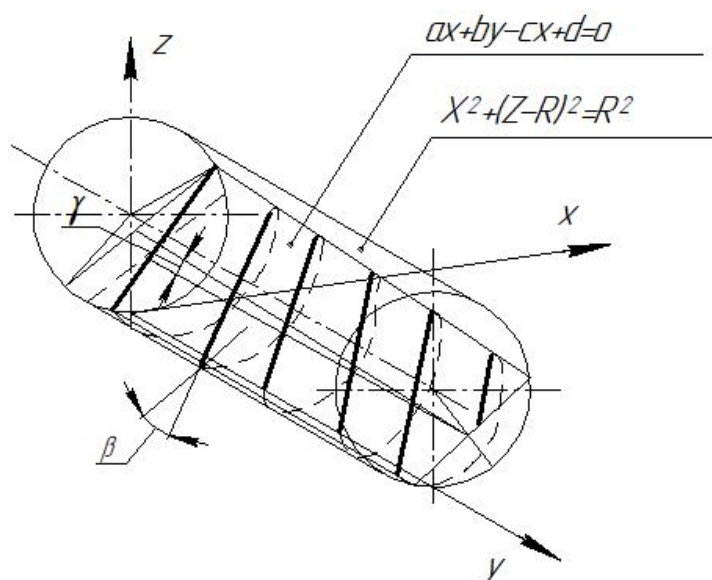
Рассмотрим пересечение плоскости обрушения с плоскостью  $y = 0$  (рисунок 2). Уравнение этого пересечения будет:

$$ax - cz + d = 0. \quad (4)$$

Значит,  $|x_0| = \frac{d}{a}$ ,  $|z_0| = \frac{d}{c}$ , очевидно, что  $\cos \alpha = \frac{\Delta}{R}$ ,  $\Delta = (R - z_0) \cos \xi$ , отсюда получим:

$$\cos \xi = \frac{x_0}{\sqrt{x_0^2 + z^2}} = \frac{d}{d \cdot a \sqrt{\frac{d^2}{a^2} + \frac{d^2}{c^2}}} = \frac{\cos \beta}{\cos \gamma},$$

где  $\xi$  — проекция угла динамического откоса  $\beta$  на вертикальную плоскость, перпендикулярную оси барабана, тогда  $\Delta = \left( R - \frac{d}{\cos \beta} \right) \frac{\cos \beta}{\cos \gamma}$ .



**Рисунок 1.** Траектория движения центра тяжести сыпучей частицы, находящейся на поверхности сегмента заполнения при вращении барабана

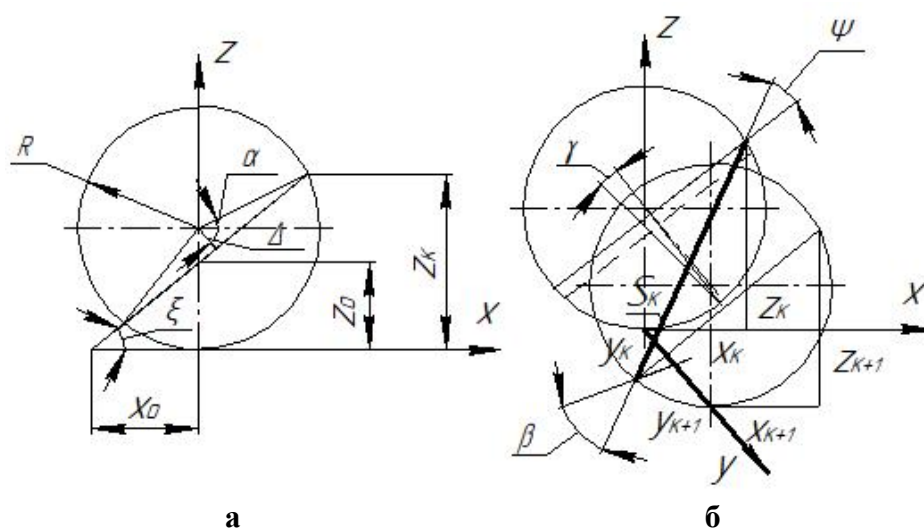
**Figure 1.** Trajectory of the center of gravity of the bulk particle located on the surface of the filling segment during the rotation of the drum

Теперь можно определить  $\cos \alpha_k$ , где  $\alpha_k$  — половина центрального угла сегмента заполнения в  $k$ -м сечении:

$$\cos \alpha_k = \left( 1 - \frac{d + \sin \gamma \cdot y_k}{\cos \beta \cdot R} \right) \frac{\cos \beta}{\cos \gamma}. \quad (5)$$

Отсюда находим параметры  $d$  в сечении барабана  $y = 0$ , т. е. на входе сыпучего материала в барабан:

$$d = R(\cos \beta - \cos \alpha \cdot \cos \gamma). \quad (6)$$



**Рисунок 2.** Элементы траектории движения сыпучей частицы во вращающемся барабане: **а** — в поперечном сечении барабана; **б** — в пространстве

**Figure 2.** Elements of the trajectory of a loose particle in a rotating drum. **(a)** in the cross section of the drum. **(b)** in space

Из формулы (5) можно определить центральный угол хорды, по которой плоскость обрушения пересекается с поперечным сечением барабана при  $y = y_k$  ( $y_k$  — координата  $k$ -го сечения) (см. рисунок 2).

Длина этой хорды будет  $2R \sin \alpha_k$ , а уравнение линии обрушения можно найти из уравнений

$$\begin{cases} x_{k+1} = x_k + a_1 S_k \\ y_{k+1} = y_k + a_2 S_k \\ z_{k+1} = z_k + a_3 S_k \end{cases}, \quad (7)$$

где  $x_k, y_k, z_k$  — начальные параметры центра тяжести сыпучих частиц (до обрушения);  $x_{k+1}, y_{k+1}, z_{k+1}$  — конечные параметры центра тяжести сыпучей частицы (после обрушения);  $S_k$  — длина линии обрушения, лежащей на плоскости обрушения;  $a_1, a_2, a_3$  — проекции вектора  $\bar{a}$  на оси  $X, Y, Z$ .

Так как проекции вектора  $\bar{a}$  на оси  $X, Y, Z$  должны удовлетворять условию  $a_1^2 + a_2^2 + a_3^2 = 1$ , а угол прямой, по которой происходит обрушение, с плоскостью  $z = 0$  есть угол  $\beta$ , находим:

$$a_3 = \sin \beta. \quad (8)$$

Ввиду того, что прямая, по которой происходит обрушение, лежит в плоскости обрушения (3), уравнение этой прямой примет вид:

$$a_1 \sqrt{\sin^2 \beta - \sin^2 \gamma} + a_2 \sin \gamma - a_3 \cos \beta = 0. \quad (9)$$

Возведя уравнение (9) в квадрат и подставляя в него значение  $a_3 = \sin \beta$ , получим:

$$a_1^2 = 1 - a_2^2 - a_3^2 = \cos^2 \beta - a_2^2.$$

Отсюда выведем квадратное уравнение  $(\sin \beta \cdot a_2 - \sin \gamma \cdot \cos \beta)^2 = 0$ , из которого получим:

$$a_2 = \frac{\sin \gamma \cos \beta}{\sin \beta}. \quad (10)$$

Зная  $a_3$  (8) и  $a_2$  (10) и учитывая условие  $a_1^2 + a_2^2 + a_3^2 = 1$ , найдём  $a_1$ :

$$a_1 = \frac{\cos \beta}{\sin \beta} \sqrt{\sin^2 \beta - \sin^2 \gamma}. \quad (11)$$

Из рисунка 2 видно, что высота пересечения плоскости обрушения со стенкой барабана в сечении  $y = y_k$  равна:

$$z_k = R - R \cos(\alpha_k + \xi); \quad x_k = z_k \cdot \operatorname{ctg} \xi - |x_0|. \quad (12)$$

Зная точку с координатами  $x_k, z_k$  на боковой поверхности барабана, из которой начинает перемещаться сыпучая частица по прямой обрушения, можно найти значение параметра  $S_k$  (линия обрушения), при котором частица достигнет противоположного края плоскости обрушения. Действительно, если эта точка имеет координаты  $x_{k+1} = x_k + a_1 S_k$ ;  $z_{k+1} = z_k + a_3 S_k$ , то должно соблюдаться уравнение цилиндра:

$$(x_k + a_1 S_k)^2 + (z_k + a_3 S_k - R)^2 = R^2.$$

Отсюда, подставив соответствующие значения из формул (7) и (10), найдём длину линии обрушения:

$$S_k = - \frac{2 \cdot \sin \beta \left[ x_k \cos \beta \sqrt{\sin^2 \beta - \sin^2 \gamma} + (z_k - R) \sin^2 \beta \right]}{1 - \cos^2 \beta \cdot \sin^2 \gamma}. \quad (13)$$

Из формулы (13) видно, что длина линии обрушения зависит от начальных координат центра тяжести частицы, которые определяются степенью заполнения барабана в данном сечении, углом динамического откоса сыпучей среды  $\beta$  и углом наклона плоскости обрушения к оси барабана  $\gamma$ .

За одно обрушение частица перемещается вдоль оси барабана на величину  $y_{k+1}$ , в котором степень заполнения будет меньше, в этом случае центр частицы, описав дугу радиусом  $R$ , будет иметь уже другие координаты начала обрушения, которые вычисляются по формулам (13).



Таким образом, траектория движения частицы будет иметь вид сложной циклоиды, причём длина линии каждого обрушения будет изменяться в зависимости от степени заполнения барабана. Наибольшая длина линии одного обрушения будет при степени заполнения 0,5 или  $2\alpha_k = 180^\circ$ . Теоретически частица выйдет из барабана длиной  $L$ , когда  $\sum_{k=1}^n (y_{k+1} - y_k) = L$ , или, подставив известные значения в эту формулу, получим:

$$\frac{\sin \gamma \cdot \cos \beta}{\sin \beta} \cdot \sum_{k=1}^n \frac{2 \sin \beta \left[ x_k \cos \beta \sqrt{\sin^2 \beta - \sin^2 \gamma} + (Z_k - R) \sin^2 \beta \right]}{1 - \cos^2 \beta \cdot \sin^2 \gamma} = L. \quad (14)$$

#### 4. Обсуждение и заключение

Движение сыпучих частиц, частично заполнивших объём горизонтально вращающегося барабана, имеет циклический характер, включающий подъём частиц, находящихся в массе сыпучей среды, до плоскости обрушения и скатывания их по плоскости обрушения.

Линия обрушения (скатывания) частиц по плоскости обрушения происходит в зависимости от величин степени заполнения барабана и свойств сыпучей среды, характеризующейся углом динамического откоса. Кроме того, величина смещения частицы сыпучей среды вдоль оси барабана зависит от угла наклона плоскости обрушения или от разницы в заполнении барабана сыпучей средой на входе и на выходе.

Наибольшая линия обрушения или величина перемещения частицы вдоль оси барабана находится при заполнении барабана на 50 % его объёма.

Обеспечение степени заполнения барабана на оптимальную величину (наибольшую величину) возможно при выполнении барабана многосекционным и установке секций каскадно.

*Исследование выполнено в рамках научной школы «Инновационные разработки в области лесозаготовительной промышленности и лесного хозяйства».*

#### Список литературы

1. Григорьев И. В., Зорин М. В., Рудов М. Е. Современные способы укрепления временных лесовозных дорог и трелёвочных волоков // Управление земельными ресурсами, землеустройство, кадастр, геодезия и картография. Проблемы и перспективы развития: Сб. материалов Всерос. научно-практич. конф. с междунар. участием, посвящённой 255-летию Землеустройству Якутии и Году науки и технологий. Якутск, 2021. С. 278—285.
2. Григорьев И. В., Мануковский А. Ю., Зорин М. В. Энерго-ресурсосберегающие технологии строительства лесных дорог // Эколого-ресурсосберегающие технологии в науке и технике: Материалы Всерос. научно-технич. конф. Воронеж, 2021. С. 54—59.
3. Моделирование взаимодействия древесных семян с почвой при аэросеве / М. Н. Лысыч, Л. Д. Бухтояров, О. И. Гринько [и др.] // Системы. Методы. Технологии. 2022. № 1 (53). С. 93—98.

4. Григорьева О. И., Никифорова А. И. Разделение семян по размерам // Дерево.ru. 2015. № 5. С. 60—64.
5. Григорьева О. И., Никифорова А. И. Транспортировка семян // Дерево.ru. 2015. № 6. С. 58—62.
6. Improving the quality of sorting wood chips by scanning and machine vision technology / I. Grigorev, A. Shadrin, S. Katkov [et al.] // Journal of Forest Science. 2021. Vol. 67, no. 5. P. 212—218.
7. Григорьев И. В., Шапиро В. Я., Гулько А. Е. Математическая модель групповой окорки лесоматериалов в окорочных барабанах // Научное обозрение. 2012. № 4. С. 154—171.
8. Шапиро В. Я., Григорьев И. В., Гулько А. Е. Анализ методов расчёта параметров и обоснование математической модели разрушения коры при групповой окорке древесины // Учёные записки Петрозаводского государственного университета. 2011. № 8 (121). С. 92—96.
9. Russian sawmill modernization (a case study). Part 2. Improving the efficiency of wood chipping operations / I. Grigorev, A. Shadrin, S. Katkov [et al.] // International Wood Products Journal. 2021. Vol. 12, no. 2. P. 128—134.
10. Григорьев И. В., Гулько А. Е. Совершенствование технологии механической окорки лесоматериалов. Часть 4. Технологические аспекты расчёта параметров процесса окорки // ЛесПромИнформ. 2012. № 1 (83). С. 108—110.

## References

1. Grigorev I. V., Zorin M. V., Rudov M. E. Modern ways of strengthening the temporary forest roads and skid trails. *Management of land resources, land management, cadastre, geodesy and cartography. Problems and prospects for development. Proceedings of the All-Russian Scientific-Practical Conference with International participation, dedicated to the 255th anniversary of Yakutia's land management and the Year of Science and Technology*. Yakutsk, 2021, pp. 278—285. (In Russ.)
2. Grigorev I. V., Manukovsky A. Yu., Zorin M. V. Energy-resource-saving technologies of forest road construction. *Ecological-resource-saving technologies in science and technology. materials of All-Russian scientific and technical conference*. Voronezh, 2021, pp. 54—59. (In Russ.)
3. Lysych M. N., Bukhtoyarov L. D., Grinko O. I., Grigoreva O. I., Grigorev I. V., Ivanov V. A. Modeling of interaction of tree seeds with soil during aero-seeding. *Systems. Methods. Technologies*, 2022, no. 1 (53), pp. 93—98. (In Russ.)
4. Grigoreva O. I., Nikiforova A. I. Seed separation by size. *Wood.ru*, 2015, no. 5, pp. 60—64. (In Russ.)
5. Grigoreva O. I., Nikiforova A. I. Transportation of seeds. *Wood.ru*, 2015, no. 6, pp. 58—62. (In Russ.)
6. Grigorev I., Shadrin A., Katkov S., Borisov V., Kaznacheeva N., Levushkin D., Druzyanova V., Gnatovskaya I., Diev R., Akinin D. Improving the quality of sorting wood chips by scanning and machine vision technology. *Journal of Forest Science*, 2021, vol. 67, no. 5, pp. 212—218.
7. Grigorev I. V., Shapiro V. Y., Gulko A. E. Mathematical model of group debarking of timber in debarking drums. *Scientific review*, 2012, no. 4, pp. 154—171. (In Russ.)
8. Shapiro V. Y., Grigorev I. V., Gulko A. E. Analysis of calculation methods of parameters and justification of mathematical model of bark destruction at group debarking of wood. *Scientific Notes of Petrozavodsk State University*, 2011, no. 8 (121), pp. 92—96. (In Russ.)
9. Grigorev I., Shadrin A., Katkov S., Borisov V., Gnatovskaya I., Diev R., Kaznacheeva N., Levushkin D., Druzyanova V., Akinin D. Russian sawmill modernization (a case study). Part 2.

Improving the efficiency of wood chipping operations. *International Wood Products Journal*, 2021, vol. 12, no. 2, pp. 128—134.

10. Grigorev I. V., Gulko A. E. Improving the technology of mechanical debarking of timber. Part 4. Technological aspects of calculating the parameters of debarking process. *LesPromInform*, 2012, no. 1 (83), pp. 108—110. (In Russ.)

© Ильюшенко Д. А., Локштанов Б. М., Орлов В. В., Куницкая О. А., Пелюхов Р. В., Швецова В. В., 2022

DOI: 10.15393/j2.art.2022.6364

УДК 630\*383

Статья

## Методика последовательного анализа и определения стандартов отклонений от проектных параметров лесовозных автомобильных дорог

**Тихомиров Петр Викторович**

*кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Брянский государственный инженерно-технологический университет» (Российская Федерация), [vtichomirov@mail.ru](mailto:vtichomirov@mail.ru)*

**Скрыпников Алексей Васильевич**

*доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет инженерных технологий» (Российская Федерация), [skrypnikovvsafe@mail.ru](mailto:skrypnikovvsafe@mail.ru)*

**Козлов Вячеслав Геннадиевич**

*доктор технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I» (Российская Федерация), [vyu-kozlov@yandex.ru](mailto:vyu-kozlov@yandex.ru)*

**Тверитнев Олег Николаевич**

*экстерн, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет инженерных технологий» (Российская Федерация), [tveritneffo@yandex.ru](mailto:tveritneffo@yandex.ru)*

**Григорьев Игорь Владиславович**

*доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Арктический государственный агротехнологический университет» (Российская Федерация), [silver73@inbox.ru](mailto:silver73@inbox.ru)*

*Получена: 26 апреля 2022 / Принята: 19 сентября 2022 / Опубликовано: 27 сентября 2022*

---

**Аннотация:** Современное дорожное строительство ведётся поточным методом, обеспечивающим непрерывность работ, что требует своевременных и точных разбивочно-контрольных измерений и построений. Поэтому несвоевременное восстановление и закрепление уничтожаемых разбивочных знаков малопроизводительными методами, особенно на закруглениях, ведёт к задержке строительного процесса, либо к перерасходу стройматериалов при нарушении параметров дороги в плане, либо к перерасходу машино-часов, энергоресурсов при устранении брака многократным, плохо управляемым перемещением грунта и стройматериалов. Недостаточная детальность распределения разбивочных знаков на закруглениях (в той же мере, как и непроизводительное либо неточное

их восстановление) также ведёт к искажению проектных криволинейных очертаний дорог, что, в свою очередь, приводит к нарушениям функций переходных кривых, ухудшению их динамических свойств, снижению зрительной ясности, плавности, эстетики восприятия закруглений, а это психологически отрицательно влияет на водителей. Всё вышеизложенное ведёт к снижению технико-экономических показателей и безопасности движения транспорта. Цель работы состоит в совершенствовании методики последовательного анализа и определения стандартов отклонений от проектных параметров лесовозных автомобильных дорог. Определены стандарты отклонений от проектных параметров в соответствии с нормативными требованиями и даны рекомендации по контролю строительства дорожных закруглений. Результаты исследований с применением теории марковских случайных процессов по прогнозу объёма контрольных измерений для последовательного анализа позволили определить шаг измерений, оптимизировать их количество и, таким образом, сократить их общий объём в 4 раза по сравнению с рекомендациями СНиП. Разработанная и исследованная подсистема принятия решений последовательного анализа лесовозных автомобильных дорог позволила обосновать предлагаемую методику приёмки с дифференцированной оценкой качества геометрических параметров построенных лесовозных автомобильных дорог.

**Ключевые слова:** лесовозная автомобильная дорога; геометрический параметр; кривая; отклонения

---

DOI: 10.15393/j2.art.2022.6364

Article

## The method of sequential analysis and determination of standards of deviations from the design parameters of logging roads

**Pyotr Tikhomirov**

*Ph. D. in engineering, associate professor, Bryansk State University of Engineering and Technology (Russian Federation), vtichomirov@mail.ru*

**Alexey Skrypnikov**

*D. Sc. in engineering, professor, Voronezh State University of Engineering Technologies (Russian Federation), skrypnikovvsafe@mail.ru*

**Vyacheslav Kozlov**

*D. Sc. in engineering, associate professor, Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great (Russian Federation), vya-kozlov@yandex.ru*

**Oleg Tveritnev**

*external, Voronezh State University of Engineering Technologies (Russian Federation), tveritneffo@yandex.ru*

**Igor Grigoriev**

*D. Sc. in engineering, professor, Arctic State Agrotechnological University (Russian Federation), silver73@inbox.ru*

*Received: 26 April 2022 / Accepted: 19 September 2022 / Published: 27 September 2022*

---

**Abstract:** Modern road construction is performed by a flow method that ensures continuity of operation and requires timely and accurate center-control measurements and tracing. Therefore, the untimely restoration and fixing of destroyed center marks by inefficient methods, especially on the curves leads to a delay in the construction process. This might result in construction materials excess expenditure in case of road parameters violation or in machine hours and energy resources excess expenditure for defects removal by repeated poorly controlled movement of soil and building materials. Insufficient degree of detail in center marks distribution on the curves, as well as their unproductive or inaccurate restoration also leads to distortion of the designed curvilinear outlines of roads. Therefore it results in violations of the easement curve functions and in deterioration of their dynamic properties. In addition it leads to a decrease in visual

clarity, riding quality and aesthetics of curves perception, thus negatively affecting drivers' psychological status. All of the above leads to a decrease in technical and economic indicators and traffic safety. The purpose of the work is to improve the consistent analysis methodology and determination of standards of deviations from the design parameters of logging roads. Standards of deviations from design parameters in accordance with regulatory requirements are defined and recommendations are given for monitoring the construction of road curves. The results of studies using the theory of Markov random processes to predict the volume of control measurements for sequential analysis allowed the authors to determine the measurement intervals and to optimize their number and thus to reduce their total number by 4 times compared with the recommendations of the Construction Standards and Regulations (SNiP). The developed and researched decision engine of sequential analysis of logging roads allowed us to substantiate the proposed acceptance methodology of quality differentiated assessment of constructed logging roads geometric parameters.

**Keywords:** logging road; geometric parameter; curve; deviations

---

## 1. Введение

В связи с предъявляемыми большими требованиями к качеству современных лесовозных автомобильных дорог требуется научно обосновывать и производить геодезические контрольные измерения при приёмке работ, руководствуясь строительными допусками действующих норм. Правила производства и приёмки работ рекомендуют в очень большом объёме измерений обследовать принимаемые объекты. Так, например, на каждом контролируемом участке дороги длиной 300—400 м рекомендуется производить определения отметок путём нивелирования с шагом 5 м, т. е. 60—80 измерений, 80—100 измерений поперечных уклонов и ширины дорожного покрытия, 100—300 измерений просветом под трёхметровой рейкой. Такое количество измерений, приближающееся к генеральной совокупности всех возможных испытаний, хоть и характеризует в полной мере качество принимаемых работ, однако не обеспечивает высокой производительности контроля и приёмки. Необходимо учесть, что в процессе контрольных измерений наступает такой момент, когда увеличение их количества становится не целесообразным, поскольку не изменит уже возможного на этот момент обоснованного вывода о качестве принимаемых работ. Для определения указанного момента, оптимизирующего количество измерений, следует применять математические методы принятия решений, позволяющие оптимально планировать процесс приёмочных обследований, чтобы обеспечить высокую производительность геодезического контроля.

## 2. Материалы и методы

Процесс контрольных измерений при приёмке выполненных дорожно-строительных работ авторы предлагают производить методом вероятностно-статистического последовательного анализа, который в настоящее время значительно уточнён и доработан с новым подходом к нахождению граничных стандартов [1—3].

Суть метода заключается в том, что для каждого числа контрольных измерений  $n$  заранее вычисляются приёмочные и браковочные числа по формулам:

$$a_n = \frac{n\sigma_{(x)}^2}{x_{2,n}^2 - x_{1,n}^2} \left( 2\ln \frac{\beta}{1-\alpha} + n\ln \frac{x_{2,n}^2}{x_{1,n}^2} \right), \quad (1)$$

$$r_n = \frac{n\sigma_{(x)}^2}{x_{2,n}^2 - x_{1,n}^2} \left( 2\ln \frac{\beta}{1-\alpha} + n\ln \frac{x_{2,n}^2}{x_{1,n}^2} \right), \quad (2)$$

где  $\alpha$  — вероятность ошибочно забраковать контролируемую работу, когда она доброкачественная;  $\beta$  — вероятность ошибочно принять работу, когда она подлежит браку;  $\sigma_{(x)}$  — стандарт отклонений контролируемых геометрических параметров от их проектного значения;  $x_{1,n}^2, x_{2,n}^2$  — величины, выбираемые из таблиц;  $x^2$  — распределения по вероятностям, соответственно:



$$P_1 = 1 - 0,5 (1 - P), \quad (3)$$

$$P_2 = 0,5 (1 - P) \quad (4)$$

и в зависимости от числа степеней свободы  $n$ , где  $P$  — предварительно заданная доверительная вероятность.

После каждого измерения нарастающим итогом вычисляется сумма квадратов отклонений  $[S^2]_n$  контролируемого параметра от его проектного значения  $M_{(x)}$ . Если  $[S^2]_n \leq a_n$ , то измерения можно прекратить с решением принять работу, — продолжительное решение. Если  $a_n < [S^2] < r_n$ , то контрольные измерения нужно продолжить, и если  $[S^2] \geq r_n$ , то выполненные работы следует забраковать, — отрицательное решение (рисунок 1). Принятие решения полностью зависит от правильно выбранных величин  $P$ ,  $\sigma_{(x)}$ ,  $\alpha$  и  $\beta$  [4—6].

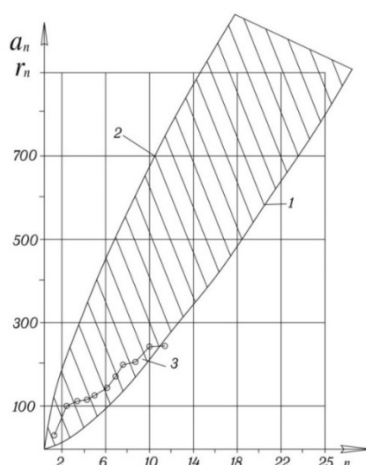
Для высокой надёжности анализа нами была принята «трёхкратная» доверительная вероятность принятия решений ( $P = 0,9973$ ), соответствующая предельному отклонению  $S = 3\sigma_x$ , а вероятности ошибочных решений приняты ничтожно малыми:  $\alpha = \beta = 0,001$ .

Стандарты отклонения  $\sigma_x$  выбираем из нормативно-правовых документов после нахождения толерантных пределов для различных видов контрольно-приёмочных измерений по законам теории погрешностей и теории вероятностей [7—10].

При приёмке работ для щебёночных, гравийных, шлаковых, щебёночно-песчаных, асфальтобетонных и других оснований и покрытий допустимы отклонения от проектного значения ширины  $\Delta_{\text{ш}} = 10$  см, причём 10 % их не должны превышать  $\Delta_{\text{ш}}$  более чем в 2 раза [11—13]. Следовательно, предельное значение отклонения  $\Delta_{\text{ш,пред}} = 20$  см. При «трёхкратной» доверительной вероятности  $\sigma_{\text{ш}} = \Delta_{\text{ш,пред}}/3 = 6,5$  см. Тогда при нормальном распределении отклонений  $\delta_{\text{ш}}$  (в соответствии с  $q$  — процентным значением нормального отклонения) только 10 % отклонений могут превышать  $1,64 \sigma \approx 10,5$  см, т. е.  $10,5 < \delta < 20$  см, остальные 90 % отклонений будут в пределах допуска  $\Delta_{\text{ш}} = 10$  см, что полностью соответствует требованиям СНиП. Аналогично определён стандарт просветов под трёхметровой рейкой  $\sigma_{\text{просв.}}$  для асфальтобетонных, цементобетонных и других покрытий:

$\Delta_{\text{пред}} = 2\Delta_{\text{просв}} = 10$  мм;  $\sigma_{\text{просв.}} = \frac{\Delta_{\text{пред}}}{3} \approx 3$  мм, 5 % просветов будут в пределах  $1,96\sigma_{\text{просв.}} < S < \Delta_{\text{пред}}$  или  $5,9 < S < 10$  мм, остальные примерно 95 % просветов будут в пределах допуска.

Допустимое отклонение отметок по оси для всех видов оснований и покрытий  $\Delta_{\text{отм}}$  равно 50 мм. Кроме того, 10 % отклонений от общего числа контрольных измерений не должны превышать  $2 \Delta_{\text{отм}} = \Delta_{\text{пред}} = 100$  мм. Эти условия при  $P = 0,9973$  удовлетворяются, когда  $\sigma_{\text{опт}} = \frac{\Delta_{\text{пред}}}{3} = 33$  мм; 10 % амплитуд отметок с шагом 10 м не должны превышать полуторакратной величины допуска  $\Delta_{A_1} = 12$  мм, т. е.  $\Delta_{A_1 \text{ пред}} = 18$  мм. Стандарт отклонений  $\sigma_{\text{укл}}$  поперечных уклонов для всех видов оснований и покрытий будет равен 0,009. Тогда при



**Рисунок 1.** Последовательный анализ контрольных измерений: 1 — приёмочная кривая; 2 — браковочная кривая; 3 — кривая сумм  $S^2$

**Figure 1.** Sequential analysis of control measurements: 1 — acceptance curve; 2 — rejection curve; 3 — sum curve  $S^2$

нормальном распределении 10 % отклонений будет в пределах  $1,64\sigma_{\text{укл}} \leq \sigma \leq 3\sigma_{\text{укл}}$  или  $0,014 \leq \delta \leq 0,03$ , остальные будут в пределах допуска  $\Delta_{\text{укл}} = 0,01$ . Итак, стандарты отклонений от проектных параметров при приёмке дорожно-строительных работ определены по закону нормального распределения.

### 3. Результаты

Для повышения качества реализации проектных геометрических параметров криволинейных элементов лесовозных автомобильных дорог, в значительной мере характеризующих технико-экономические показатели и безопасность движения, а также эстетическое восприятие пространственной плавности трассы в соответствии с современными требованиями архитектурно-ландшафтного проектирования, предлагается при приёмке лесовозных автомобильных дорог, по аналогии с приёмкой железных дорог, контролировать:

а) отклонения  $\delta_{\text{кр}}$  от проектных стрел изгиба  $f_{\text{кр}}$  бровки покрытия в пределах круговых кривых:

$$f_{\text{кр}} = \frac{l^2}{8R}, \quad (5)$$

где  $l$  — хорда,  $R$  — радиус;

б) отклонения  $\delta_{\text{пер}}$  от равномерного нарастания  $\Delta f_{\text{пер}}$  стрел изгиба в пределах переходных кривых. Соответствующие значения:  $\Delta_{\text{кр}} = 100$  мм,  $\sigma_{\text{кр}} = 65$  мм,  $\Delta_{\text{пер}} = 50$  мм,  $\sigma_{\text{пер}} = 33$  мм. Стрелы изгиба  $f_{\text{кр}}$  и  $f_{\text{пер}}$  должны измерять от хорд, равных 20 м и 10 м с шагом 10 м и 5 м.

Проектные значения  $f_{\text{пер}}$  и  $\Delta f_{\text{пер}}$  определим следующим образом: радиус в текущей точке клотоиды равен:

$$\rho = \frac{C}{S}, \quad (6)$$

где  $C$  — параметр клотоиды, а  $S$  — расстояние до текущей точки; следовательно, радиус в середине контролируемого интервала клотоиды равен:

$$\rho_c = \frac{c}{l(i-0.5)}, \quad (7)$$

где  $i$  — номер контролируемой точки; при значении

$$f_{\text{пер}} = \frac{l^2}{8\rho_c} \quad (8)$$

получим:

$$f_{\text{пер}} = \frac{(2-0.5)l^2}{8c}, \quad (9)$$

$$\Delta f_{\text{пер}} = \frac{l^3}{8c}. \quad (10)$$

Для принятых величин  $P = 0,9973$ ,  $\alpha = \beta = 0,001$  и расчётных стандартов  $\sigma_{(x)}$  по формулам (1), (2) для каждого из перечисленных видов контрольных измерений автором вычислены приёмочные и браковочные числа  $a_n$  и  $r_n$ .

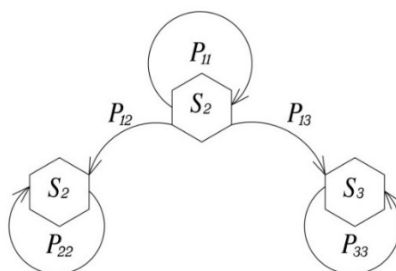
Процесс контрольных измерений геометрических параметров, законченных строительством лесовозных автомобильных дорог с применением вероятностно-статистического последовательного анализа результатов этих измерений, можно представить в виде марковского неоднородного случайного процесса с дискретными состояниями и дискретным временем. Действительно, имеется физическая система  $S_i$ , состояние которой меняется в процессе контрольных измерений случайным образом, т. е. протекает случайный процесс, в котором для каждого момента вероятность любого состояния системы в будущем зависит только от её состояния в настоящем. То есть величина ( $S^2$ ) после каждого последующего контрольного измерения  $n$  зависит только от величины ( $S^2$ ) в предыдущий момент ( $n-1$ ) и не зависит от того, как эта величина образовалась в прошлом. Вероятности перехода из одного состояния системы в другое зависят от номера шага, т. е. чем больше число контрольных измерений, тем больше вероятность окончания процесса последовательного анализа с принятием одного из граничных решений. Итак, по всем признакам мы имеем дело с неоднородной цепью Маркова с дискретными состояниями и временем [80]. Модель указанного марковского случайного процесса геометрически можно представить в виде графа возможных состояний подсистемы:

$S_1$  — измерения необходимо продолжить ( $a < [S^2] < r$ );

$S_2$  — измерения закончить с принятием положительного решения ( $[S^2] < a$ );

$S_3$  — измерения закончить с принятием отрицательного решения ( $[S^2] > r$ ).

Граф возможных состояний подсистемы принятия решений с указанными вероятностями перехода из одного состояния в другое показан на рисунке 2. После каждого измерения у каждого возможного состояния подсистемы  $S_1$ ,  $S_2$  и  $S_3$  будет определённая вероятность, а также вероятность перехода из одного состояния в другое после следующего измерения. Эти вероятности можно вычислить последовательно для каждого контрольного измерения. Очевидно, что по мере увеличения числа контрольных измерений вероятность окончания процесса последовательного анализа будет увеличиваться и на определённом этапе достигнет величины, близкой к единице. Этот этап и определит прогнозируемое максимально-возможное число контрольных измерений. Для определения указанного числа нами вычислялись вероятности состояний подсистем  $S_1$ ,  $S_2$  и  $S_3$  для каждого измерения по теоретическим предпосылкам работ с составлением соответствующего алгоритма и программ вычислений.



**Рисунок 2.** Граф возможных состояний системы последовательного анализа с переходными вероятностями (подсистема принятия решений)

**Figure 2.** A graph of possible states of a sequential analysis system with transient probabilities (a decision-making subsystem)

Сначала были определены с точностью до  $10^{-6}$  значения  $X_{1,n}^2$  и  $X_{2,n}^2$ , отсутствующие в математических таблицах при доверительной вероятности  $P = 0,9973$ , следующим образом: по таблице интеграла вероятностей  $X^2$  (10, 202с) по приближенному значению  $X_n^2$ , пользуясь формулой Бесселя для квадратической интерполяции, вычисляем вероятность:

$$P(X_n^2) = P(X_{0,n}^2) + u \cdot \Delta P(X_{0,n}^2) - \frac{u(1-u)}{2} \cdot \frac{\Delta P(X_{+1,n}^2) - \Delta P(X_{-1,n}^2)}{2}, \quad (11)$$

где  $X_{-1,n}^2$ ;  $X_{0,n}^2$ ;  $X_{+1,n}^2$  — равноотстоящие таблицы значения аргумента, при этом  $X_{0,n}^2 \leq X_n^2 < X_{+1,n}^2$ ;

$$u = \frac{X_n^2 - X_{0,n}^2}{X_{+1,n}^2 - X_{0,n}^2}; \Delta P(X_{j,n}^2) = P(X_{j+1,n}^2) - P(X_{j,n}^2),$$

где  $j = -1; 0; +1$ .

Затем определяем значения  $X^2$  с точностью до семи значений цифр по формуле

$$X_{i,n}^2 = X_{0,n}^2 + \left\{ \frac{P_i - P(X_{i,n}^2)}{\Delta P(X_{0,n}^2)} + u \right\} \cdot (X_{+1,n}^2 - X_{0,n}^2) \quad (i = 1, 2). \quad (12)$$

Таким образом, получили первое приближение значения  $X^2$ , по которому снова определяем вероятность по формуле (11) и снова величину  $X^2$  по формуле (12) и т. д. до тех пор, пока расхождения между вычисленными и теоретическими значениями вероятностей не будут ничтожно малыми (менее  $10^{-7}$ ).

Алгоритм определения  $X^2$  реализован в компьютерной программе. Затем нами по формулам (1) и (2) были определены приёмочные  $a_n$  и браковочные  $r_n$  числа для стандарта отклонений  $\sigma_x = 1$ . После этого определены вероятности по формуле (11) по значениям  $a_n$  и  $r_n$  при  $\sigma_x = 1$  для каждого шага контрольных измерений, без учёта предыдущих вероятностей:  $P_a$  — вероятность попадания величины  $[S^2]$  в интервал  $a_n < [S^2] < \infty$ ;  $P_r$  — вероятность попадания в интервал  $r_n < [S^2] < \infty$ .

По этим вероятностям составлены квадратные матрицы переходных вероятностей для каждого из контрольных измерений в соответствии с графом состояний (рисунок 2). Перед началом измерений, т. е. после нулевого измерения, вероятность продолжения измерений равна единице, в этом случае вероятности состояний подсистемы: продолжения измерений  $S_1$ , продолжительного решения  $S_2$ , отрицательного решения  $S_3$  будут равны соответственно:  $P_{S_1}^{(0)} = 1, P_{S_2}^{(0)} = 0, P_{S_3}^{(0)} = 0$ .

Матрица переходных вероятностей после первого измерения:

$$P_{ij}^{(1)} = \begin{vmatrix} 0,642659 & 0,274723 & 0,082618 \\ & 0 & 1 & 0 \\ & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} 1,000000.$$

Сумма членов, стоящих в каждой строке матрицы, должна быть равна единице (проверка справа матрицы), т. к. события в каждой строке несовместны и образуют полную группу. Вероятность того, что подсистема  $S$  после  $n$  шагов будет находиться в состоянии  $S_i$ , выразится формулой

$$P_{S_i}^{(n)} = \sum_j P_{S_j}^{(n-1)} \cdot P_{ji}^{(n)} \quad (i = 1, \dots, k), \quad (13)$$

где  $P_{S_i}^{(n)}$  — вероятности состояний после  $n$ -го шага определяются через вероятности состояний после  $(n-1)$ -го шага  $P_{S_j}^{(n-1)}$  с помощью вероятностей перехода  $P_{ji}^{(n)}$ . Иными словами, вероятности состояний после  $n$  измерений  $P_{S_1}, P_{S_2}$  и  $P_{S_3}$  находятся как сумма произведений вероятностей состояний после предыдущего измерения  $(n-1)$  на соответствующие столбцы матрицы переходных вероятностей. Отсюда вероятности возможных состояний подсистемы после первого измерения:

$$P_{S_1}^{(1)} = 1 \cdot 0,642659 + 0 \cdot 0 + 0 \cdot 0 = 0,642659,$$

$$P_{S_2}^{(1)} = 1 \cdot 0,274723 + 0 \cdot 1 + 0 \cdot 0 = 0,274723,$$

$$P_{S_3}^{(1)} = 1 \cdot 0,082618 + 0 \cdot 0 + 0 \cdot 1 = 0,082618.$$

Матрица переходных вероятностей после второго измерения:

$$P_{ij}^{(2)} = \begin{vmatrix} 0,689063 & 0,213656 & 0,097281 \\ & 0 & 1 & 0 \\ & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} 1,000000.$$

Вероятности возможных состояний подсистемы после второго измерения

$$P_{S_1}^{(2)} = 0,642659 \cdot 0,689063 + 0,274723 \cdot 0 + 0,0826618 \cdot 0 = 0,442832,$$

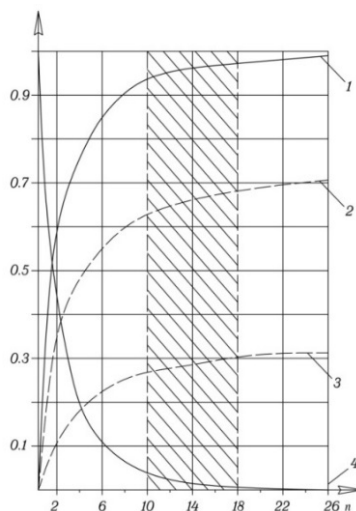
$$P_{S_2}^{(2)} = 0,642659 \cdot 0,213658 + 0,274723 \cdot 1 + 0,082618 \cdot 0 = 0,412031,$$

$$P_{S_3}^{(2)} = 0,6422659 \cdot 0,097281 + 0,274723 \cdot 0 + 0,082618 \cdot 1 = 0,145137.$$

и так далее.

Производились вычисления до тех пор, пока  $P_{S_1}^{(n)}$ , т. е. вероятность продолжения измерений ( $P_{\text{прод}} = P_{S_1}^n$ ) не достигла величины, близкой нулю (0,0001), и пока вероятность окончания анализа с положительными или отрицательным решением  $P_{\text{ок}} = P_{S_2}^{(a)} + P_{S_3}^{(n)}$  не достигла величины, близкой единице (0,9999). Это произошло на 30-м измерении ( $n = 30$ ).

Графики указанных итоговых вероятностей после  $n$  контрольных измерений представлены на рисунке 3.



**Рисунок 3.** Вероятности: окончания анализа — 1; продолжения анализа — 4; приёмки работ — 2; брака — 3

**Figure 3.** Probabilities: the end of the analysis — 1; continuation of the analysis — 4; acceptance of work — 2; faulty work — 3

#### 4. Обсуждение и заключение

В процессе исследований выяснилось, что анализ с вероятностью, практически равной единице, закончится при  $n = 30$ . При этом вероятность продолжения измерений ничтожно мала. Иными словами, при последовательном анализе на каждом нормированном участке

дороги (захватке) в 400 м возможность более 30 контрольных измерений маловероятна. В среднем принятие одного из граничных решений возможно при  $n < 22$ , когда вероятность окончания  $P_{ок} < 0,999$ . Можно сделать вывод, что каждую захватку дороги в 400 м необходимо делить на 30 частей и, соответственно, производить контрольные измерения с шагом 15—20 м до принятия одного из граничных решений. Таким образом, с помощью вероятностно-статистического последовательного анализа можно сокращать объём, а следовательно, повышать производительность контрольно-приёмочных измерений в 4 раза по сравнению с рекомендациями СНиП, не снижая объективности соответствующих заключений. При этом критерий оценки качества принимаемых работ обеспечивает все требования действующих норм.

Несмотря на официальную отмену в настоящее время дифференцированной оценки качества построенных дорог, она всё же представляет интерес для сравнительной характеристики качества геометрических параметров лесовозных автомобильных дорог.

Если анализ закончен принятием положительного решения после небольшого количества измерений, при котором вероятность окончания анализа  $P_{ок}$  невелика, то это означает, что сумма квадратов отклонений  $[S^2]_n$  от проектного значения нарастала медленно, а следовательно, эти отклонения невелики и принимаемая работа выполнена очень качественно. С другой стороны, если анализ закончен с положительным решением после большого, близкого к максимальному, количества измерений, когда вероятность окончания велика, то это значит, что сумма  $[S^2]_n$  нарастает быстро, отклонения велики, хоть и допустимы, и контролируемая работа выполнена удовлетворительно. Таким образом, вероятность окончания процесса (а следовательно, и количество измерений) при принятии положительного решения может служить критерием оценки качества выполненных работ в баллах. Иными словами, чем раньше закончен анализ с положительным решением, тем выше оценка принимаемой работы. В свете теории вероятностей и теории погрешностей в данной работе предлагается критерий дифференцированной оценки качества работ: если анализ закончится с положительным решением при вероятности окончания  $P_{ок}$  меньшей 0,9545, «двукратной», т. е. при количестве измерений меньше 10 (рисунок 3 — слева от заштрихованной области), то работу следует принять с отличной оценкой. Если анализ закончится положительно при вероятности  $P_{ок} < 0,9973$  «трёхкратной», в диапазоне 0,9545—0,9973, т. е. при количестве измерений в интервале  $10 \leq n \leq 18$ , работу следует принять с хорошей оценкой (рисунок 3 — заштрихованная область), и если положительное решение принято при  $n > 18$ , то оценка будет удовлетворительной (рисунок 3 — справа от заштрихованной области).

*Пример.* Требуется произвести контроль ширины (7 м) асфальтобетонного покрытия дороги. В процессе измерений курвиметром с шагом 15 м получен ряд результатов (в числителе отклонений  $S$ , см, в знаменателе — накопленная сумма квадратов  $[S^2]_n$ , в скобках — номер измерения: (4/16 (1), 10/116 (2), 1/117 (3), 3/126 (4), 2/130 (5), 5/155(6), 2/159 (7), 7/208 (8), 4/224 (9), 5/249 (10), 3/258 (11)). На 11-м измерении  $[S^2]_n$  выходит

за пределы области продолжения измерений, заштрихованной на рисунке 1. Поскольку на этом этапе  $[S^2]_n < a_n$  или  $258 < 267$ , то анализ можно закончить и реализацию проектной ширины покрытия 7 м считать выполненной с оценкой «хорошо» ( $10 < n < 18$ ).

Очевидно, что математические методы принятия решений (в частности, вероятностно-статистический последовательный анализ) позволяют научно обосновать в соответствии с нормативно правовой документацией и вести процесс приёмочных измерений, объективно и дифференцированно оценивать состояние выполненных работ, значительно повышая при этом производительность геодезического контроля качества дорожного строительства.

### Список литературы

1. Бируля А. К. Эксплуатация автомобильных дорог: Учебник для специальности «Автомобильные дороги» вузов. М.: Транспорт, 1966. 326 с.
2. Дрю Д. Теория транспортных потоков и управление ими. М.: Транспорт, 2012. 424 с.
3. Иванов В. Н., Ерохов В. Н. Влияние параметров автомобильных дорог на расход топлива // Автомобильные дороги. 2014. № 8. С. 10—13.
4. Применение теории массового обслуживания в проектировании автомобильных дорог / Я. А. Калужский, И. В. Бегма, В. М. Кисляков, В. В. Филиппов. М.: Транспорт, 1969. 136 с.
5. Кондрашова Е. В., Скворцова Т. В. Совершенствование организации дорожного движения в транспортных системах лесного комплекса // Системы управления и информационные технологии. 2008. № 3-2 (33). С. 272—275.
6. Сильянов В. В., Ситников Ю. М. Расчёт скоростей движения при проектировании автомобильных дорог // Тр. МАДИ. 1974. Вып. 72. С. 47—66.
7. Хомяк Я. В. Проектирование сетей автомобильных дорог. М.: Транспорт, 1983. 207 с.
8. Berestnev O., Soliterman Y., Goman A. International Symposium on History of Machines and Mechanisms Proceedings. 2000. P. 325—332.
9. Algorithm for determining the curvature of the project line of a truck haul road and the rate of change in its curvature / A. O. Borovlev, A. V. Skrypnikov, V. G. Kozlov [et al.] // Civil Engineering and Architecture. 2021. No. 9 (5). P. 1582—1589. DOI: 10.13189/CEA.2021.090528.
10. Intelligent design system for logging truck roads / A. O. Borovlev, A. V. Skrypnikov, V. G. Kozlov [et al.] // International Journal of Engineering Trends and Technology. 2021. No. 69 (8). P. 89—95. DOI: 10.14445/22315381/IJETT-V69I8P211.
11. A linear model of the forest transport network and an algorithm for assessing the influence of the density of points and the length of links in developing multi-forested areas / V. V. Nikitin, A. V. Skrypnikov, V. G. Kozlov [et al.] // International Journal of Engineering Trends and Technology, 2021. No. 69 (12). P. 175—178. DOI: 10.14445/22315381/IJETT-V69I12P220.
12. Theoretical background of road landscape zoning / A. V. Skrypnikov, V. G. Kozlov, V. V. Samtsov [et al.] // Paper presented at the IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2021. No. 659 (1). DOI: 10.1088/1755-1315/659/1/012011.
13. Feasibility study of geometrical parameters of wood transportation roads including prediction of optimum terms of construction and retrofitting sequence / A. V. Skrypnikov, V. G. Kozlov, V. A. Zelikov [et al.] // Civil Engineering and Architecture. 2021. No. 9 (6), P. 2077—2083. DOI: 10.13189/cea.2021.090635.



## References

1. Birulya A. K. *Ekspluatatsiya avtomobil'nyh dorog: Uchebnik dlja specialnosti «Avtomobilnye dorogi vuzov»*. Moscow, Transport, 1966. 326 p. (In Russ.)
2. Dryu D. *Teoriya transportnyh potokov i upravlenie imi*. Moscow, Transport, 2012. 424 p. (In Russ.)
3. Ivanov V. N., Erohov V. N. Vliyanie parametrov avtomobil'nyh dorog na raskhod topliva. *Avtomobil'nye dorogi*, 2014, no. 8, pp. 10—13. (In Russ.)
4. Kaluzhskij Ya. A., Begma I. V., Kislyakov V. M., Filippov V. V. *Primenenie teorii massovogo obsluzhivaniya v proektirovanii avtomobil'nyh dorog*. Moscow, Transport, 1969. 136 p. (In Russ.)
5. Kondrashova E. V., Skvorcova T. V. Sovershenstvovanie organizacii dorozhnogo dvizheniya v transportnyh sistemah lesnogo kompleksa. *Sistemy upravleniya i informacionnye tekhnologii*, 2008, no. 3-2 (33), pp. 272—275. (In Russ.)
6. Sil'yanov V. V., Sitnikov Yu. M. Raschet skorostej dvizheniya pri proektirovanii avtomobil'nyh dorog. *Tr. MADI*, 1974, vyp. 72, pp. 47—66. (In Russ.)
7. Homyak Ya. V. *Proektirovanie setej avtomobil'nyh dorog*. Moscow, Transport, 1983. 207 p. (In Russ.)
8. Berestnev O, Soliterman Y, Goman A *International Symposium on History of Machines and Mechanisms Proceedings*, 2000, pp. 325—332.
9. Borovlev A. O., Skrypnikov A. V., Kozlov V. G., Teterleva E. V., Burmistrov V. A., Mikheevskaya M. A., Chemshikova Y. M. Algorithm for determining the curvature of the project line of a truck haul road and the rate of change in its curvature. *Civil Engineering and Architecture*, 2021, no. 9 (5), pp. 1582—1589. doi: 10.13189/CEA.2021.090528.
10. Borovlev A. O., Skrypnikov A. V., Kozlov V. G., Zelikov V. A., Pilyushina G. A., Burmistrov V. A., Kazachek M. N. Intelligent design system for logging truck roads. *International Journal of Engineering Trends and Technology*, 2021, no. 69 (8), pp. 89—95. doi: 10.14445/22315381/IJETT-V69I8P211.
11. Nikitin V. V., Skrypnikov A. V., Kozlov V. G., Bryukhovetsky A. N., Manukovsky A. Y., Vysotskaya I. A., Sapelkin R. S. A linear model of the forest transport network and an algorithm for assessing the influence of the density of points and the length of links in developing multi-forested areas. *International Journal of Engineering Trends and Technology*, 2021, no. 69 (12), pp. 175—178. doi: 10.14445/22315381/IJETT-V69I12P220.
12. Skrypnikov A. V., Kozlov V. G., Samtsov V. V., Nikitin V. V., Denisenko V. V., Boltnev D. E. Theoretical background of road landscape zoning. *Paper presented at the IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2021, no. 659 (1). doi: 10.1088/1755-1315/659/1/012011.
13. Skrypnikov A. V., Kozlov V. G., Zelikov V. A., Tikhomirov P. V., Levushkin D. M., Nikitin V. V., Sokol P. A. Feasibility study of geometrical parameters of wood transportation roads including prediction of optimum terms of construction and retrofitting sequence. *Civil Engineering and Architecture*, 2021, no. 9 (6), pp. 2077-2083. doi: 10.13189/cea.2021.090635.

DOI: 10.15393/j2.art.2022.6463

УДК: 630.3

Обзор

## **Проблемы и перспективы получения и применения топлив из биомассы, снижающих выбросы парниковых газов**

**Беляев Сергей Васильевич**

*кандидат технических наук, доцент, Петрозаводский государственный университет (Российская Федерация), [sergbel2014@mail.ru](mailto:sergbel2014@mail.ru)*

**Левина Мария Сергеевна**

*младший научный сотрудник, отдел комплексных научных исследований ФИЦ «Карельский научный центр РАН», [marilevine@ya.ru](mailto:marilevine@ya.ru)*

*Получена: 15 июня 2022 / Принята: 26 сентября 2022 / Опубликовано: 29 сентября 2022*

---

**Аннотация:** Энергетический кризис, неуклонный спрос на энергоносители вызывают увеличение интереса к альтернативным источникам получения топлив, в т. ч. из биомассы, для генерации электроэнергии и использования на транспорте. Более строгие требования, предъявляемые к экологическим характеристикам к топливам и энергоустановкам, привели к масштабному поиску новых, экономически эффективных, экологически чистых энергоносителей. В статье рассматриваются и анализируются вопросы производства и применения биотоплив, которые в настоящее время во многих регионах мира считаются приоритетными, альтернативными видами топлив. Рассматриваются основные пути и технологии получения биотоплив первого и второго поколений, их важнейшие свойства, экологические характеристики и влияние на сокращение выбросов парниковых газов. Вероятно, что биотоплива второго поколения с использованием технологии Фишера — Тропша имеют существенные преимущества по сравнению с биотопливами первого поколения. Можно предположить, что, используя относительно дешёвые ресурсы биомассы, они могут создать конкуренцию нефтяным топливам в отдельных регионах Европы и мира. Потенциальные выгоды от расширения использования биотоплив и биоэнергии видятся в том, что биоэнергетика может способствовать развитию экономики, увеличению рабочих мест, особенно в аграрном и лесном секторах, оздоровлению окружающей среды; повышению энергетической безопасности ряда регионов и стран. Можно ожидать, что в среднесрочной перспективе

будущие технологические достижения повысят конкурентоспособность биотоплив первого и второго поколений. В настоящее время в европейских странах рассматривают увеличение объёмов производства биотоплив как способ сокращения зависимости от импорта российской нефти и газа, а также сокращения выбросов парниковых газов. С другой стороны, в России достаточно много запущенных земель, которые можно использовать для выращивания культур для нужд биоэнергетики, как для собственного потребления, так и для экспорта, повышая свой потенциал на мировых рынках биотоплив.

**Ключевые слова:** биомасса; биотоплива; парниковые газы; первое и второе поколения биотоплив, технологии Фишера — Тропша

---

DOI: 10.15393/j2.art.2022.6463

*Review*

## **Problems and prospects of obtaining and using biomass fuels that reduce greenhouse gas emissions**

**Sergey Belyaev**

*PhD in engineering, associate professor, Petrozavodsk State University (Russian Federation),  
sergbel2014@mail.ru*

**Maria Levina**

*Junior Researcher, Department of Multidisciplinary Scientific Research, KarRC RAS  
(Russian Federation), marilevina@ya.ru*

*Received: 15 Jun 2022 / Accepted: 26 September 2022 / Published: 29 September 2022*

---

**Abstract:** The energy crisis and steady demand for energy sources lead to keen interest in alternative sources of fuel production including biomass usage for generating electricity and for transportation. Stricter requirements for the environmental characteristics of fuels and power plants have led to a far-reaching search for new, cost-effective, and environmentally friendly energy carriers. The article discusses and analyzes the issues of production and use of biofuels, which are currently considered priority alternative fuels in many regions of the world. The main ways and technologies of obtaining biofuels of the first and second generations, their most important properties, environmental characteristics and their impact on reducing greenhouse gas emissions are considered. It is likely that second-generation biofuels obtained by using Fischer-Tropsch technology have significant advantages over first-generation biofuels and it can be assumed that because of relatively cheap biomass resources they might create competition for petroleum fuels in certain regions of Europe and the world. The potential benefits of expanding biofuels and bioenergy use might be gained due to economy development, new jobs, especially in the agricultural and forestry sectors, environmental enhancement and energy security improvement in a number of regions and countries. It can be expected that in the medium term period future technological advances will increase the competitiveness of biofuels of both the first and second generations. Currently, European countries are considering increasing the production of biofuels as a way to reduce the level of energy dependence on Russian oil and gas import and to reduce greenhouse gas emissions. It should be noted that there are quite a lot of neglected lands in Russia that can be used for growing crops for bioenergetics

demands, both for internal consumption and for export thus increasing the potential in the global biofuel markets.

**Keywords:** Biomass, biofuels, greenhouse gases, first and second generation biofuels, Fischer-Tropsch technology

---

## 1. Введение

Неуклонный спрос на энергоносители вызывает увеличение интереса к альтернативным источникам получения топлива для генерации электроэнергии и использования его на транспорте. Рост количества и плотности автомобилей на квадратный километр в городских условиях, более строгие требования к экологическим характеристикам транспортных средств привели к широкомасштабному поиску новых, экономически эффективных, экологически чистых энергоносителей.

В центре внимания многих исследований научных центров и компаний, прежде всего, стоит вопрос о влиянии новых технологий на уменьшение выбросов парниковых газов и глобальное потепление.

## 2. Материалы и методы

Объектом исследования являются материалы и информация, статьи из открытых литературных источников по актуальным вопросам получения и применения топлив и энергоносителей из биомассы разного происхождения по современным и перспективным технологиям, которые уменьшают выбросы парниковых газов.

В статье использованы такие методы исследования, как анализ и системный подход. Предлагается рассматривать биоэнергетику в качестве системы, которая динамично развивается с имеющимися противоречиями и рисками.

## 3. Результаты

Парниковые газы, в основном, состоят из диоксида углерода ( $\text{CO}_2$ ), который содержится в выхлопных газах автомобилей, работающих на нефтяных топливах. Если общественное мнение и ситуация на рынках будут настроены на дальнейшее снижение выбросов парниковых газов в транспортном секторе, то новые технологии с меньшим выделением парниковых газов будут развиваться более динамично. Доля выбросов парниковых газов, приходящихся на транспорт в промышленно развитых странах, достигает 30 % и около 20 % в мире [1], [2]. Чтобы корректно провести анализ по сравнению выбросов среди современных и будущих транспортных технологий, методика должна учитывать полный их жизненный цикл. Например, жизненный цикл автомобильной технологии включает все этапы снабжения топливом, производство автомобиля, его эксплуатацию и утилизацию неисправного автомобиля. Применение методики оценки жизненного цикла очень значимо при использовании на автомобиле нового топлива и позволяет исследовать, насколько меньше или больше автомобиль потребляет топлива и выделяет углекислого газа на километр пройденного пути [19].

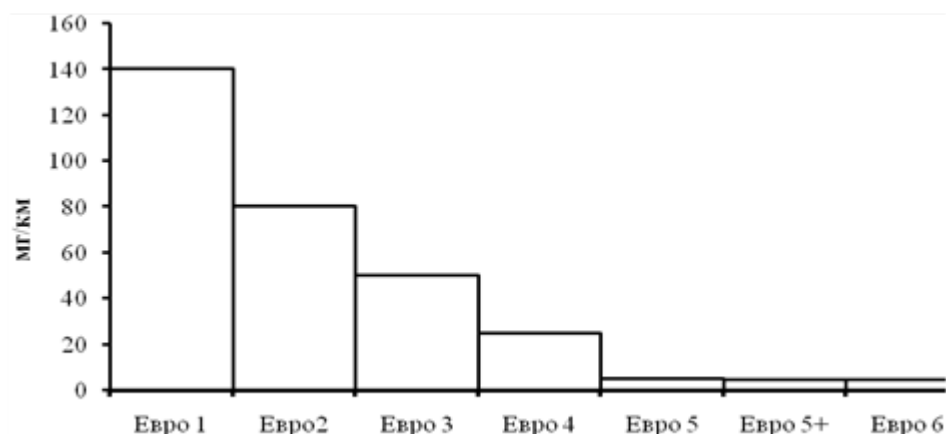
При детальном анализе применения того или иного топлива следует проследить всю технологическую цепочку продвижения его до автомобиля: от места добычи исходного сырья (нефти, газа и пр.) до переработки, транспортировки и т. д. Также топливо должно быть доставлено до места потребления и оказаться в баке автомобиля. Вышеперечисленная технологическая цепочка, включающая отдельные стадии продвижения топлива к автомобилю, часто определяется как «well — to — tank». Аналогично происходит и с автомобилями. Следует учитывать все затраты энергии, выбросы вредных веществ на всех этапах производства автомобиля, некоторых его узлов, доставку к потребителю.

Сжигание традиционных топлив, получаемых из нефти, характеризуется серьёзным отрицательным влиянием на окружающую среду. В результате внедрения новых технологий за последние годы были достигнуты впечатляющие результаты по улучшению экологических свойств нефтяных топлив и технико-экономических параметров тепловых двигателей и транспортных средств. Внедрение «зелёных» транспортных технологий неизбежно и сегодня, и в перспективе. Например, использование нефтяных топлив, к которым относятся топливный этанол, биодизель, водород [10], [11], [12]. Автомобили, способные работать на спирто-бензиновых смесях, называют «Flex-Fuel Vehicle» или FFV. Данные технологии уже апробированы во многих странах и регионах мира (Бразилия, США, Европа и т. д.) [7], [8].

Большие надежды на создание почти идеального, экологически чистого автомобиля связаны с применением водородных топливных элементов. Однако ряд нерешённых технических задач (стоимость получения водорода, логистика, хранение и т. д.) не позволяет рассматривать водородные технологии готовыми для их широкой коммерциализации [8].

Еще в начале 1970-х гг. в США и Европе в связи резким увеличением количества автомобилей и ухудшением экологии производители транспортных средств были вынуждены внедрять новые технологии и совершенствовать системы питания двигателей внутреннего сгорания и очистки вредных выбросов [6]. В результате предпринятых мер традиционные автомобильные двигатели, работающие на нефтяном топливе, суммарно сократили выбросы токсичных веществ более чем на 90 %. На рисунке показана динамика сокращения крайне токсичных, твёрдых, сажистых частиц, обладающих канцерогенными свойствами и вызывающих рак лёгких (по данным ВОЗ).

Особое внимание уделяется получению биотоплив в регионах мира, богатых биоресурсами различной природы. Эффективность применения топлива из биомассы уже доказана в ряде стран. Потенциально биотоплива могут решить некоторые экономические, экологические и энергетические проблемы и внести свой вклад в диверсификацию энергоносителей. По мере того как цены на энергоносители растут и становятся всё более неустойчивыми на фоне политических событий, экономического кризиса в ряде регионов мира, а также свидетельств глобального изменения климата, аргументы в пользу чистых, возобновляемых, внутренних источников энергии становятся более очевидными.



**Рисунок.** Динамика уменьшения выбросов сажистых частиц для дизельных двигателей (мг/км)

**Figure.** Dynamics of soot particle concentration for diesel engines (mg/km)

Биомасса, в основном вещество растительного происхождения, может быть преобразована в тепло, электричество и топливо, которое составляет альтернативу нефтяным топливам. Потенциальные выгоды от расширения использования биотоплив и биоэнергии видятся в том, что биоэнергетика может способствовать развитию экономики, увеличению рабочих мест, особенно в аграрном и лесном секторах, оздоровлению окружающей среды, повышению энергетической безопасности ряда регионов и стран. Опыт Скандинавских стран, таких как Финляндия и Швеция, убедительно это доказывает. Если же рассматривать энергетическую безопасность регионов, критически зависящих от нефтяных топлив, то баланс выгод может склоняться в пользу использования биомассы и местных источников энергии. Это особенно актуально для стран, зависящих от импортируемых углеводородов в большом объёме [14], [15].

Принятые решения в последнее десятилетие Европейским союзом по оздоровлению окружающей среды реализуются за счёт законодательного внедрения норм, предписывающих объёмное и массовое содержание особо вредных веществ в отработавших газах автомобилей. Более чем тридцатилетний опыт применения данных мер показал высокую их эффективность как в глобальном масштабе, так и на локальном уровне. Предпринятые усилия привели к значительному уменьшению выбросов и на порядок повысили экологические характеристики и дизельных, и бензиновых двигателей. Как вариант потенциального решения проблем в перспективе, оздоровления экологической обстановки и радикального уменьшения выбросов парниковых газов является переход на использование водородных топливных элементов. На сегодняшний день этот вариант пока является достаточно затратным с технической и экономической точки зрения.

Топлива из возобновляемых ресурсов биомассы существуют на рынке энергоносителей достаточно давно. Среди них можно отметить биоэтанол, получаемый при ферментации



сахара или крахмала (для бензиновых двигателей), и биодизель, производимый в результате реакции трансэстерификации (образования сложных эфиров растительных масел или животных жиров). Обычно вышеназванные топлива относят к биотопливам первого поколения. Биотоплива первого поколения получают из возобновляемых ресурсов: сахарного тростника, свеклы, масленичных культур, пшеницы. По сравнению с нефтяными топливами они представляют собой топлива с более высокими экологическими характеристиками. Основное достоинство — уменьшение эмиссии диоксида углерода. В то же время их преимущества по многим критериям являются сомнительными. Например, себестоимость производства выше их ископаемых конкурентов, относительно небольшой выход топлива с гектара земли, уже имеющаяся конкуренция с сельскохозяйственными культурами пищевого назначения. Некоторые сельскохозяйственные культуры (например, сахарный тростник, маис и масличная пальма, из мякоти её плодов получают пальмовое масло) могут иметь большой выход с гектара в ряде стран с благоприятными климатическими условиями для их произрастания.

Что касается суммарного сокращения выбросов парниковых газов, то этот показатель зависит от многих факторов. Если проанализировать весь жизненный цикл получения биотоплива, то в большинстве случаев результат их применения очень скромный, если не сказать отрицательный. Здесь необходимо учитывать комплекс факторов, среди которых можно отметить: необходимость добычи, транспортировки и внесения удобрений, затраты на выращивание и сбор урожая, транспортировку и обработку огромных объёмов растительного материала, доставку исходных материалов для получения биотоплива от места произрастания к местам переработки / потребления.

Создание нового поколения лигноцеллюлозных культур для получения энергии требует решения трёх основных задач:

1. Максимальное производство биомассы с единицы площади за один год.
2. Выход на устойчивое развитие с минимальными затратами.
3. Получение максимального количества топлива из единицы биомассы.

Перспективным направлением можно считать и создание специальных лесонасаждений, предназначенных для нужд энергетики. Энергетические леса (плантации) выращиваются с целью получения энергии. Стоимость производства их остаётся достаточно высокой, однако возможно её уменьшение с созданием и выращиванием плантаций различных культур с высокой урожайностью и применением эффективных методов лесозаготовок. В настоящее время энергоплантации создаются, например, в Бразилии, где эвкалиптовые леса обеспечивают сталелитейную промышленность древесным углём. Энергетические леса (плантации) часто могут быть выращены на земельных участках с относительно низким уровнем качества почвы. Они не требуют применения удобрений и пестицидов в большом количестве. Однако особое внимание должно быть уделено селекционным видам и большим монокультурам. В отдалённой перспективе наилучшие результаты могут быть получены при использовании местных и смешанных видов с сохранением некоторого биоразнообразия.

Очень важно также найти приемлемый баланс между высокой продуктивностью таких плантаций и сохранением питательных свойств лесных земель. Инновационные энергоресурсы и растения, специально созданные для промышленного производства биотоплив, могут быть созданы на основе новых биотехнологий и технологических процессов [15], [17].

Последние научные достижения в лабораториях США и Европы показывают, что существуют пути для дальнейшего повышения эффективных технологий получения этанола из целлюлозной биомассы. С этой целью в США разработана стратегия по развитию биотопливной промышленности на основе широкого использования целлюлозной биомассы. В рамках данной стратегии планируется к 2030 г. довести до 30 % применение на транспорте биотоплив, тем самым значительно уменьшить потребление нефтяных топлив [15], [17].

Следует отметить, что уровень потребления и производства этанола значительно вырос за последние 20 лет. Многие страны принимают меры по стимулированию расширения его производства и сфер потребления. Россия имеет все необходимые условия для широкомасштабного производства топливного этанола. По мнению ряда экспертов, а также в результате проведенных исследований [9], [10] с целью снижения затрат на производство этанола из целлюлозной биомассы следует больше внимания уделить совершенствованию технологии по предварительной обработке биомассы и объединению основных биопроцессов (гидролиз целлюлозы, ферментация гемицеллюлозы и сахаров) в одном технологическом цикле, на одном реакторе и с использованием одних ферментов. Россия одна из немногих стран, которая обладает богатым опытом получения этанола по гидролизным технологиям, но которые недостаточно эффективны и уже устарели. Однако для широкого применения этанола в качестве моторного топлива или добавок в топлива, очевидно, требуются дополнительные усилия для повышения эффективности существующих технологий, уменьшения стоимости целлюлозного этанола.

Кроме того, биотоплива первого поколения не предлагают долгосрочного решения проблемы возрастающего количества выбросов парниковых газов. Тем не менее этанол и биодизель могут быть получены по относительно простым и доступным технологиям. Применение биотоплив первого поколения доказало их преимущества перед нефтяными энергоносителями: минимальное содержание серы, улучшение смазывающих свойств биодизеля (даже в качестве присадки 1—2 % при использовании в современных дизельных двигателях), высокие октановые числа спиртов, существенное снижение сажистых частиц, оксидов азота ( $\text{NO}_x$ ) (кроме биодизеля) и оксида углерода ( $\text{CO}$ ) в выбросах.

В среднесрочной перспективе можно ожидать появления синтетических жидких моторных топлив, получаемых из других ископаемых ресурсов (помимо нефти, природного газа и угля), а также из биомассы. Производство синтетического топлива состоит из двух этапов, независимо от используемого сырья. В первую очередь сырьё преобразуется в синтез-газ (водород и монооксид углерода). Затем процесс Фишера — Тропша используется для получения жидких продуктов, которые применяются при производстве

дизельного и реактивного топлива. Этот путь позволяет получить моторное топливо очень высокого качества. Исходным сырьём может быть природный газ, уголь или биомасса. Термин ХТЛ используется для обозначения преобразования различных видов сырья в жидкости. Преимущества каждого пути и связанные с ним затраты, будь то экологические или экономические, в значительной степени зависят от типа используемого сырья. Различные отходы, такие как опилки, солома, бытовые пищевые отходы, бытовые сточные воды, навоз, также могут быть сырьём для производства биотоплива. Топлива, полученные по технологиям переработки отходов, принято называть биотопливами второго поколения.

Химический состав биотоплива второго поколения может отличаться от биотоплива первого поколения. Как правило, биотоплива второго поколения обладают более высокой энергетической плотностью, что делает их наиболее привлекательными для потенциальных потребителей. Например, синтетическое дизельное топливо может обладать более высоким цетановым числом, иметь лучшие вязкостно-температурные показатели, стабильность, в нём не содержится сера и т. п. Биодизель второго поколения более удобен для использования с традиционным дизельным топливом, чем биодизель первого поколения. Биэтанол второго поколения (из лигноцеллюлозы) химически идентичен с тем, что производится сегодня.

Известны следующие технологии получения биотоплива второго поколения:

- Биологические и ферментные процессы, преимущественно для получения биоэтанола из целлюлозного сырья, например, используя ферментный или кислотный гидролиз.
- Термохимические процессы и связанные с ними каталитические технологии для получения различных биотоплив, в т. ч. синтетического дизельного топлива и бензина.

Термохимические технологии имеют свои преимущества. Они позволяют получать углеводороды, которые совместимы с нефтяными топливами, что очень важно для развития инфраструктуры и получения топливных смесей. Термохимические технологии для производства биотоплива второго поколения включают:

- Газификацию биомассы — получение синтетического газа.
- Пиролиз (на практике мгновенный пиролиз) для производства пиролизного масла.
- Гидротермическая обработка влажной биомассы.
- Синтез Фишера — Тропша (Fisher — Tropesch) углеводородов из синтетического газа с процессами перегонки и обработки (FT).
- Синтез метанола с последующим синтезом бензина и/или дизеля при помощи технологии метанол в олефин, бензин, или дизель, или метанол в бензин.

Особенно высок потенциал получения биотоплив из лигноцеллюлозной биомассы по технологиям Фишера — Тропша [13], [18]. Для производства моторных топлив одной из ключевых технологий современности является технология Фишера — Тропша, которая успешно применяется в технологиях преобразования газа в жидкость (GTL) и угля в жидкость (CTL). Надо отметить, что уже существует несколько промышленных установок, использующих эту технологию, и количество их неуклонно растёт. Первые шаги навстречу промышленному использованию данных технологий были предприняты компанией Choren

Industries. Итогом работы специалистов стало недавнее завершение строительства этой компанией установки по изготовлению синтетического топлива из биомассы разной природы по технологии BTL, с объёмом производства до 18 млн л топлива ежегодно. Технология получения BTL основана на косвенной термохимической конверсии биомассы. BTL является одним из вариантов получения биотоплива второго поколения.

В последние годы разработаны обширные исследовательские программы по изучению биохимического превращения лигноцеллюлозной биомассы в этанол. Промышленная жизнеспособность технологий производства этанола из лигноцеллюлозной биомассы ещё требует дополнительных исследований. Доведение этого процесса до промышленного масштаба поставило бы ряд вопросов, связанных с оптимизацией каждого этапа (предварительная обработка, гидролиз и ферментация), особенно с экономической точки зрения. Первые опытные лигноцеллюлозные установки, предназначенные для производства этанола, были построены ещё в Северной Америке в 2006 г.

Быстрый рост производства биотоплива был обусловлен инновациями частного сектора. Для поддержания этого роста правительства стран Европейского союза активно работают в партнёрстве с частным сектором для достижения улучшений по всем видам сырья, которые могут быть использованы для получения биотоплив в ближайшем и долгосрочном периодах [14—16].

Для производства биотоплив возможно использовать широкий спектр исходного сырья:

- Сырьё первого поколения. Например, в США это кукуруза для этанола и соевые бобы для биодизеля. В настоящее время это сырьё используется и его урожайность растёт. В различных регионах возможны и другие варианты.

- Сырьё второго поколения состоит из остатков урожая сельскохозяйственных и лесных культур. Их использование показывает многообещающие перспективы для краткосрочного внедрения с развитием технологий конверсии целлюлозы.

- Сырьё третьего поколения — это культуры, которые требуют дальнейших исследований и разработок для коммерциализации, такие как многолетние травы, быстро растущие деревья и водоросли. Они предназначены исключительно для производства топлива и обычно называются «энергетическими культурами», представляют собой ключевой долгосрочный компонент устойчивой биотопливной промышленности.

В ряде регионов мира активно проводятся НИОКР по созданию высокоурожайных технологических систем для получения биомассы и специализированных энергетических культур, которые не нарушают существующие производственные парадигмы, поддерживают и укрепляют важнейшие природные ресурсы, необходимые для их производства (например, воду, воздух и почву). Также разрабатываются специальные биоэнергетические культуры с помощью традиционной селекции и передовых биотехнологий.

Одной из самых современных разработок, относящихся к топливам, создаваемым из возобновляемых источников сырья и их отходов, является биологическое дизельное топливо нового поколения NExBTL фирмы Neste Oil. Это топливо, которое, с одной

стороны, увеличивает срок службы двигателя, а с другой — серьёзно снижает эмиссию вредных газов, в т. ч. и парниковых [19]. Биотопливо NexBTL доступно в продаже в Европе и США, руководство компании рассматривает возможность выхода и на другие рынки.

**Таблица.** Сравнение основных свойств топлив для дизелей

**Table.** Comparison of the main properties of diesel fuels

Основные свойства топлив	NexBTL NESTE OIL	GTL газ в жидкость	FAME биодизель (из рапса)	Летнее дизельное топливо
Плотность, кг/м <sup>3</sup> , при 15° С	775—785	770—785	885	835
Вязкость, мм <sup>2</sup> /с, 40° С	2,9—3,5	3,2—4,5	4,5	3,5
Цетановое число	80—99	73—81	51	53
Удельная теплота сгорания, МДж/кг	44,0	43,0	37,5	42,7
Содержание ароматических веществ, %	0	0	0	30
Содержание кислорода, %	0	0	11	0
Содержание серы, мг/кг	< 10	< 10	< 10	< 10
Температура помутнения, ° С	от -5 до -25	от 0 до -25	-5	-5

Многие из вышеперечисленных технологий были апробированы в промышленных масштабах. Как оказалось, основные задачи, которые придётся решать в перспективе, не связаны с техническими вопросами. Устойчивое снабжение сырьём для установок промышленного получения конечного продукта (BTL) будет наиболее важной проблемой и требует ряда организационных и логистических решений обеспечения биомассой, которые позволят оптимизировать финансовую, углеродную и энергетическую составляющие затрат на производство конечного продукта.

Другой существенной частью расходов являются капитальные вложения на газификацию и установку Фишера — Тропша. Снижение затрат возможно с увеличением объёмов производства биотоплив по технологии Фишера — Тропша на установках с высокой производительностью, что, в свою очередь, как сказано выше, тесно связано с устойчивым обеспечением сырьём в очень больших объёмах. По мнению ряда экспертов, именно эти факторы могут привести к вынужденным ограничениям выработки альтернативного

топлива. На первом этапе потребуются крупные капитальные вложения, что не только скажется на цене продукта, но и представляет инвестиционный риск. Это является огромным барьером на пути внедрения данных технологий. Пока не будет оценена основная выгода от использования биотоплива второго поколения в части уменьшения выбросов парниковых газов, не будет и стимула для вложения основных инвестиций.

Предварительная оценка эффективности работы установки FT [4], [5] в Европе показала, что объём производимого топлива должен превышать 100 млн л в год, на что потребуется 1,5 млн м<sup>3</sup> древесины. Для европейских стран, как правило, стоимость древесины достаточно высока. Наиболее дешёвое сырьё сосредоточено вне еврозоны и импортируется (из России, стран Балтии). Один из путей уменьшения стоимости сырья биомассы — использовать сырьё, несущее отрицательную рыночную цену, для которого определена необходимость утилизации, например, бытовые органические отходы и осадки сточных вод. Данные виды сырья содержат много воды, что делает их неудобными для газификации без затратной (финансово и энергетически) сушки и транспортировки в больших объёмах. Для использования данного вида сырья необходима гидротермическая доработка и сверхкритическая газификация, которые находятся на ранних стадиях разработки. Другие шаги к уменьшению цены включают адаптацию упрощённых типов перегонных процессов (таких как гидрокрекинг) биомасс производственных жидкостей вместе с разработками катализаторов.

#### 4. Обсуждение и заключение

С учётом последних изменений на рынке энергоносителей и законодательных тенденций в области защиты окружающей среды можно ожидать, что второе поколение биотоплив имеет неплохие перспективы. Возможно, что через 5—10 лет может начаться их активный этап коммерциализации. Применительно к балансу парниковых газов они выигрывают по сравнению с биотопливами первого поколения — биотоплива второго поколения требуют меньше земельных ресурсов. Используя современные биотехнологии, с одного гектара можно получить в 2—3 раза больше конечного продукта.

Не вызывает сомнения, что страны Европейского союза и США в конечном счёте будут последовательно сокращать свою зависимость от нефти; проблема лишь в том, сколько времени на это потребуется и какова цена вопроса перехода на альтернативные источники энергии [7], [8].

Высокоэффективное управление технологическими процессами должно быть интегрировано со специализированным оборудованием для обеспечения качества, последовательности и надёжности поставок сырья с течением времени, сохраняя при этом разумную стоимость поставки. Однако естественные риски сельскохозяйственной системы, включая ежегодные колебания в производстве, севооборотах и поддержании питательных веществ в почве в долгосрочной перспективе, затрудняют принятие мер по сокращению

затрат. Препятствия, которые необходимо преодолеть, можно разделить на две основные категории:

– Логистика, проектирование и управление предприятием: система сбора, хранения и предварительной обработки сырья будет варьироваться в зависимости от его типа, региональной географии и структуры собственности на систему. Задача состоит в том, чтобы снизить эксплуатационные затраты на рабочую силу и топливо, которые составляют практически все расходы в этом элементе цепочки поставок.

– Развитие технологий: новые технологии необходимы для поддержки эффективного, экономичного и устойчивого сбора и обработки биомассы. Они включают творческие подходы к перемещению сырья с поля на завод, такие как отправка суспензии по специальным трубопроводам, однопроходные комбайны для сбора сельскохозяйственных остатков во время уборки товарных культур и лесные измельчители для обеспечения уплотнения лесных остатков во время сбора [15], [18].

Хотя НИОКР в области целлюлозного этанола позволили добиться прогресса в сокращении предполагаемых затрат на конверсию, производственные затраты остаются слишком высокими для того, чтобы топливо на основе биомассы могло конкурировать на рынке. Для того чтобы сделать биотопливо на основе растительного волокна экономически жизнеспособным, очевидно, потребуются оригинальные технологические решения в фундаментальной и прикладной науке. Например, одним из ключевых барьеров является естественная устойчивость растительного волокна к расщеплению на промежуточные продукты. Научно-технические проблемы здесь огромны. Значительная работа необходима для лучшего понимания клеточных стенок растений, в которые встроено растительное волокно или лигноцеллюлоза, чтобы обеспечить экономически эффективное разрушение и деконструкцию растительного материала. Биотехнологическая революция обещает развитие биологических знаний на системном, клеточном и молекулярном уровне, которые могли бы позволить нам «перестроить» растения, ферменты и микробы, чтобы преодолеть существующие препятствия.

Ещё одним ключевым барьером является понимание того, как растительный материал разрушается термически. Кроме того, существует потенциал для нового прогресса в химических и термохимических процессах конверсии за счёт улучшения катализа. Значительные фундаментальные и прикладные исследования будут необходимы для разработки экономически эффективных и коммерчески жизнеспособных конверсионных технологий для получения в больших объёмах биотоплива из древесной биомассы [14]. [20].

На сегодняшний день исследователи сосредоточились преимущественно на целлюлозном этаноле, который стал первым целлюлозным биотопливом, коммерчески доступным для ряда регионов мира. Но существует также потенциал для производства других видов топлива, включая высшие спирты, «зелёный» бензин и дизельное топливо, а также авиационное топливо, получаемое путём ферментативной, микробиологической и/или химической каталитической переработки биомассы. Остаются существенные вопросы стоимости

и объёмов производства. Однако такое современное биотопливо будет иметь многочисленные преимущества, например, иметь энергетическое содержание, сопоставимое с нынешним топливом на основе нефти, и более лёгкую интеграцию в существующую топливную инфраструктуру.

В связи с вышеизложенным необходимы дополнительные усилия и следующие шаги:

- Развитие знаний о растениях, микробах и ферментах на системном, клеточном и молекулярном уровнях.
- Разработка технологий совместного производства товарного топлива и сопутствующих продуктов с добавленной стоимостью, которые могут улучшить общую экономику производства.
- Открытие и разработка более совершенных технологий получения углеводородного топлива из лигноцеллюлозной биомассы с использованием микробиологических, термохимических или каталитических процессов.
- Решение фундаментальных вопросов катализа в газовой и жидкой фазах, включая характеристику и долговечность.
- Оптимизация процессов для обеспечения экономической жизнеспособности технологий в малых масштабах.
- Выявление процессов и инноваций, достигнутых в смежных отраслях, таких как нефтепереработка, которые могут быть использованы для повышения эффективности путей преобразования биотоплива.

## 5. Выводы

1. Необходимо осуществлять планомерное снижение выбросов парниковых и других нежелательных выбросов. Особое место занимают меры, стимулирующие использование биотоплив. Их разновидности предоставляют потенциально значительные возможности для сокращения выбросов CO<sub>2</sub>.

2. Новое поколение топлив из биомассы разной природы может обеспечить большее сокращение выбросов парниковых газов при более низкой себестоимости, хотя остаётся ещё и ряд неопределённостей.

3. Очевидно, не обойтись без поддержки исследований и развития биотоплив второго поколения на государственном уровне. В связи с крайней нестабильностью на рынке углеводородов, скачками цен на нефть примером являются США, Европейский союз, которые делают всё возможное для реализации поставленных целей.

4. Стимулы разработки биотоплив следует увязывать с показателями эффективности снижения CO<sub>2</sub> «от скважины до колеса». Следует также отметить, что все виды биотоплива обеспечивают самые большие и наиболее рентабельные сокращения выбросов, когда биомассу для его производства используют, скорее, взамен генерирования электроэнергии на базе ископаемого топлива, чем в качестве горючего для транспорта, которое требует вторичной переработки и распределения.



5. В последнее время ужесточение экологических требований к топливам и транспорту, а также высокие цены на нефть вызывают повышенный интерес к жидким биотопливам.

6. Можно ожидать, что в среднесрочной перспективе будущие технологические достижения повысят конкурентоспособность биотоплив и первого, и второго поколений.

7. В настоящее время многие эксперты в западных странах рассматривают увеличение объёмов производства биотоплив как способ сокращения зависимости от импорта российской нефти и газа, а также сокращения выбросов парниковых газов.

8. В России достаточно много запущенных земель, которые можно использовать для выращивания культур для биоэнергетики, как для собственных нужд, так и экспорта, повышая свой потенциал на мировых рынках биотоплив.

### Список литературы

1. *Беляев С. В., Давыдков Г. А., Перский С. Н.* Современное состояние и перспективы применения биомассы для получения биотоплив // Актуальные вопросы науки и техники. 2015. С. 61—63.
2. *Беляев С. В., Давыдков Г. А., Перский С. Н.* Биотоплива второго поколения: европейский опыт // Учёные записки Петрозаводского государственного университета. 2012. Т. 2, № 8 (129). С. 61—64.
3. *Беляев С. В., Давыдков Г. А., Перский С. Н.* Проблемы и перспективы применения топливного этанола: Деп в ВИНТИ. 2012. № 216-В2012. 12 с.
4. *Беляев С. В., Давыдков Г. А., Перский С. Н.* Газификация биомассы — современное состояние и перспективы развития // Труды лесоинженерного факультета ПетрГУ. 2012. Вып. 9. С. 8—9.
5. *Беляев С. В., Давыдков Г. А.* К вопросу газификации биомассы // Леса России в XXI веке: Материалы Шестой междунар. научно-технич. Интернет-конференции. СПб.: СПбГЛУ, 2011. С. 236—239. URL: <http://www.ftacademy.ru/science/internet-conference/index.php?c=7&a=376>. Текст: электронный.
6. *Беляев С. В., Давыдков Г. А.* Проблемы и перспективы применения водорода в тепловых двигателях // Инженерный вестник Дона. 2019. № 8. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/N8y2019/6123](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/N8y2019/6123). Текст: электронный.
7. *Беляев С. В., Давыдков Г. А.* Проблемы и перспективы получения целлюлозного этанола из биомассы. СПб.: ЛТА, 2010. URL: <http://www.ftacademy.ru/science/internet-conference/index.php?c=1&a=67>. Текст: электронный.
8. *Беляев С. В., Давыдков Г. А.* Эволюция экологических стандартов в Европе // Фундаментальные и прикладные исследования в области естественных и технических наук. 2018. С. 45—48.
9. *Давыдков Г. А., Беляев С. В.* Этанол как моторное топливо // Автомобильная промышленность. 2011. № 4. С. 26—28.
10. О проблемах производства биотоплива в мире // БИКИ. № 8118872. 21.07.2005. С. 12—14.
11. Biofuels for Sustainable Transportation. Available at: <http://www.IEA.org>. Text. Image: electronic.
12. Biofuels for transport. Available at: <http://www.IEA.org/books>. Text. Image: electronic.
13. Biofuels in the European Union a vision for 2030 and beyond. Final draft report of the Biofuels Research Advisory Council. 2006. 31 p.

14. *Broadhead J. S., Bahdon J., Whiteman A.* Past trends and future prospects for the utilization of wood for energy // *Global Forest Products Outlook Study*. 2001. No 5.
15. Large-scale forest-based biofuel production in the Nordic forest sector: Effects on the economics of forestry and forest industries / Eirik Ognér Jåstad, Torjus Folsland Bolkesjø, Erik Trømborg, Per Kristian Rørstad // *Energy Conversion and Management*. 2019. Vol. 184. P. 374—388.
16. Forest land sustainability and second generation biofuels. Informal meeting of Environmental ministers. 2008.
17. Forest service research and development bioenergy and biobased products strategic direction 2009—2014 United States Department of Agriculture Forest Service FS-940. 2010.
18. *Lohse-Busch H.* Current and future trends in alternative fuel vehicles — a research perspective. IL Chamber of Commerce Panel. 2011.
19. NExBTL Renewable Synthetic Diesel (PDF). 2010.04.10.
20. Technology state-of-the-art. Philippe Girard, Abigail Fallot, Fabien Dauriac. Forest Department of CIRAD. 2002. 55 p.

## References

1. Belyaev S. V., Davydkov G. A., Perskij S. N. Current status and prospects of using biomass for biofuels. *Actual issues of science and technology*, 2015, pp. 61—63. (In Russ.)
2. Belyaev S. V., Davydkov G. A., Perskij S. N. Second generation biofuels: European experience. *Proceedings of Petrozavodsk State University*, 2012, vol. 2, no. 8 (129), pp. 61—64. (In Russ.)
3. Belyaev S. V., Davydkov G. A., Perskij S. N. *Problems and prospects of using fuel ethanol*. DEP in VINITI, 2012, no. 216-B 2012. 12 p. (In Russ.)
4. Belyaev S. V., Davydkov G. A., Perskij S. N. Gasification of biomass — current status and development prospects. *Proceedings of the Forest Engineering Faculty of PetrSU*, 2012, vol. 9, pp. 8—9. (In Russ.)
5. Belyaev S. V., Davydkov G. A. On the issue of biomass gasification. *Forests of Russia in the 21th century. Materials of the 6th international scientific and technical Internet conference*. Saint Petersburg, SPBGLU, 2011, pp. 236—239. Available at: <http://www.ftacademy.ru/science/internet-conference/index.php?c=7&a=376>. Text. Image: electronic. (In Russ.)
6. Belyaev S. V., Davydkov G. A. Problems and prospects of hydrogen application in heat engines. *Engineering Bulletin of the Don*, 2019, no. 8. Available at: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/N8y2019/6123](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/N8y2019/6123). Text. Image: electronic. (In Russ.)
7. Belyaev S. V., Davydkov G. A. *Problems and prospects of obtaining cellulosic ethanol from biomass*. Saint Petersburg, LTA, 2010. Available at: <http://www.ftacademy.ru/science/internet-conference/index.php?c=1&a=67>. Text. Image: electronic. (In Russ.)
8. Belyaev S. V., Davydkov G. A. Evolution of ecological standards in Europe. *Fundamental and applied research in natural and technical sciences*, 2018, pp. 45—48. (In Russ.)
9. Davydkov G. A., Belyaev S. V. Ethanol as a motor fuel. *Automotive industry*, 2011, no. 4, pp. 26—28. (In Russ.)
10. On the problems of fuel production in the world. *BIKI*, 2005, July 21, no. 8118872, pp. 12—14. (In Russ.)
11. *Biofuels for Sustainable Transportation*. Available at: <http://www.IEA.org>. Text. Image: electronic.
12. *Biofuels for transport*. Available at: <http://www.IEA.org/books>. Text. Image: electronic.
13. *Biofuels in the European Union a vision for 2030 and beyond. Final draft report of the Biofuels Research Advisory Council*, 2006. 31 p.

14. Broadhead J. S., Bahdon J., Whiteman A. Past trends and future prospects for the utilization of wood for energy. *Global Forest Products Outlook Study*, 2001, no 5.
15. Eirik Ognér Jåstad, Torjus Folsland Bolkesjø, Erik Trømborg, Per Kristian Rørstad. Large-scale forest-based biofuel production in the Nordic forest sector: Effects on the economics of forestry and forest industries. *Energy Conversion and Management*, 2019, vol. 184, pp. 374—388.
16. *Forest land sustainability and second generation biofuels. Informal meeting of Environmental ministers*. 2008.
17. *Forest service research and development bioenergy and biobased products strategic direction 2009—2014 United States Department of Agriculture Forest Service FS-940*. 2010.
18. Lohse-Busch H. *Current and future trends in alternative fuel vehicles — a research perspective. IL Chamber of Commerce Panel*. 2011.
19. *NExBTL Renewable Synthetic Diesel (PDF)*. 2010.04.10.
20. *Technology state-of-the-art. Philippe Girard, Abigail Fallot, Fabien Dauriac. Forest Department of CIRAD*. 2002. 55 p.

© Беляев С. В., Левина М. С., 2022

DOI: 10.15393/j2.art.2022.6543

УДК 630\*3

Статья

## Сравнительный анализ трёх вариантов рекультивации загрязнённых лесных территорий

**Графова Елена Олеговна**

*кандидат технических наук, доцент, Петрозаводский государственный университет (Российская Федерация), [grafova.elena.karelia@gmail.com](mailto:grafova.elena.karelia@gmail.com)*

**Сюнёв Владимир Сергеевич**

*доктор технических наук, профессор, Петрозаводский государственный университет (Российская Федерация), [siounev@petrsu.ru](mailto:siounev@petrsu.ru)*

*Получена: 30 июня 2022 / Принята: 26 сентября 2022 / Опубликовано: 30 сентября 2022*

---

**Аннотация:** Восстановление загрязнённых лесных территорий требует применения экономически эффективных и экологически щадящих методов восстановления, продиктованных: природно-климатическими условиями, степенью повреждения и загрязнения, а также ландшафтно-геохимической характеристикой нарушенных земель. При разработке мероприятий по восстановлению использованных земель, включая нарушенные, необходимо учитывать особенности северных регионов: высокая ранимость, продолжительные периоды самовосстановления, труднодоступность удалённых территорий лесных массивов, короткий период положительных температур, необходимость восстановления санитарно-гигиенического состояния нарушенных территорий с целью предотвращения развития отрицательного воздействия на окружающую среду. Для определения степени загрязнения рассмотрен вариант картирования участка, проведена оценка степени загрязнения. Отбор проб воды в зоне загрязнения свидетельствует об интенсивных процессах разложения, наблюдается превышение ПДК в 20—500 раз, отмечается гибель растительности и древостоя. Глубина проникновения загрязнений достигает 95 см. На некотором расстоянии от источника фрагментарно сохранилась травянистая растительность. По мере удаления от источника загрязнения проективное покрытие осок возрастает и появляются сплошные заросли осоки вздутой (*Carex Rostrata*), среди неё также встречаются осоки струннокоренная (*C. Chordorrhiza*) и магелланская (*C. Paupercula*), сабельник (*Comarum Palustre*), пушица (*Eriophorum Vaginatum*). Рассматриваются три варианта рекультивации загрязнённой лесной территории:

механизированный, частичная выемка и обработка загрязнений в выносных ёмкостях различным номиналом от 9 до 40 м<sup>3</sup> и двухэтапная обработка микроэнзимами. Исследования проводились в двух режимах: естественный процесс биоразложения и дополнительная аэрация. Исследованиями подтверждена эффективность ускорения процесса разложения органических загрязнений до 9 суток с применением оптимальной дозы 15 г препарата на 1 л загрязнений. Результатом обработки является повышение рН среды от кислой к нейтральной. Высота слоя органического поверхностного загрязнения снижается до значения 0,3 мм за 9 дней при аэрации смеси. Второй этап также подтверждается снижением концентрации азота в 1,5—2 раза в обрабатываемой пробе, что указывает на эффективность применения второго препарата. Прозрачность раствора повышается в 2—2,5 раза. По результатам сравнения трёх вариантов рекультивации, использование новой технологии двухэтапной биодеструкции в 9 раз дешевле применения механизированного способа, затраты по времени в 2 раза меньше и составляют до 14 дней.

**Ключевые слова:** рекультивация; биодеструкции; биообработка; биопрепараты; восстановление почв; органические загрязнения; загрязнение лесов; промышленное загрязнение лесов

---

DOI: 10.15393/j2.art.2022.6543

Article

## Comparative analysis of three options for reclamation of polluted forest areas

**Elena Grafova**

*PhD in engineering, associate professor, Petrozavodsk State University (Russian Federation),  
[grafova.elena.karelia@gmail.com](mailto:grafova.elena.karelia@gmail.com)*

**Vladimir Syunev**

*Doctor of engineering, professor, Petrozavodsk State University (Russian Federation),  
[siounev@petsu.ru](mailto:siounev@petsu.ru)*

*Received: 30 Jun 2022 / Accepted: 26 September 2022 / Published: 30 September 2022*

---

**Abstract:** Restoration of contaminated forest areas requires the use of cost-effective and environmentally friendly restoration methods due to natural and climatic conditions, the degree of damage and pollution, and the landscape and geochemical characteristics of disturbed lands. When developing measures for the restoration of used lands, including the disturbed ones, it is necessary to take into account the features of the northern regions: high vulnerability, long periods of self-restorability, inaccessibility of remote forest areas, a short period of positive temperatures, the need to restore the sanitary and hygienic state of disturbed territories to prevent the development of a negative impact on the environment. To determine the degree of pollution, a variant of mapping the site was considered and the degree of pollution was estimated. Water sampling in the contaminated zone testified to intensive processes of decomposition organic matter exceeding the MAC by 20-500 times. The death of vegetation and forest stands was noted. The penetration depth of pollution reached 95 cm. Herbaceous vegetation was fragmentarily preserved at a distance from the source of pollution. As the distance from the source of pollution increased, the projective cover degree with sedge also increased, and continuous thickets of beaked sedge (*Carex Rostrata*) appeared with some plants of string-rooted sedge (*C. Chordorrhiza*) and Magellanic sedge (*C. Ppaupercula*), marsh cinquefoil (*Comarum Palustre*) and cotton grass (*Eriophorum Vaginatum*). The authors considered three options for the reclamation of a polluted forest area: a mechanized method, a method including partial excavation and treatment of polluted matter in containers of various volume (from 9 to 40 cubic meters), and a two-stage treatment with microenzymes. The studies were performed in two modes: the natural process of biodegradation and additional aeration. Studies have confirmed the effectiveness of

accelerating the process of decomposition of organic contaminants up to 9 days using the optimal dose of 15 g of the agent per 1 liter of contaminants. The treatment increased the pH of the medium from acidic to neutral one. The height of organic surface contamination layer was reduced to 0.3 mm in 9 days when the mixture was aerated. The second stage resulted in a decrease in the nitrogen concentration by 1.5–2 times. The effectiveness of the second agent was also confirmed by a decrease in the nitrogen concentration in the treated sample. The transparency of the solution increased by 2 - 2.5 times. According to the results of comparing three options for reclamation, the use of the new technology of two-stage biodegradation is 9 times cheaper than the use of a mechanized method, the time expenditure is 2 times less and amounts to 14 days.

**Keywords:** reclamation; biodegradation; biotreatment; biological products; soil restoration; organic pollution; forest pollution; industrial forest pollution

---

## 1. Введение

Довольно продолжительное время в процессе проверок контролирующими организациями хозяйственной деятельности предприятий лесной промышленности фиксируются случаи недобросовестного лесопользования, связанные с загрязнением арендуемых лесных участков. В результате подобных нарушений достаточно большие территории лесов становятся «горячими экологическими точками». Источниками возникновения таких объектов могут служить результаты инфраструктурного сервиса, сопутствующего производственным процессам лесозаготовок и лесобработки, организованные на верхних складах и в лесных посёлках. Одним из условий реализации производственной деятельности является обеспечение рабочих необходимыми условиями для проживания, питания, инженерными коммуникациями [1]. Лесные посёлки в прошлом строились на несколько десятилетий. Следует отметить, что отсутствие законодательных требований к содержанию лесных посёлков привело к образованию многочисленных несанкционированных свалок и загрязнённых окрестных территорий, не пригодных для повторного использования. В настоящее время на смену стационарным лесным посёлкам приходят мобильные формы проживания и работы с использованием передвижных или некапитальных разборных жилищных комплексов и соответствующей инфраструктуры [3]. После завершения этапа лесозаготовительных работ на арендованном участке территория должна быть рекультивирована в соответствии с требованиями действующего законодательства [2].

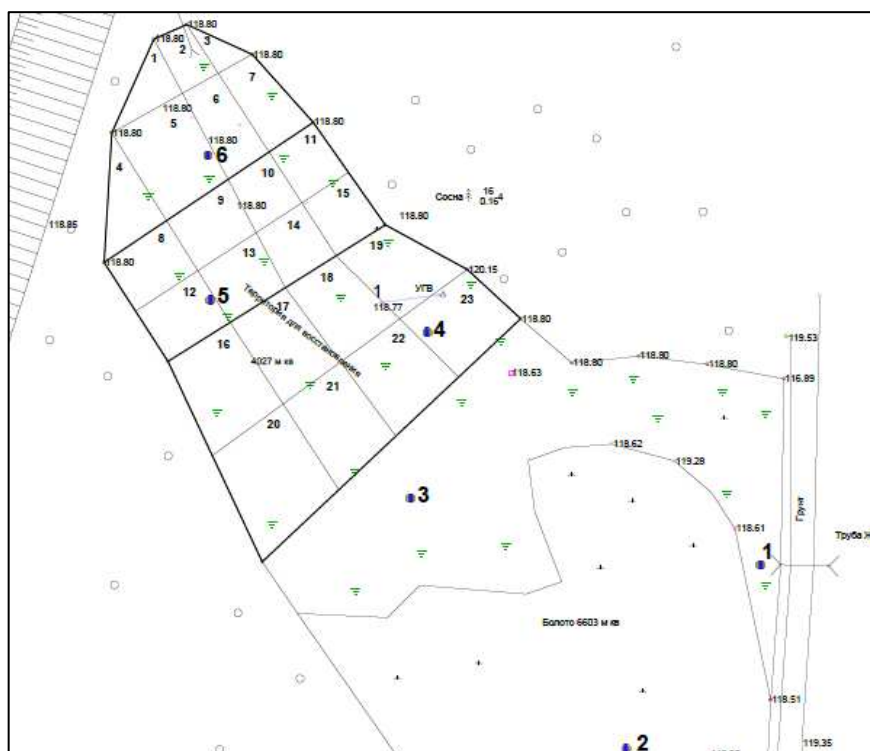
Рекультивация — это комплекс работ, направленных на восстановление хозяйственной ценности нарушенных и загрязнённых земель, а также улучшение условий окружающей природной среды. Сброс органических загрязнений и складирование пищевых отходов при условии продолжительного накопления приводят к возникновению свалок пищевых отходов и продуктов их разложения, которые со временем расширяют зону негативного воздействия на природные территории. Негативное воздействие на почвы и почвенный покров, флору и фауну, поверхностные и подземные воды описано во множестве работ [5], [6], [8—13]. Восстановление проводится с учётом местных природно-климатических условий, степени повреждения и загрязнения, ландшафтно-геохимической характеристики нарушенных земель. При разработке мероприятий по восстановлению использованных земель, включая нарушенные, необходимо учитывать особенности северных регионов: высокая ранимость, продолжительные периоды самовосстановления, труднодоступность удалённых территорий лесных массивов, короткий период положительных температур, необходимость восстановления санитарно-гигиенического состояния нарушенных территорий с целью предотвращения развития отрицательного воздействия на окружающую среду. Таким образом, технология рекультивации должна обеспечивать экономический эффект и включать экологически щадящие методы восстановления, реализация которых не усугубит текущие нарушения.



## 2. Материалы и методы

Пилотным объектом для исследований послужил реальный загрязнённый участок, обнаруженный в ходе инспекции территорий ГКУ РК «Сегежское центральное лесничество». Площадь нарушенной территории составляет 6603 м<sup>2</sup>. Климат в исследуемой местности влажный, умеренный. Территория относится к зоне избыточного увлажнения, где сумма осадков превышает количество испарений влаги. Среднее многолетнее количество осадков за год составляет 590 мм. В течение года осадки выпадают неравномерно, бóльшая их часть приходится на тёплый период года. Устойчивый снежный покров устанавливается 13 декабря и длится до 23 апреля. Средняя продолжительность зимнего периода составляет 207 дней. Наиболее низкие температуры отмечаются в январе и достигают  $-40,7^{\circ}\text{C}$ , наиболее высокие — в июле — августе, до  $+32,4^{\circ}\text{C}$ . Период с устойчивыми положительными температурами составляет 3 месяца.

При обследовании участка и определении степени загрязнения проведено картирование, описание почвенного покрова, определён тип почв, глубина загрязнений, в шести точках проведён отбор проб загрязнённой жидкости (рисунок 1).



**Рисунок 1.** Картирование учёта загрязнений нарушенного участка с указанием точек отбора проб

**Figure 1.** Pollution accounting map of the disturbed area with indication of sampling points

На отобранных пробах загрязнений проведено исследование по технологии EX SITU. В лабораторных условиях проведено исследование по биодеструкции загрязнений с привнесением в обрабатываемую среду биодобавок — специализированных микроэнзимов. Биоремедиация загрязнённых почв предусматривает использование биопрепаратов на основе иммобилизованных на питательном субстрате, специально подобранных штаммов микроорганизмов, что способствует повышению скорости и степени разложения органических загрязнений, повышению активности аборигенной микрофлоры. Биопрепараты состоят из микроорганизмов (бактерий) и вспомогательных веществ (ферменты, питательные вещества, отдушки, ПАВ и т. д.). Как правило, в одном биопреparate находится от 4 до 24 различных видов (штаммов) бактерий. Селективность в питании каждого штамма позволяет устранять только определённый вид загрязнений. Комбинирование штаммов позволяет получать биопрепараты с заданными свойствами [7]. Так, на сегодняшний день известны бактерии, питающиеся стиралами, диоксидами, гербицидами, силикатами, жирами, нефтепродуктами и т. д. Действия биодеструктора: комплексная очистка загрязнений, снижение объёма и массы загрязнений, уменьшение и локализация неприятных запахов, естественное отмирание избыточной биомассы после разложения. Конечным продуктом переработки органических загрязнений является лёгкий минерализованный осадок, состоящий из отдельных мельчайших частиц, не образующий твёрдой корки при любом сроке хранения, не застывающий при отрицательных температурах, не подвергающийся действию гнилостной микрофлоры, не агрессивный для окружающей среды [2].

Для очистки органических загрязнений необходимы активные штаммы липолитических микроорганизмов. Способностью к продукции липаз обладают микроорганизмы различных таксономических групп: бактерии, актиномицеты, дрожжи, микроскопические грибы. Липолитическая активность характерна для бактерий многих родов. Наиболее изучены представители родов *Staphylococcus*, *Pseudomonas*, *Bacillus*, *Streptomyces*, *Aeromonas*, *Xenorhabdus*, *Moraxella*, *Propionibacterium*, *Chromobacterium*, *Atherobacter*, *Rhodococcus*, *Pseudomonas Serratia* и др. Наиболее активные бактерии, обладающие липолитической активностью, которые были идентифицированы путём сиквенс-анализа фрагментов гена 16S РНК как *Serratia marcescens* (штаммы ИБ-2-1, ИБ-2-2), *Serratia species* (штаммы ИБ-1, ИБ-3-1, ИБ-3-3). Поэтому бактерии рода *Serratia* наиболее перспективны для создания биопрепаратов для локальной очистки жиросодержащих бытовых стоков и отходов [16].

Для выбора оптимальных биопрепаратов произведён обзор наиболее эффективных, доступных на рынке (таблица 1). После помещения усреднённой пробы в стеклянную колбу выявлено, что загрязнение имеет двухфазный состав: твёрдая перегнившая органика, включающая жировые компоненты, которая подверглась гниению, и жидкая фаза, включающая растворённую органику. Таким образом, исследования проводились в два этапа: с использованием биоэнзима липолитика и последующим добавлением в обработанный сток биодеструкторов для доочистки осветлённой воды. Для сравнения эффективности исследования проводились без применения аэрации (обычный способ

обработки) и с применением принудительной аэрации, поскольку, по заявлению производителей биоэнзимов, насыщение кислородом воздуха ускоряет процесс деструкции. Исследования проведены путём обработки пяти пар параллельных проб по 1 л загрязнений с добавлением следующих концентраций: 3 г/л, 5 г/л, 7 г/л, 10 г/л, 15 г/л.

**Таблица 1.** Сравнительные характеристики биоэнзимов

**Table 1.** Comparative characteristics of bioenzymes

Название биоэнзимов	Описание	Характеристики	Преимущества
Vasti-Bio 9500	Включает микробные штаммы Vasti-Bio 9500 некультивированные и непатогенные. Активные продуценты ферментов для разрушения: амилазы (крахмала), протеазы (белков), целлюлазы (целлюлозы), липазы (масел и жиров) и т. д.	Порошок белого цвета, pH 6—9. Диапазон температур 25—55 °С. Разложение широкого спектра субстратов	Биодеструкция благодаря действию бактерий, ферментов и биогенов. Удаление жиров и других органических отложений, устраняет запахи. Снижает концентрацию органических загрязнений
BioRemove 5100	Разложение широкого спектра загрязнений. Используется для ускорения деструкции пищевых промышленных стоков, для снижения значений ХПК и БПК	Вносится ежедневно в биореакторы, pH 6—9. Удвоение роста на каждые 10 °С, до 40 °С	Повышение стабильности работы канализационных и очистных систем, снижение интенсивности запахов. Целевое удаление специфической органики
Bichem GTX	Порошкообразная смесь на основе нескольких штаммов микроорганизмов, эффективная биодеструкция животного, растительного или минерального жира и масел	Насыпная Плотность 0,7—0,8 г/мл, влажность 15 %, pH 6,0—8,5. Диапазон температур +15—45 °С	Синергетическое действие энзимов, бактерий и вспомогательных веществ. Эффективная деструкция жиров (с эмульгированными жирами и моющими средствами, маслами и волокнами)
GREASE GUARD EU. Гриз Гард	Смесь штаммов Bacillus, разлагает наиболее трудно удаляемую часть молекул жира — жирные кислоты с длинной углеводородной цепочкой.	Регулярная обработка суточными дозами. Посев — 1,5 л/м <sup>3</sup>	Деструкция накопленных жиров. Разложение трудно удаляемой части молекул жира — жирные кислоты с длинной углеводородной

Название биоэнзимов	Описание	Характеристики	Преимущества
	Неагрессивен и экологически безопасен	загрязнений, концентрация $1,5 \times 10^8$ КОЕ/мл	цепочкой
Микрозим (tm) «ГРИЗ ТРИТ»	Биологический деструктор пищевых жиров и растительных масел. Содержит консорцию (12) штаммов нетоксичных, натуральных, факультативных анаэробных микроорганизмов с высокой секретивной и ферментативной активностью, они обеспечивают гидролиз органорастворённых жиров с разложением простых продуктов путём адсорбции до углекислоты	Диапазон температур +5—55 °С. Возобновляют активность свыше +5 °С, рН 4—10. Разложение жиров в аэробных и анаэробных условиях	Деструкция твёрдого жира. Деструкция органических загрязнений в стоках по показателям БПК <sub>5</sub> , БПК <sub>полн</sub> , ХПК, N, P, ТКБ, ОКБ, взвешенные вещества, жиры с эффективностью 80—97 % в сроки от 2 (с аэрацией) до 7 суток (без аэрации). Снижение неприятных запахов за счёт микробиологического усвоения продуктов биодеструкции
Микрозим (tm) «ПОНД ТРИТ»	Смесь микроорганизмов из почвенных российских эндемиков и гранул ферментов. Сухой порошок с запахом почвы. Рекомендуются для закрытых водоёмов, испытывающих интенсивное загрязнение органикой, мутность воды, цветение воды, заражение патогенами	Применение при температуре от +5 °С. Условия применения препарата Микрозим Понд Трит. Переносит зимние температуры в спящем состоянии. Цикл очистки водоёма 3—4 месяца	Очистка воды и донных отложений от органических веществ и питательных элементов. Деструкция органической биомассы донного ила. Восстановление кислородного режима и способности самоочищения водоёма. Снижение количества патогенных микроорганизмов, сине-зелёных водорослей, ограничение размножения ряски в закрытых водоёмах

*Первый этап исследований* — обработка органических загрязнений липолитиками проводилась в течение 9 дней. Ежедневно производилось измерение слоя разложившегося поверхностного загрязнения и изменение кислотности. Для определения степени кислотности (рН) использовался преобразователь потенциометрический И-510. Для измерения высоты слоя разложившегося поверхностного загрязнения использовалась линейка.

*Второй этап исследований* — применение биодеструкторов заключается в использовании 6—12 видов естественных микроорганизмов, усваивающих свободную органику и биогенные элементы из воды, осветлённой после обработки на первом этапе. В процессе жизнедеятельности микроорганизмов происходит разрушение и усваивание органических загрязнений с образованием воды, углекислого газа и минерального остатка. Обработка также проводилась в обычных условиях перемешиванием препарата и с применением компрессорной установки для аэрирования смеси. В соответствии со свойствами применяемых биоэнзимов биодеструкторов, их применение способствует снижению концентраций загрязнений по показателям БПК, ХПК, азоту, фосфатам, растворённому кислороду. Контроль биодеструкции определялся по концентрации азотосодержащих веществ фотометрическим методом. Также ежедневно определялась прозрачность раствора по методике «Определение прозрачности по шрифту».

После определения параметров эффективности двух стадий обработки проведено технико-экономическое сравнение вариантов рекультивации нарушенной территории. Экономические затраты рассчитаны исходя из укрупнённых сметных показателей в ценах на 2021 г.

### 3. Результаты

Исследуемый участок имеет равнинный рельеф и небольшой уклон. Участок заболочен ввиду низинного расположения. Вследствие постоянного увлажнения атмосферными осадками, наблюдается распространение ореола загрязнения в сторону уклона местности. Обследование нарушенной территории позволило определить, что продолжительное внесение загрязнений привело к полному уничтожению и трансформации верховой растительности участка. Средняя глубина слоя верхового торфа составила 40—50 см, максимальная — до 100 см (таблица 2). На большей части участка наблюдается слой органического загрязнения жироподобного типа с резким запахом. Слой отходов покрывает часть территории болота с максимальной высотой слоя (0,2 м) у центра загрязнения, постепенно уменьшающегося до нуля (см. таблицу 2).

Согласно данным таблицы 2, наибольший слой загрязнённых отходов наблюдается на части участка, расположенного в непосредственной близости к источнику загрязнения. Глубина обнаружения следов органических остатков достигает 0,95 м. На части участка полностью погиб древесный ствол, а травяно-кустарничковый и моховой ярусы покрыты слоем отходов. Сохранились частично кочки осок водной и сизой (*Carex Aquatilis*, *C. Cinerea*). Сплошной слой отходов занимает около 1/3 участка у источника загрязнения. При удалении от источника фрагментарно сохранилась травянистая растительность. По мере удаления от источника загрязнения проективное покрытие осок возрастает и появляются сплошные заросли осоки вздутой (*Carex Rostrata*), также встречаются осоки струннокоренная (*C. Chordorrhiza*) и магелланская (*C. Paupercula*), сабельник (*Comarum Palustre*), пушица (*Eriophorum vaginatum*). Повреждённый живой подрост берёзы (*Betula pendula*) наблюдается

**Таблица 2.** Результаты промеров глубины загрязнённой территории

**Table 2.** The results of measurements of the contaminated area depth

Точка замера	Степень загрязнения	Глубина проникновения органических загрязнений, см	Слой органических поверхностных отложений, см	Уровень грунтовых вод, см
1	Слабая	50	—	Канавы с водой
2	Сильная	95	—	-15
3	Вся растительность погибла	80	—	-10
4	Сильная	70	15	-10
5	Сильная	50	20	-1
6	Сильная	70	20	-7

начиная со средней, не затронутой отходами части участка, а в его нижней части жизнеспособность берёзы сохранена. При этом мох уничтожен на всей площади участка, в нижней части отмечаются лишь небольшие единичные пятна сфагновых и гипновых мхов (*Sphagnum* spp., *Warnstorfia* sp.). Сформированный слой отходов представляет собой не пригодный для роста растений субстрат, а погребённый под ним торф не может служить субстратом ввиду того, что он изолирован от доступа воздуха и питательных веществ. В нижней части участка, не покрытой слоем отходов, но испытывающей их воздействие через грунтовые воды, осики продолжают успешно расти. В удовлетворительном состоянии находится и поросль берёзы. Это свидетельствует о том, что в настоящий момент токсическое воздействие загрязнений не способствует гибели всей растительности. Основную проблему для восстановления растительного покрова представляет не пригодный для роста изолирующий слой загрязнений. При наличии подходящего субстрата (торфа) растительность будет восстанавливаться. Фотографии участка исследования представлены ниже (фото 1 и 2).

Проведён отбор и исследования проб воды, находящейся ниже уровня загрязнения верхнего естественного слоя, на глубине 0,2—0,3 м, результаты которых представлены в таблице 3. Анализ результатов проб свидетельствует о высокой концентрации органических загрязнений. Во всех пробах (кроме пробы 1) показатели биологического загрязнения, выражаемого в БПК<sub>5</sub>, превышают установленную норму более чем в 500 раз. Жиры должны полностью отсутствовать в природной среде. Невысокое содержание нитритов и нитратов свидетельствует об отсутствии процесса биологического разложения загрязнений или о его медленном течении. Таким образом необходимо предпринять меры по снижению концентрации выявленных загрязнений. Низкое значение АПАВ свидетельствует об отсутствии загрязнения моющими средствами.



**Фото 1.** Нарушенный участок у источника загрязнения с уничтоженной растительностью

**Photo 1.** Disturbed area near the source of pollution with destroyed vegetation



**Фото 2.** Пограничная зона воздействия загрязнения

**Photo 2.** Border zone of pollution impact

В качестве деструкторов выбраны два препарата, подходящие под условия и цели исследований: Микрозим (tm) «ГРИЗ ТРИТ» и Микрозим (tm) «ПОНД ТРИТ». Механизм действия препарата «ГРИЗ ТРИТ» заключается в синтезе живыми микроорганизмами биосурфактантов и липолитических ферментов, под воздействием которых происходит биологическая деструкция растворённых жиров и твёрдой жировой массы, и последующем полном усвоении всех продуктов биодеструкции живыми микроорганизмами в качестве

**Таблица 3.** Показатели качества проб воды в 6 точках с удалением от источника загрязнения

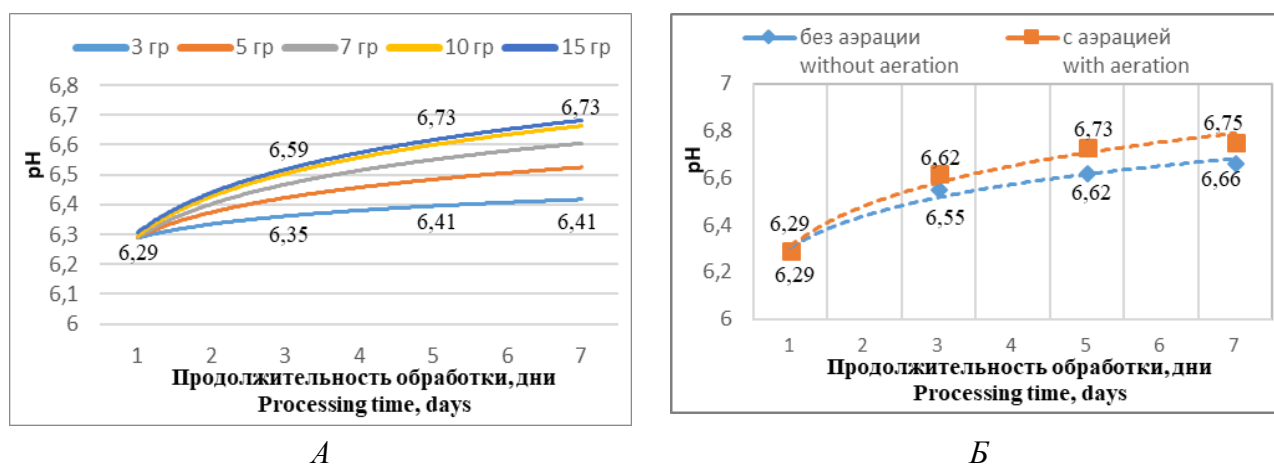
**Table 3.** Quality indicators of water samples at 6 points with a distance from the source of pollution

№ п/п	Точка замера	6	5	4	3	2	1	ПДК*
1	pH	6,52	6,26	6,37	6,21	5,49	6,29	—
2	БПК <sub>5</sub> , мг O <sub>2</sub> /л	> 1000	> 1000	> 1000	> 1000	> 1000	159	2,1
3	ХПК, мг O <sub>2</sub> /л	> 800	> 800	> 800	> 800	> 800	470	—
4	Аммиак, мг /л	> 100	77	> 100	71	> 100	77	0,5
5	Нитрит-ион, мг /л	0,025	0,031	< 0,02	0,054	< 0,02	< 0,02	0,08
6	Нитрат-ион, мг /л	0,45	0,46	0,45	0,81	0,33	0,35	40
7	Фосфат-ион, мг /л	78	10,7	22,5	18,6	50	19,8	0,2
8	АПАВ, мг /л	0,18	0,054	0,08	0,053	0,19	0,18	0,1
9	Жиры, мг /л	> 50	> 50	> 50	> 50	> 50	29	0

основного источника энергии с образованием воды, диоксида углерода (углекислоты), нитритов, сульфатов и лёгкого осадка, занимающего 10—20 % исходного объёма. Осадок представляет собой экологически безвредные, нетоксичные продукты микробного метаболизма, соответствующие 4—5-му классу опасности, может использоваться в качестве удобрения. Происходит биологическая деструкция (гидролиз) животных жиров и растительных масел на H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub>, нитриты, сульфаты и лёгкий осадок. Осадок представляет собой экологически безвредные нетоксичные продукты микробного метаболизма, соответствующие 4—5-му классу опасности, может использоваться как удобрение. Сокращение объёма отделяемой от воды твёрдой жировой массы составляет от 60 % (в среднем) до 90 % (максимум). Сокращение концентрации органорастворённых жиров в стоке достигает 80—99 %, в зависимости от времени контакта. Скорость и полнота деструкции жиров зависят от благоприятных условий — температуры и времени экспозиции [15]. Результаты показателя кислотности и высоты слоя твёрдых органических загрязнений после первого этапа исследований представлены на рисунках 2 и 3.

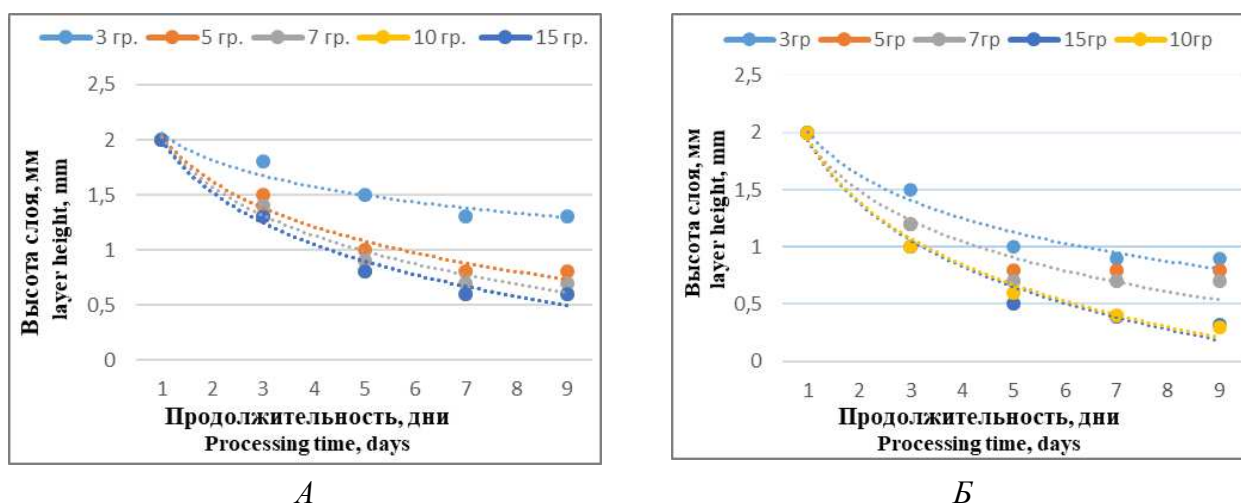
Минимальная норма расхода биопрепарата составляет 0,25 г на 1 л заполненного отходами объёма ёмкости. Увеличение дозы препарата многократно ускоряет процесс биодеструкции. Таким образом, наибольшая эффективность наблюдается при внесении 15 г биопрепарата на 1 л загрязнений. При этом наиболее эффективно происходит повышение кислотности к нейтральной среде при аэрировании смеси. Так, при аэрации значение pH достигается через 2 дня обработки, в то время как без аэрации этот уровень pH восстанавливается только через 5 дней, что свидетельствует об эффективности применения аэрации.





**Рисунок 2.** Динамика изменения pH при биодеструкции загрязнений на первом этапе обработки биоэнзимами: *A* — зависимость pH от концентрации препарата; *B* — сравнительные характеристики процессов с аэрацией смеси и без

**Figure 2.** Dynamics of pH changes during the biodegradation of contaminants at the first stage of treatment with bioenzymes: *A* — pH dependence on the concentration of the agent; *B* — comparative characteristics of processes with and without mixture aeration

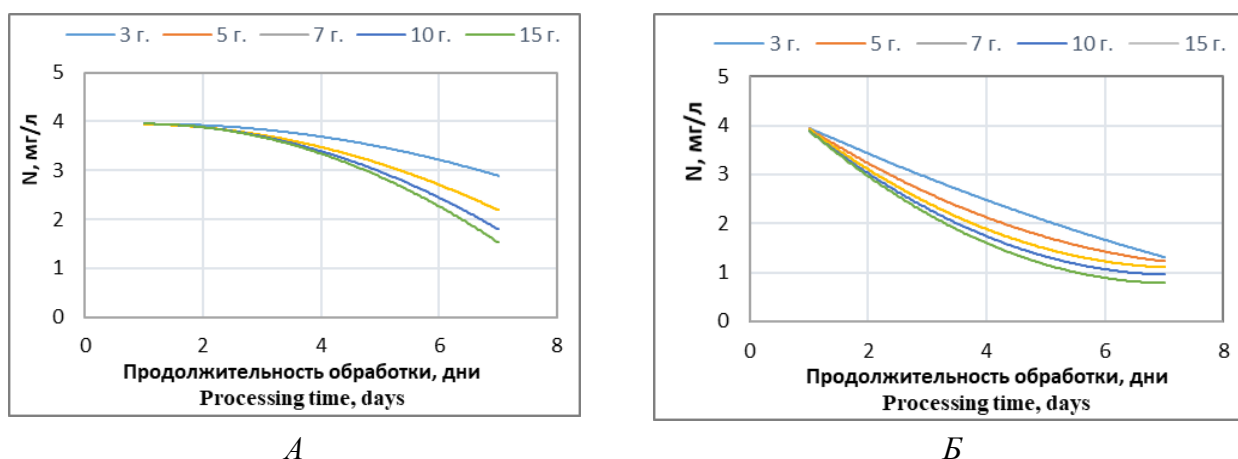


**Рисунок 3.** Динамика показателей биодеструкции слоя жировых загрязнений в процессе обработки биоэнзимами: *A* — без применения аэрации; *B* — с применением аэрации

**Figure 3.** Dynamics of indicators of biodegradation of a fatty contaminants layer in the process of treatment with bioenzymes: *A* — without the use of aeration; *B* — with the use of aeration

Через 9 дней после стабилизации результатов в пробы, оставшиеся после первого этапа исследований, добавлены такие же выборки второго биопрепарата «ПОНД ТРИТ», направленного на очистку загрязнённых водоёмов. Эффективность второго этапа контролировалась по наличию азотсодержащих веществ и прозрачности через 9 дней. Результаты обработки представлены на рисунке 4.

Полученные результаты также свидетельствуют об эффективности применения наибольшего количества внесения биопрепарата. Также применение аэрации способствует эффективной деструкции азотсодержащих веществ. Снижение азота с 4 до 3 мг/л при использовании процесса аэрации происходит в 2 раза быстрее. Такое эффективное ускорение процесса деструкции необходимо использовать для разработки технологии рекультивации непосредственно на участке. В основу данной технологии принимается принцип работы искусственных сооружений биологической очистки — аэротенк. Находясь в водной среде, микроорганизмы будут эффективнее функционировать и перемещаться, использовать свободную воду. Отличием от аэротенка является тот факт, что в него вода направляется принудительно, а в рассматриваемом случае предлагается использовать наличие грунтовых вод и поверхностных осадков, покрывающих загрязнения практически по всей территории. Выявленная эффективность аэрации свидетельствует о необходимости устройства аэрационной системы. Для снабжения кислородом воздуха необходимо обеспечить полное покрытие загрязнённого участка системой аэраторов. В качестве аэраторов принято использование мембранных аэраторов для выращивания аквакультуры. Аэраторы размещаются в слое загрязнения на глубине 0,5 м с грузами против всплытия (см. рисунок 5).



**Рисунок 4.** Динамика показателей биодеструкции слоя жировых загрязнений в процессе обработки почвенными биоэнзимами: *A* — без применения аэрации; *B* — с применением аэрации

**Figure 4.** Dynamics of indicators of biodegradation of a fatty contaminants layer in the process of treatment with soil bioenzymes: *A* — without the use of aeration; *B* — with the use of aeration

Для выбора оптимальной технологии рекультивации необходимо провести технико-экономическую оценку каждого. Техническое восстановление по каждому из вариантов предусматривает выполнение следующих видов работ:

*Вариант 1. Механизованная выемка.* Включает следующие мероприятия: организация ленточной вырубki деревьев для проезда техники и с территории — 0,02 га; выемка загрязнённого слоя торфа до минерального слоя на глубину 1 м — 2392 м<sup>3</sup>, что соответствует: разработке котлована экскаватором глубиной до 1 м — 2392 м<sup>2</sup> или выемке грунта экскаватором глубиной до 1 м — 2392 м<sup>3</sup>; загрузка загрязнённого грунта в самосвал — 2392 м<sup>3</sup>; транспортировка отходов на объект размещения отходов на расстояние 100 км; передача отходов на захоронение — 2392 м<sup>3</sup>; завоз плодородного грунта — 2392 м<sup>3</sup>; выравнивание и уплотнение площадки, подготовка под посев для восстановления растительности — 2392 м<sup>2</sup>.

*Вариант 2. Выемка и обработка загрязнений в промежуточных ёмкостях.* Включает следующие мероприятия: сбор верхнего органического слоя ручным способом — 2392 м<sup>2</sup> или 418,2 м<sup>3</sup>; загрузка загрязнений в промежуточные ёмкости для транспортировки на площадку обработки; транспортирование на бортовом автомобиле отхода до площадки обработки на расстояние до 100 м; обработка загрязнений 104,55 кг биологическими препаратами типа липолитики в течение 7 дней. Необходимое количество реагента и время обработки представлено в таблице 4.

**Таблица 4.** Параметры и время обработки отходов при периоде микробиологической обработки 7 суток

**Table 4.** Parameters and time of waste treatment during a microbiological treatment period of 7 days

Наименование оборудования	Технологические параметры при использовании ёмкостей разного объёма					
	9	10	20	25	30	40
Объём ёмкости, м <sup>3</sup>	9	10	20	25	30	40
Необходимое количество препарата на цикл, кг	2,25	2,5	5	6,25	7,5	10
Объём раствора препарата, л	4,5	5	10	12,5	15	20
Время обработки всего объёма, дни	325	293	146	117	98	73
Время обработки всего объёма, месяцы	10,8	9,8	4,9	3,9	3,3	2,4

В данном случае под циклом понимается количество технологических процессов при использовании ёмкости рассматриваемого объёма. Следует отметить, что при использовании



**Таблица 5.** Технологические операции по выполняемым работам

**Table 5.** Technological operations for the work performed

№ п/п	Наименование	Единица измерения	Вариант 1. Механизированный сбор загрязнений	Вариант 2. Биодеструкция загрязнений
1	Вырубка деревьев	га	0,02	
3	Загрузка загрязнённого грунта в самосвал, 2392 м <sup>3</sup>	чел./ч	2000	
4	Транспортировка отходов на объект размещения отходов на расстояние 100 км	количество рейсов	200	
5	Передача отходов на захоронение (600 р/м <sup>3</sup> )	м <sup>3</sup>	600	
6	Загрузка грунта для восстановления выемки в самосвал, 2392 м <sup>3</sup>	чел./ч	2000	
7	Транспортировка грунта на место восстановления выемки на расстояние менее 10 км	количество рейсов	200	
8	Выравнивание площадки экскаватором	га	0,66	
9	Уплотнение грунта площадки	га	0,66	
10	Предпосевная культивация с одновременным боронованием общей площадью	га	0,66	
11	Засев многолетних трав общей площадью	га	0,66	
12	Полив участка озеленения площадью	га	0,66	
14	Рыхление торфяной залежи лопатами вручную глубиной до 1 м	чел./ч		1600
16	Обработка (1-я стадия) биологическими препаратами 1-го типа	чел./ч		8

№ п/п	Наименование	Единица измерения	Вариант 1. Механизированный сбор загрязнений	Вариант 2. Биодеструкция загрязнений
17	Обработка (2-я стадия) загрязнений биологическими препаратами 2-го типа	чел./ч		8
18	Контроль работы системы, контроль технологических показателей, анализ снижения объёма загрязнений	чел./ч		160
19	Монтаж-демонтаж системы аэрации	чел./ч		10
20	Экономические затраты, руб.		51 393 540	5 710 393

Необходимо отметить, что вариант 3 (метод биодеструкции непосредственно на загрязнённом участке) требует дополнительных затрат, которые включают:

1. Использование аэрационной распределительной системы аэрации стоимостью в размере 850 тыс. руб.

2. Использование препаратов биоэнзимов двух типов:

– препарат 1-го типа, 104 тыс. руб.;

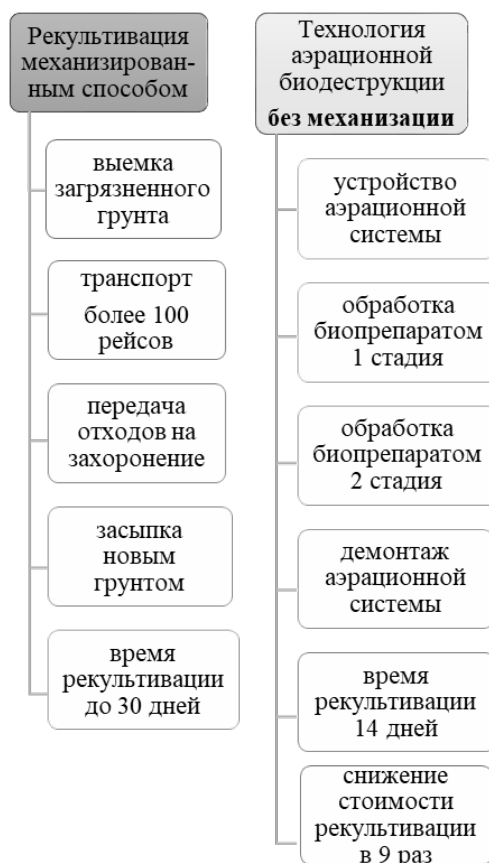
– препарат 2-го типа, 30 тыс. руб.

Схема сравнения характеристик механизированной и разработанной технологий приводится на рисунке 6.

Сравнение прямых и эксплуатационных производственных затрат разрабатываемых вариантов проводится при помощи определения экономического эффекта, который составит:

$$CF = C_1 - C_2,$$

где  $C_1$  — затраты по варианту 1;  $C_2$  — затраты по варианту 2.



**Рисунок 6.** Схема сравнения этапов типовой и новой технологий рекультивации труднодоступных лесных территорий

**Figure 6.** Scheme for comparing the stages of standard and new technologies for reclamation of remote forest areas

#### 4. Обсуждение и заключение

Анализ лабораторных данных свидетельствует о том, что часть загрязнений проникла в толщу болота на глубину около 1 м. Наибольшие показатели загрязнения обнаружены в точках 6, 5, 4, 3, 2. В точке 1 — на значительном удалении от источника загрязнения концентрация загрязнений наименьшая. Наблюдается постепенное снижение концентраций загрязнений, что свидетельствует о постепенной деструкции загрязняющих веществ. Тем не менее количество органических и неорганических загрязнений значительно превышает показатели норм для природной среды. Очевидно, что препятствием для естественного разложения и окисления органических веществ является наличие на поверхности слоя органического жироподобного загрязнения, которое препятствует окислению органических веществ. В случае интенсивного загрязнения участка, на котором погибла практически вся растительность, слой загрязнения препятствует естественному лесовосстановлению, поэтому необходимо предусмотреть следующие этапы:

- определить границы загрязнения визуальным способом;
- в зависимости от масштабов загрязнений предусмотреть картирование участка с разбивкой на зоны для оценки степени воздействия и расчёта объёмов загрязнений;
- определить глубину проникновения загрязнений;
- определить интенсивность запаха загрязнений и его оттенки: хозяйственно-бытовой, пищевая органика и т. д.;
- отбор проб почвы и воды повысит эффективность расчёта технологии рекультивации территории и возможность прогнозирования лесовосстановления.

По результатам сравнения качественных характеристик для первого этапа обработки принято применение препарата Микрозим (tm) «ГРИЗ ТРИТ», а для второго этапа — Микрозим (tm) «ПОНД ТРИТ».

Исследованиями подтверждена эффективность ускорения процесса разложения органических загрязнений до 7—9 суток с применением оптимальной дозы 15 г препарата на 1 л загрязнений на первом этапе применения биоэнзима «ГРИЗ ТРИТ». При этом наблюдается повышение pH среды от кислой к нейтральной. Высота слоя органического поверхностного загрязнения эффективнее снижается до значения 0,3 мм за 9 дней при аэрировании смеси, что в 1,5—2 раза эффективнее, чем за то же время без аэрации.

Эффективность применения второго препарата Микрозим (tm) «ПОНД ТРИТ» также подтверждается снижением концентрации азота в обрабатываемой пробе. Прозрачность раствора повышается в 2—2,5 раза. При этом дополнительная аэрация приводит к ускорению процесса деструкции, сокращая время воздействия в 1,5—2 раза.

При сравнении трёх вариантов рекультивации загрязнённого участка лесной территории получен экономический эффект применения новой технологии двухэтапной биодеструкции энзимами, который составляет CF = 5 710 393 руб., что в 9 раз дешевле применения рекультивации механизированным способом с использованием тяжёлой техники.

## Список литературы

1. Использование и охрана водных ресурсов в лесном комплексе. Расчёт водопроводной сети рабочего посёлка: Учеб. пособие по выполнению курсовой работы студ. спец. 250401 «Лесоинженерное дело» очной и заочной форм обучения / О. В. Болотов [и др.]; Федеральное агентство по образованию, ГОУ ВПО «Сибирский государственный технологический университет». Красноярск, 2010. 84 с.
2. Лесной кодекс Российской Федерации (с изм. на 02 июля 2021 г.) (редакция, действующая с 01 сентября 2021 г.) 200-ФЗ / Государственная Дума Федерального Собрания Российской Федерации. М., 2006. 102 с.
3. Ранникко П., Варис Э., Пийптонен М. Койвусельга. Социальная трансформация лесозаготовительного посёлка в российской Карелии / пер. с фин. яз. Ю. М. Килина // *Studia Humanitatis Borealis*. 2016. № 2 (7). С. 32—47.
4. Александров В. А. Механизация лесосечных работ в России. СПб.: СПбЛТА, 2000. 286 с.



5. Сюнёв В. С., Графова Е. О. Новые технические решения по снижению негативного воздействия лесопромышленных производств на лесную среду // *Resources and Technology*. 2022. Т. 19, № 2. С. 48–71.
6. Питина И. А. К разработке рекомендаций по восстановлению загрязнённых неочищенными сточными водами земель // *Экологические проблемы развития агроландшафтов и способы повышения их продуктивности: Сб. ст. по материалам Междунар. науч. экол. конф., Краснодар, 27—29 марта 2018 г. / ФГБОУ ВО «Кубанский государственный аграрный университет имени И. Т. Трубилина»*. Краснодар, 2018. С. 35—38.
7. Ворончихина Е. А. Рекультивация нарушенных ландшафтов: теория, технологии, региональные аспекты: монография. Пермь, 2010. 165 с.
8. Арцимович П. М., Казарян В. А. Качественный состав поверхностного стока с селитебных территорий крупных городов // *Очистка и использование поверхностного стока с территорий городов и промплощадок: Материалы семинара*. М.: Общество «Знание», 1981.
9. Гаврилова О. И., Соколов А. И. Лесная рекультивация нарушенных земель на Севере: Учеб. пособие / Петрозав. гос. ун-т, Ин-т леса Карел. Науч. центра РАН. Петрозаводск, 2001. 20 с.
10. Загрязнение орошаемых почв и их биологическая очистка / Х. Н. Каримов, З. З. Узаков, Ж. П. Хушмуродов [и др.] // *Научное обозрение. Биологические науки*. 2021. № 2. С. 34—40.
11. Оценка уровня негативного воздействия на компоненты природной среды несанкционированной свалки у п. Самофаловка Волгоградской области / О. А. Мишустин, С. Б. Хантимирова, В. Ф. Желтобрюхов [и др.] // *Инженерный вестник Дона*. 2019. № 9.
12. Мотылева С. М., Соснина М. О. О накоплении тяжёлых металлов в листьях и плодах различных сортов чёрной смородины в зависимости от фазы вегетации // *Сельскохозяйственная биология. Сер. Биология растений*. 1996. № 1. С. 67—71.
13. Миркин Б. М. Современная наука о растительности. М.: Логос, 2001. 262 с.
14. Климова Е. В. Деградация почвы в результате несбалансированного удобрения // *Экологическая безопасность в АПК: Реферативный журнал*. 2001. № 4. С. 863.
15. Чижов Б. Е., Кулясова О. А. Рекультивация и ремедиация в лесах Западной Сибири: монография. Пушкино: ВНИИЛМ, 2018. 222 с.
16. Янкевич М. И. Формирование ремедиационных биоценозов для снижения антропогенной нагрузки на водные и почвенные экосистемы: Автореф. дис. ... д-ра биол. наук: Специальность 03.00.23. Щёлково, 2002. 49 с.

## References

1. Bolotov O. V. [et al.]. *Use and protection of water resources in the forest complex. Calculation of the water supply network of a working settlement: a textbook on the implementation of course work by students of the specialty 250401 Forest engineering full-time and part-time forms of education*. Federal Agency for Education, GOU VPO «Siberian State Technological University». Krasnoyarsk, 2010. 84 p. (In Russ.)
2. *Forest Code of the Russian Federation (as amended on July 2, 2021) (edition effective from September 1, 2021) 200-FZ*. State Duma of the Federal Assembly of the Russian Federation. Moscow, 2006. 102 p. (In Russ.)

3. Ranniko P., Varis E., Piipponen M. Koivuselga. Social transformation of a logging village in Russian Karelia. Translated from Finnish by Yu. M. Kilin. *Studia Humanitatis Borealis*, 2016, no. 2 (7), pp. 32—47. (In Russ.)
4. Aleksandrov V. A. *Mechanization of logging operations in Russia*. Saint Petersburg, SPbLTA, 2000. 286 p. (In Russ.)
5. Syunev V. S., Grafova E. O. New technical solutions to reduce the negative impact of timber industry on the forest environment. *Resources and Technology*, 2022, vol. 19, no. 2, pp. 48—71. (In Russ.)
6. Pitina I. A. On the development of recommendations for the restoration of lands polluted by untreated wastewater. *Ecological problems of the development of agricultural landscapes and ways to increase their productivity: collection of articles based on the materials of the International Scientific Ecological Conference, Krasnodar, 27—29 March 2018*. Krasnodar, Kuban State Agrarian University named after I. T. Trubilina, 2018, pp. 35—38. (In Russ.)
7. Voronchikhina E. A. *Reclamation of disturbed landscapes: theory, technology, regional aspects: monograph*. Perm, 2010. 165 p. (In Russ.)
8. Artsimovich P. M., Kazaryan V. A. Qualitative composition of surface runoff from residential areas of large cities. *Purification and use of surface runoff from the territories of cities and industrial sites: Materials of the seminar*. Moscow, Society «Knowledge», 1981. (In Russ.)
9. Gavrilova O. I., Sokolov A. I. *Forest reclamation of disturbed lands in the North: Proc. Allowance*. Petrozavod. state un-t, Institute of forests of the Karelian scientific center of the Russian Academy of Sciences. Petrozavodsk, 2001. 20 p. (In Russ.)
10. Karimov Kh. N., Uzakov Z. Z., Khushmurodov Zh. P. [et al.]. Pollution of irrigated soils and their biological treatment. *Scientific Review. Biological Sciences*, 2021, no. 2, pp. 34—40. (In Russ.)
11. Mishustin O. A., Khantimirova S. B., Zheltobryukhov V. F. [et al.] Evaluation of the level of negative impact on the components of the natural environment of an unauthorized dump near the village of Samofalovka, Volgograd Region. *Engineering Bulletin of the Don*, 2019, no. 9. (In Russ.)
12. Motyleva S. M., Sosnina M. O. Accumulation of heavy metals in leaves and fruits of various varieties of black currant depending on the phase of vegetation. *Agricultural Biology. Ser. Biology of plants*, 1996, no. 1, pp. 67—71. (In Russ.)
13. Mirkin B. M. *Modern science of vegetation*. Moscow, Logos, 2001. 262 p. (In Russ.)
14. Klimova E. V. Soil degradation as a result of unbalanced fertilizer. *Ecological safety in the agro-industrial complex: Abstract journal*, 2001, no. 4, p. 863. (In Russ.)
15. Chizhov B. E., Kulyasova O. A. *Recultivation and remediation in the forests of Western Siberia: monograph*. Pushkino, VNIILM, 2018. 222 p. (In Russ.)
16. Yankevich M. I. *Formation of remediation biocenoses to reduce the anthropogenic load on water and soil ecosystems, Extended Abstract of Cand. dis. for the competition scientist step. Doctor of Biological Sciences: Spec. 03.00.23*. Shchelkovo, 2002. 49 p. (In Russ.)