

Вестник Евразийской науки / The Eurasian Scientific Journal <https://esj.today>

2018, №2, Том 10 / 2018, No 2, Vol 10 <https://esj.today/issue-2-2018.html>

URL статьи: <https://esj.today/PDF/65SAVN218.pdf>

Статья поступила в редакцию 01.03.2018; опубликована 23.04.2018

**Ссылка для цитирования этой статьи:**

Илюхин А.В., Марсов В.И., Джабраилов Х.А., Чантиева М.Э. Особенности процессов разработки грунтов землеройно-транспортными машинами // Вестник Евразийской науки, 2018 №2, <https://esj.today/PDF/65SAVN218.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ.

**For citation:**

Iliukhin A.V., Marsov V.I., Dzhabrailov Kh.A., Chantieva M.E. (2018). Features of soil development processes by digging and transporting machines. *The Eurasian Scientific Journal*, [online] 2(10). Available at: <https://esj.today/PDF/65SAVN218.pdf> (in Russian)

УДК 625.7

ГРНТИ 67.17.15

**Илюхин Андрей Владимирович**

ФГБОУ ВПО «Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет», Москва, Россия  
Заведующий кафедрой  
Доктор технических наук, профессор  
E-mail: [aviluhin@mail.ru](mailto:aviluhin@mail.ru)  
РИНЦ: [https://elibrary.ru/author\\_profile.asp?id=331654](https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=331654)

**Марсов Вадим Израилевич**

ФГБОУ ВПО «Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет», Москва, Россия  
Профессор кафедры  
Доктор технических наук  
E-mail: [madiapp@bk.ru](mailto:madiapp@bk.ru)

**Джабраилов Хизар Абубакарович**

ФГБОУ ВПО «Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет», Москва, Россия  
Заведующий лабораторией  
E-mail: [hizarmuslim@mail.ru](mailto:hizarmuslim@mail.ru)  
РИНЦ: [https://elibrary.ru/author\\_profile.asp?id=918614](https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=918614)

**Чантиева Милана Энбековна**

ФГБОУ ВПО «Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет», Москва, Россия  
Инженер  
Кандидат технических наук  
E-mail: [milach84@mail.ru](mailto:milach84@mail.ru)  
РИНЦ: [https://elibrary.ru/author\\_profile.asp?id=564572](https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=564572)

## Особенности процессов разработки грунтов землеройно-транспортными машинами

**Аннотация.** Для обеспечения круглогодичного строительства транспортных сооружений, в зимний период года возникает потребность в предварительной разработке тяжелых и мерзлых грунтов. Многолетнемерзлые грунты занимают около 49 % всей территории страны, а вместе с сезонно мерзлыми грунтами почти 90 %. При этом в северных районах зимний период длится 6...8 месяцев, а глубина мерзлого слоя достигает 2,5 м. Земляные работы по праву считаются одними из самых трудоёмких ввиду того, что на их выполнение затрачивается до 15 % стоимости и до 20 % трудозатрат от общего объёма

строительных работ. На практике в них задействовано 10 % от общего числа рабочих. Мерзлые грунты разрушаются различными способами: механический, термомеханический, газодинамический и т. д., которые обеспечивают разрушение разрабатываемой поверхности для уменьшения их прочностных свойств. Наиболее распространёнными машинами для разрушения твердых грунтов механическим способом являются рыхлители статистического и динамического действия. В статье на основе осуществлённого анализа аналитических зависимостей активных сил рыхления, разработана математическая модель бульдозерного агрегата, которая позволяет выполнить исследования его процесса копания, определить теоретическую эпюру выемки грунта и являться основным элементом системы автоматического регулирования режимов разработки грунтов.

**Ключевые слова:** математическая модель; копание грунта; бульдозер; автоматическое управление; рабочий орган

Система автоматического управления процессом копания грунта представляет собой замкнутую систему, включающую:

- управляемый объект – «бульдозер – грунт»;
- автоматическое управляющее устройство.

Математическая модель управляемого объекта в этом случае может быть представлена уравнениями движения машинного агрегата (например, бульдозера) и сил сопротивления копанию грунта ЗТМ.

Уравнение движения бульдозера с учетом того, что жесткость элементов конструкции бульдозера не менее чем на четыре порядка превышает аналогичную характеристику грунта [1], имеет вид:

$$P_T - W = m (dv_d/dt), \quad (1)$$

$$J_i (d\omega_i/dt) = M_{ди} - P_{ти} r_i, \quad (2)$$

где:  $P_T$  – суммарная движущая сила бульдозерного агрегата;

$W$  – полное сопротивление при копании грунта;

$t$  – время;

$m$  – масса бульдозерного агрегата;

$v_d$  – действительная скорость бульдозерного агрегата;

$J_i, \omega_i, M_{ди}, P_{ти}, r_i$  – момент инерции, угловая скорость, вращающий момент, движущая сила и радиус качения  $i$ -го движителя.

Суммарная движущая сила бульдозерного агрегата равна:

$$P_T = \sum_i P_{ти} \quad (3)$$

Движущая сила  $i$ -го движителя:

$$P_{ти} = \varphi(\delta_i), \quad (4)$$

где:  $\delta_i$  – коэффициент буксования  $i$ -го движителя.

Коэффициент буксования  $i$ -го движителя равен:

$$\delta_i = (v_{ти} - v_d)/v_{ти}, \quad (5)$$

где:  $v_{ти}$  – теоретическая скорость движения бульдозера.

Теоретическую скорость движения бульдозера, с учетом того, что радиус качения гусеничного хода является постоянным, можно считать линейной функцией числа оборотов двигателя:

$$v_T = (\pi r_{ki} n) / 30 i_n, \quad (6)$$

где:  $n$  – число оборотов вала двигателя;

$i_n$  – общее передаточное число трансмиссии на данной передаче;

$r_{ki}$  – радиус качения  $i$ -го движителя.

Угловая скорость  $i$ -го движителя определяется выражением

$$\omega_i = v_T / r_{ki}. \quad (7)$$

Вращающий суммарный момент движителей согласно [1] можно считать линейной функцией крутящего момента двигателя

$$M_d = M_{дв} i_n \eta, \quad (8)$$

где:  $M_{дв}$  – крутящий момент двигателя;

$\eta$  – общий КПД всех передач между двигателем и движителем.

Полное сопротивление движению бульдозерного агрегата согласно [2] можно определить по формуле

$$W = KBh + V_{пр} \gamma f_{пр} + V_{пр} \gamma f_{гм} \cos^2 \beta + Gf, \quad (9)$$

где:  $K$  – удельное сопротивление грунта лобовому резанию;

$B$  – ширина отвала бульдозера;

$h$  – глубина резания в процессе перемещения призмы грунта;

$V_{пр}$  – фактический объем призмы волочения в плотном теле;

$\gamma$  – объемный вес грунта в плотном теле;

$f_{пр}$  – коэффициент сопротивления перемещению;

$\beta$  – угол резания;

$f_{гм}$  – коэффициент трения грунта по металлу;

$G$  – суммарный вес бульдозерного агрегата;

$f$  – коэффициент сопротивления перемещению бульдозерного агрегата.

Объем призмы волочения через время  $t$  можно вычислить по формуле

$$V_{пр} = B \int_0^t h v_d dt \quad (10)$$

Совместное решение уравнений (9) и (10) позволяет получить полное сопротивление движению бульдозерного агрегата при копании грунта в следующем виде:

$$W = KBh + Gf + AB \int_0^t h v_d dt, \quad (11)$$

где:  $A$  – постоянная величина.

Приведенная система уравнений (1)...(8) и (11) позволяет описать достаточно точно процесс копания грунта бульдозером. После соответствующих преобразований и введения упрощающих допущений могут быть выполнены необходимые теоретические исследования с помощью современных средств вычислительной техники.

С помощью приведенных уравнений можно, например, определить теоретическую эпюру выемки грунта при копании, которая может служить критерием оптимальности при дальнейших исследованиях.

Преобразовав уравнение (1) с учетом выражения (11), получим основное уравнение движения бульдозера при копании грунта:

$$P_{\tau} = KBh - Gf - AB \int_0^t h v_{\text{д}} dt = m \frac{dv_{\text{д}}}{dt} \quad (12)$$

Уравнение (12) необходимо решить отдельно для участка заглабления и выглабления отвала бульдозера.

По мере заглабления суммарная движущая сила  $P_m$ , развиваемая двигателями, возрастает и достигает величины  $P_m \text{ max}$ , соответствующей оптимальному режиму работы двигателя [2]. Этот момент следует считать концом заглабления. При этом глубина резания  $h = h_{\text{max}}$ .

После достижения  $h_{\text{max}}$  необходимо производить постепенное выглавление отвала таким образом, чтобы поддерживать постоянной суммарную движущую силу  $P_{\tau \text{ max}}$ .

После дифференцирования уравнения (12) с учетом того, что при выглавлении отвала действительная скорость бульдозера будет постоянной, получаем:

$$dh/dt + (A/K)h = 0. \quad (13)$$

Решение этого уравнения имеет вид

$$h = h_{\text{max}} e^{-\frac{t}{\tau}}, \quad (14)$$

где:  $\tau = K/A$  – постоянная времени участка выглавления.

Максимальная глубина резания определяется из выражения (12) при  $t = 0$  и  $P_{\tau} = P_{\tau \text{ max}}$ :

$$h_{\text{max}} = (P_{\tau \text{ max}} - Gf)/KB. \quad (15)$$

При транспортировке грунта часть призмы волочения переходит в боковые валики, поэтому для компенсации этих потерь необходимо процесс копания закончить при величине заглабления равной [2]:

$$h_1 = (K_1 V_{\text{пр}})/B, \quad (16)$$

где:  $K_1$  – коэффициент, зависящий от свойств грунта.

Таким образом, полученная математическая модель позволяет выполнить исследования процесса копания бульдозером, определить теоретическую эпюру выемки грунта и являться основным элементом системы автоматического регулирования режимов разработки грунта землеройно-транспортными машинами [6].

Исследуя работы по автоматизации дорожно-строительных машин, в частности, бульдозеров, можно сделать вывод, что большинство известных разработок обеспечивают автоматизацию только процесса профилирования, исключая процесс копания [9]. Так, известная система «Автоплан-1» с целью повышения планирующих свойств бульдозера стабилизирует угловое положение его толкающего бруса, а система «Автоплан-2» в дополнение к этому защищает двигатель от перегрузки. Система «Комбиплан-10 и» может работать в двух режимах: автономном как система «Автоплан» и копирном, при котором положение отвала бульдозера по высоте и перекося сохраняется по направленному лазерному лучу.

В процессе копания грунта система автоматического управления бульдозером должна решать иные задачи, а именно, обеспечивать реализацию свободной максимальной мощности

дизеля с ограничением по максимально допустимой устойчивой силе тяги [5, 10]. Для реализации такой автоматизированной системы может служить двухконтурная САУ рабочим органом бульдозера. Один контур должен поддерживать заданную свободную мощность дизеля при копании путем автоматического управления заглублением рабочего органа в функции угловой скорости вала дизеля бульдозера [6, 7]. Другой контур при буксовании движителей бульдозера выше оптимального значения принудительно должен выглублять рабочий орган в функции коэффициента буксования независимо от величины угловой скорости вала дизеля.

Алгоритм управления (рис. 1), реализующий данный способ управления, был отлажен в системе, построенной на базе микроЭВМ. В памяти программ микроконтроллера записываются двоичные коды, пропорциональные периоду измерения  $T_i$ , зонам нечувствительности величины рассогласования угловой скорости вала дизеля  $\Delta\omega_0$ , буксования движителя  $\Delta\delta_0$ , величине оптимального коэффициента буксования ( $\delta_0 = 10\%$  для гусеничных движителей), скважности импульсов управляющего сигнала в функции сигналов рассогласования  $\Delta\omega$  и  $\Delta\delta$  согласно выбранному закону управления.

Величина заданного значения угловой скорости дизеля устанавливается оператором во время пробных заездов и вводится в память данных с пульта управления [3, 4]. Кроме того, оператор вводит величина время копания, обеспечивающую автоматическое окончание процесса копания.

При выполнении системы осуществляется ввод величины времени процесса копания и заданного значения угловой скорости дизеля  $\omega_0$  (блок 2).

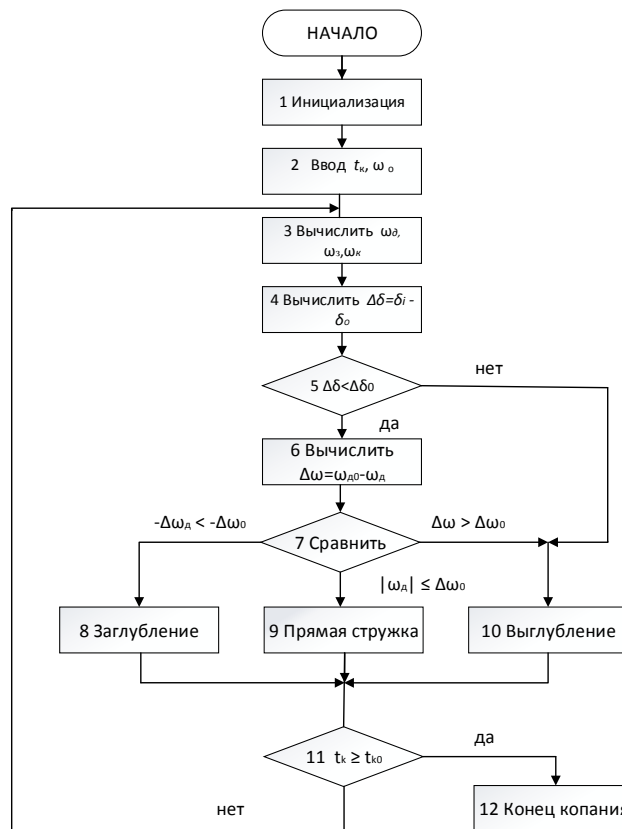


Рисунок 1. Алгоритм управления

Алгоритм построен на основе последовательного измерения текущих угловых скоростей вала дизеля  $\omega_д$ , звездочки  $\omega_з$  и свободно-катящегося колеса  $\omega_к$ , многократно повторяющиеся циклы измерения, что существенно повышает точность измерений (блок 3). При этом в каждом цикле корректируется длительность управляющего сигнала.

Блоки 4, 5 вычисляют коэффициенты буксования движителей  $\delta_i$ , сигнал рассогласования по буксованию  $\Delta\delta = \delta_i - \delta_0$  с зоной нечувствительного контура буксования  $\Delta\delta_0$  и с помощью блока 10 обеспечивают приоритетное выглубление отвала бульдозера при буксовании движителей выше оптимального значения  $\delta_0$  независимо от величины угловой скорости вала дизеля.

Блоки 6, 7, 8, 9, 10 обеспечивают управление отвалом бульдозера в функции угловой скорости вала дизеля при условии, что буксование движителей не больше оптимального.

Блок 11 сравнивает установленный параметр окончания копания  $t_{ко}$  с его текущим значением  $t_k$ . При выполнении условия  $t_k \geq t_{ко}$  блок 12 заканчивает автоматический процесс копания и передает управление оператору.

Таким образом, система автоматического управления отвалом бульдозера при копании должна быть двухконтурной [8]. Первый контур поддерживает заданную движущую силу бульдозера в процессе копания путем автоматического управления заглублением отвала в функции угловой скорости вала дизеля. При излишнем буксовании двигателя, второй контур САУ принудительно выглубляет отвал в функции коэффициента буксования двигателя.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Холодов А.М. Основы динамики землеройно-транспортных машин. М., Машиностроение, 1968.
2. Алексеева Т.В., Артемьев К.А., Бромберг А.А. и др. Дорожные машины. Часть 1. Машины для землеройных работ. М., Машиностроение, 1972.
3. Сердобов, В.Б. Архитектура и строительство: монография / Д.И. Назаров, В.Б. Сердобов. – Красноярск: Научно-инновационный центр. – 2011. – 74 с.
4. Сердобов, В.Б. Исследование рыхления грунтов криолитозоны / В.Б. Сердобов, И.К. Растегаев // Применение природосберегающих технологий в условиях холодных регионов: материалы IX Международного симпозиума по развитию холодных регионов, 1-5 июня 2010 г. – Якутск: ЯИЦ СО РАН. – 2010. – С. 159.
5. Сердобов, В.Б. Результаты полевых исследований рыхления грунтов в зимний период по установлению глубины плавания / В.Б. Сердобов, И.К. Растегаев // Проблемы совершенствования конструкции строительных, дорожных, коммунальных и аэродромных машин: материалы международного семинара. – М.: МАДИ, 2013. – С. 72-76.
6. Гришин, А.А. Анализ развития методов и машин для разработки тяжелых и мерзлых грунтов / А.А. Гришин, А.Ф. Тихонов // Механизация строительства. – 2011. – № 8. – С. 28-30.
7. Гришин, А.А. Задачи автоматизации магнестрикционных виброрыхлителей для разработки тяжелых и мерзлых грунтов / А.А. Гришин // Технология колесных и гусеничных машин. – 2012. – № 2(2). – С. 40-43.
8. Абдулханова, М.Ю. Интегрированные системы автоматизации промышленных предприятий / М.Ю. Абдулханова, Р.А. Гематудинов, М.Э. Чантиева // Вестник Московского автомобильно – дорожного государственного технического университета (МАДИ). – 2010. – № 3. – С. 103-108.
9. Шарапова И.К. Сравнительный анализ эффективности эксплуатации автомобилей, работающих на различных видах энергоносителей / И.К. Шарапова, В.В. Гулый // Грузовик. – 2014. – № 4. – С. 36-40.
10. Сердобов, В.Б. О глубине «плавания» рабочего органа рыхлителя статического действия / В.Б. Сердобов, И.К. Растегаев // Международный семинар «Проблемы совершенствования конструкции строительных, дорожных, коммунальных и аэродромных машин»: тезисы докладов. – М.: МАДИ, 2011. – С. 84-87.

**Iliukhin Andrei Vladimirovich**

Moscow automobile and road construction state technical university, Moscow, Russia  
E-mail: aviluhin@mail.ru

**Marsov Vadim Izrailevich**

Moscow automobile and road construction state technical university, Moscow, Russia  
E-mail: madiapp@bk.ru

**Dzhabrailov Khizar Abubakarovich**

Moscow automobile and road construction state technical university, Moscow, Russia  
E-mail: hizarmuslim@mail.ru

**Chantieva Milana Enbekovna**

Moscow automobile and road construction state technical university, Moscow, Russia  
E-mail: milach84@mail.ru

## **Features of soil development processes by digging and transporting machines**

**Abstract.** To ensure the year-round construction of transportation facilities, during the winter season, there is the need for preliminary development of heavy and frozen soils. Permafrost soils occupy about 49 % of the entire territory of the Russian Federation, and together with seasonal frozen soils accounts for almost 90 %. At the same time in the northern regions of the country the winter period last for about 6...8 months, and the depth of the frozen layer reaches 2.5 m. Excavation is considered to be one of the most time consuming, in view of the fact that it carries up to 15 % of the cost, and up to 20 % labor costs from the total amount of construction work. In practice, 10 % of the total workers are employed mainly to carry out these types of jobs. Frozen soils are being excavated in various ways namely: mechanically, thermo-mechanically, gas-dynamically, etc., which ensure the destruction of the soil surfaces being developed to reduce their strength properties. The most common machines for breaking solid soils mechanically are statistical and dynamic rippers. In this article, based on the analysis of the analytical dependants of the active loosening forces, a mathematical model of the bulldozer machine is developed, which allows to carry out studies of its excavating processes, to determine the theoretical relationships of excavation, which is the main element of the automatic control system for soil development phases.

**Keywords:** mathematical model; soil digging; bulldozer; automatic control; working unit