

2. Grigorev I., Nikiforova A., Khitrov E., Ivanov V., Gasparian G. Softwood harvesting and processing problem in Russian Federation // International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM 14 b. 2014. P. 443-446.
3. Modin N.A., Eroshkin A.N. Briquetting of chopped wood and wood bark. M.: Lesnaya promyshlennost', 1971. 112 p.
4. Myuller O.D. Improving pellet production technology: avtoref. dis. ... d-ra ... tekhn. nauk. Arkhangel'sk, 2015. 31 p.
5. Pozdnyakov A.A. The strength and elasticity of composite wood materials. M.: Lesnaya promyshlennost', 1988. 133 p.
6. Lekhnitskii S.G. The theory of an anisotropic elastic body. 2-e izd., pererab. i dop. M.: Nauka, 1977. 416 p.
7. Korshak A.V., Birman A.R., Khitrov E.G., Korkka A.A., Selimov A.M. To question of equipment reliability increasing in forest complex // Izvestia SPbLTA. 2010. № 191. P. 144-151.
8. Korshak A.V., Birman A.R., Onegin V.I., Khitrov E.G. A sawdust briquettes production under impact press equipment // Izvestia SPbLTA. 2011. № 197. P. 175-181.
9. Ugolev B.N. Wood-with the basics of Commodity Forest. M.: Izd-vo MGUL, 2001. 333 p.
10. Grigor'ev I.V., Khitrov E.G., Vlasov Yu.N., Ivanov V.A., Zhdanovich V.I. The need for further research of energy consumption for timber cross-cutting // Systems. Methods. Technologies. 2013. № 4 (20). P. 143-147.
11. Grigor'ev I.V., Khitrov E.G., Ivanov V.A., Zhdanovich V.I., Derbin M.V. Joint influence of a temperature and humidity of a pine tree wood on energy-output ratio of a cross-cutting process // Systems. Methods. Technologies. 2014. № 2 (22). P. 157-162.
12. Kunitskaya O.A., Khitrov E.G., Il'yushenko D.A. Compaction of timber under impact load // Science Review. 2012. № 4. P. 121-127.
13. Kunitskaya O.A. The Justification of the directions of diversification of processing on semi-subsistence wood complex wood industries using innovative technologies. SPb.: SPbGLTU, 2015. 250 p.

УДК 630.432.31

DOI: 10.18324/2077-5415-2017-1-146-151

## Исследование закономерностей разрушения грунта при работе комбинированных грунтометов для тушения лесных пожаров

В.Я. Шапиро<sup>а</sup>, И.В. Григорьев<sup>б</sup>, О.И. Григорьева<sup>с</sup>, В.А. Иванов<sup>д</sup>

Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет им. С.М. Кирова, пер. Институтский 5, Санкт-Петербург, Россия

<sup>а</sup>vl54shap@rambler.ru, <sup>б</sup>silver73@inbox.ru, <sup>с</sup>grigoreva\_o@list.ru, <sup>д</sup>ivanovva55@mail.ru

Статья поступила 12.01.2017, принята 16.02.2017

*Лесные, особенно низовые, пожары являются серьезной проблемой для российских лесов. Один из способов их тушения — это засыпка крошки пожара массой разрыхленного грунта, для чего используются специальные машины — грунтометы. Наиболее перспективными следует считать комбинированные конструкции грунтометов, при использовании которых реализуются три основных этапа. На первом этапе верхний, наиболее прочный слой грунта (подстилка) снимается плоскими ножами, расположенными на роторе. На втором этапе основная масса грунта, необходимая для эффективного метания в направлении крошки лесного пожара, разрушается и разрыхляется с помощью сферических ножей определенного радиуса, на третьем этапе специальный рабочий орган грунтомета осуществляет метание разрыхленной массы грунта на заданные расстояние и высоту. Наибольшую сложность с позиций механики деформирования и разрушения твердого тела представляет первый этап, поскольку слой лесной подстилки — это волокнистая по своей структуре среда с включениями элементов древесной (корневой) системы. Этим обстоятельством можно объяснить особое внимание к процессу разрушения подстилки рабочим органом на низких скоростях резания. Одной из основных проблем второго этапа (взаимодействие сферического ножа с массивом грунта) является определение скорости сближения рабочего органа с поверхностью слоя с определенными физико-механическими свойствами. В ряде случаев при фрезеровании вязких и близких к пределу текучести слоев грунта для эффективного функционирования рабочих органов грунтомета используется режим пониженных скоростей. При изучении процессов метания грунта (третий этап) необходимо установить влияние на дальность и высоту метания таких факторов, как размеры разрушенного на предыдущих этапах слоя грунта, кинематические и угловые параметры рабочего органа грунтомета. В статье разработана математическая модель, позволяющая на стадии теоретических исследований и проработки проектно-конструкторских решений оценить результаты эффективной работы комбинированного грунтомета для тушения лесных пожаров с учетом различных факторов и условий реализации технологических процессов.*

**Ключевые слова:** лесные пожары; грунтомет; тушение лесных пожаров грунтом.

# Study of soil destruction mechanisms at work of combined soil-throwers designed for forest fire extinguishing

V. Y. Shapiro<sup>a</sup>, I.V. Grigorev<sup>b</sup>, O.I. Grigoreva<sup>c</sup>, V.A. Ivanov<sup>d</sup>

St. Petersburg State Forest Technical University under name of S.M. Kirov, 5, Institutsky per., St. Petersburg, Russia

<sup>a</sup>vl54shap@rambler.ru, <sup>b</sup>silver73@inbox.ru, <sup>c</sup>grigoreva\_o@list.ru, <sup>d</sup>ivanovva55@mail.ru

The article was received 12.01.2017, adopted 16.02.2017

Forest fires, especially ground ones, is a serious problem of woods in Russia. One of the ways of fire extinguishing is to cover the fire edge with a mass of loosened soil. This process requires special machinery called soil-throwers. The most effective are those of combined design, whose work include three main stages. At the first stage, the upper most solid layer of soil is removed with flat blades disposed on the rotor. At the second stage, the bulk of the soil, needed for effective throwing in the direction of the edge of a forest fire, is destroyed and loosened with spherical knives of a certain radius. And, at the third stage, a special working body of the soil-thrower throws loosened mass of soil at a given distance and height. From the standpoint of mechanics of deformation and destruction of solid bodies, the first stage is the most difficult since the layer of the forest floor is fibrous in its structure with the inclusions of root system elements. This fact explains special attention given to the process of destruction of this layer with the working body at low speeds. One of the main problems of the second stage is the interaction of a spherical knife with the soil surface layer with defined physical and mechanical properties. In some cases, for effective operation of working bodies of a soil-thrower when milling viscous and close to the yield strength soil layers, low speed mode is used. In the study of the processes of soil throwing at the third stage, it is necessary to estimate the influence of the size of a previously destroyed soil layer on throwing distance and height. The article represents the mathematical model which, at the stage of theoretical research and elaboration of design decisions, makes it possible to assess the results of effective work of combined soil-throwers designed for forest fire extinguishing. The model takes into account various factors and conditions for realization of technological processes.

**Keywords:** forest fires; soil-thrower; forest fire extinguishing; soil.

При исследовании процессов напряженно-деформированного состояния (НДС) грунта на первом этапе работы грунтмета под массивом лесного почвогрунта будем понимать слой лесной подстилки и находящийся под ним слой грунта. Физико-механические свойства разрушаемой среды в пределах этих слоев существенно отличаются [1].

Особенности формирования НДС почвогрунта при статическом и динамическом воздействии инденторов различного вида и формы детально изучены в работах [2–6].

Рассмотрим схему (рис. 1 а, б) воздействия плоской заостренной фрезы 1 на поверхность почвогрунта, верхний слой которого — подстилка 2 — имеет толщину размером  $h_n$ .

Будем считать, что фреза имеет угол заточки (заострения)  $\varphi_1$  и взаимодействует с поверхностью слоя 2 под углом резания  $\varphi_2$ .

Фреза 1 действует на слой массива с заданной силой фрезерования  $F_\phi$ , нормальная составляющая которой  $F$  в зоне контакта площадью  $\Delta S$  создает начальное вертикальное напряжение  $\sigma_0$ .

Математическая модель разрушения слоя подстилки применительно к схеме на рис. 1 базируется на результатах решения задачи Буссинеска [7] о воздействии острого твердого индентора (конуса, пирамиды, клина) на упругое полупространство.

Основными геометрическими параметрами зоны контакта фрезы с массивом слоя являются контактное сближение  $h_0$  и радиус контактной площадки  $a_0$ , которые зависят от нормальной статической силы  $F = F_\phi \sin(\varphi_1 + \varphi_2)$ , угла заточки  $\varphi_1$ , коэффициента Пуассона  $\nu_2$  и модуля упругости  $E_2$ :

$$h_0 = \sqrt{\frac{\pi F (1 - \nu_2^2)}{2 E_2 \operatorname{tg} \varphi_1}}; \quad a_0 = \sqrt{\frac{2 F (1 - \nu_2^2) \operatorname{tg} \varphi_1}{\pi E_2}}. \quad (1)$$

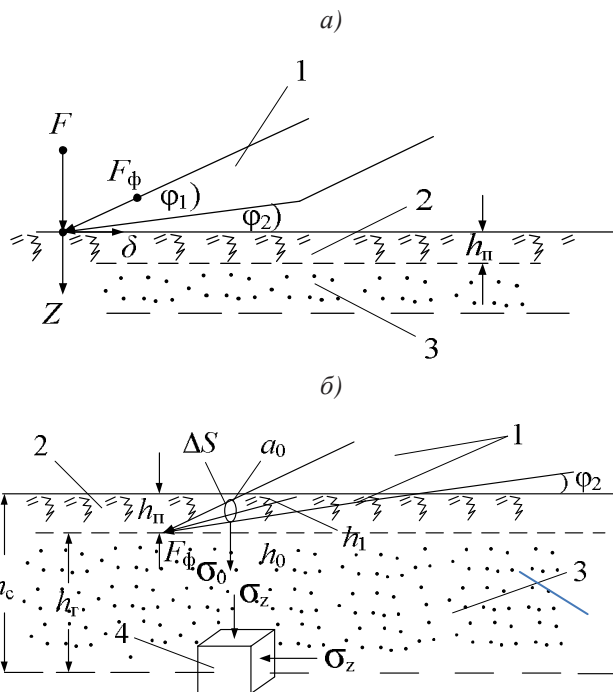


Рис. 1. Схема воздействия фрезы на слой подстилки (этап 1)

С учетом (1) определим:  $\Delta s = \pi a_0^2$ ;  $\sigma_0 = \frac{F}{\Delta s}$ .

Параметр  $h_1$ , характеризующий удаленность контактной площадки от поверхности слоя в направлении действия фрезы, будет равен:

$$h_1 = a_o \operatorname{ctg}(\varphi_1 + \varphi_2). \quad (2)$$

Тогда толщина  $h_{\text{п}}$  снимаемого фрезой слоя подстилки равна:

$$h_{\text{п}} = (h_o + h_1) \cos(0,5\varphi_1 + \varphi_2),$$

и исходные параметры фрезерования должны обеспечить достижение условия полного разрушения слоя подстилки.

Нижележащий слой массива грунта 3 находится в НДС, которое сформировалось в процессе фрезерования верхнего слоя подстилки.

В плоской постановке задачи (адекватной плоской форме ножа) произвольный элемент 4 массива грунта, находясь в непосредственной близости от фрезы 1, на своих главных площадках будет испытывать действие двух главных компонент тензора напряжений — вертикальной  $\sigma_z$  и горизонтальной (радиальной)  $\sigma_r$  (рис. 1 б).

Величину напряжений  $\sigma_z$  определим в рамках модели затухания напряжений в грунте с внутренним трением [8]:

$$\sigma_z = \frac{\sigma_o}{(z/a_o)^{n-\alpha}}, \quad (3)$$

где  $\alpha = \frac{\nu}{1-\nu}$  — коэффициент бокового расширения;  $n$  — коэффициент затухания, который зависит от формы создаваемого индентором фронта волны напряжений:  $n = 1$  — для плоского фронта напряжений,  $n = 2$  — для

цилиндрического и  $n = 3$  — для сферического фронта. В случае плоской фрезы принимаем  $n = 1$ .

Величину горизонтальных напряжений определим через механизм действия бокового распора:

$$\sigma_r = \alpha \sigma_z, \quad (4)$$

после чего величина максимальных касательных напряжений  $\tau$  равна:

$$\tau = 0,5(\sigma_z - \sigma_r). \quad (5)$$

По достижении величиной  $\tau$  предела прочности на сдвиг  $\sigma_s$  будем считать, что условие разрушения элемента 4 выполнено, и глубина этого слоя составляет величину  $h_r$ . Тогда суммарное значение глубины снимаемого слоя на этапе разрушения фрезой составляет:

$$h_c = h_n + h_r. \quad (6)$$

Расчеты размеров снимаемых слоев были выполнены для трех категорий грунтов подстилки, характеристики которых приведены в [9]: I — слабые малосвязанные грунты с показателем влажности  $W$ , превышающим предел текучести  $\sigma_{\text{т}}$ , II — грунты средней связности, когда  $W \approx \sigma_{\text{т}}$ , III — крепкие связные грунты при  $W \approx (0,55-0,75)\sigma_{\text{т}}$ .

В табл. 1 для указанных категорий грунтов и исходных значений параметров фрезерования:  $F_{\phi} = 0,31$  кН,  $\varphi_1 = 0,262$  рад. ( $15^\circ$ ),  $\varphi_2 = 0,436$  рад. ( $25^\circ$ ) представлены результаты расчетов глубины слоя  $h_c$  и двух его составляющих,  $h_n$  и  $h_r$  (в скобках указан % от величины  $h_c$ ).

Таблица 1

Расчет размеров глубины фрезерования и разрушения грунта

Грунт	$\sigma_s, \text{МПа}$	$E_2, \text{МПа}$	$\nu_2$	$h_c, \text{м} (\%)$	$h_n, \text{м} (\%)$	$h_r, \text{м} (\%)$
I	0,025	0,13	0,3	0,184	0,122(63)	0,062(37)
II	0,07	3	0,25	0,069	0,026(38)	0,043(62)
III	0,2	13	0,2	0,039	0,013(32)	0,026(68)

Как следует из анализа данных табл. 1, по мере увеличения прочности и связности грунта существенно снижается размер слоя фрезерования, причем если для слабых грунтов глубина слоя подстилки превышает 60 % общей глубины фрезерования, то для более прочных грунтов наоборот — более 60 % глубины образуется за счет разрушения нижележащего слоя грунта.

На втором этапе одной из основных проблем взаимодействия сферического ножа с массивом грунта является определение скорости сближения рабочего органа с поверхностью слоя с определенными физико-механическими свойствами. В ряде случаев, при фрезеровании вязких и близких к пределу текучести слоев грунта, для эффективного функционирования рабочих органов грунтомета используется режим пониженных скоростей — до 0,5–0,8 м/с и не выше 1 м/с [10; 11].

Рассмотрим схему (рис. 2) разрушения слоя грунта 1 в процессе воздействия сферического диска 2 радиусом  $R$  с углом атаки  $\theta$ .

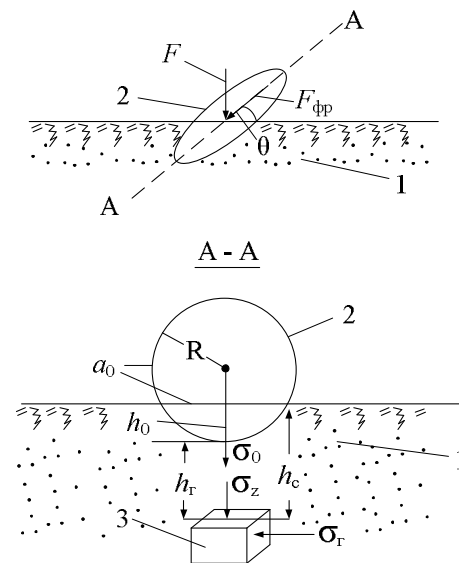


Рис. 2. Схема взаимодействия сферического диска с массивом грунта (этап 2)

Такое представление работы фрезерного диска на грунт также позволяет использовать принципы механики контактного разрушения в рамках модели взаимодействия круглого индентора радиусом  $R$  с упругим полупространством.

В этом случае основными характеристиками процесса погружения индентора в среду являются величина контактного сближения  $h_o = a_o^2/R$  и радиус контактной площадки  $a_o = \sqrt[3]{\frac{3F_{\phi p}(1-\nu^2)R}{4E}}$ , на которой действует усредненное по площади начальное вертикальное

давление  $\sigma_o = \frac{F_{\phi p} \cos \theta}{\pi a_o^2}$ , где  $F_{\phi p}$  — сила действия диска (контактная сила сближения), вертикальная проекция которой — сила  $F$ ;  $\nu$  — коэффициент Пуассона;  $E$  — модуль деформации массива грунта.

Величина контактной силы  $F_{\phi p}$  возрастает пропорционально величине сближения  $h_o^{3/2}$ , причем коэффициент пропорциональности  $k = \frac{4E\sqrt{R}}{3(1-\nu^2)}$ . В том случае, если индентор имеет массу  $M$  и движется со скоростью сближения  $V$ , то, исходя из второго закона Ньютона, дифференциальное уравнение движения имеет вид:

$$\frac{dh}{dt} = \sqrt{V^2 - \frac{4k}{5M}h^{5/2}}. \quad (7)$$

Максимальное сближение  $h_{max} = h_o$  достигается при скорости движения  $\frac{dh}{dt} = 0$ .

Тогда максимальное давление в центре контакта равно:

$$\sigma_o = \frac{3k}{2\pi a_o R} \left( \frac{5MV^2}{4k} \right)^{1/5}. \quad (8)$$

За пределами зоны контакта произвольный элемент массива  $Z$  испытывает соответствующее НДС с компонентами тензора главных напряжений — вертикальных  $\sigma_z$  и радиальных  $\sigma_r$ , которые определим в соответствии с (3) и (4) при значении показателя степени  $n = 3$  для случая сферического фронта волны напряжений.

В качестве критерия разрушения принимаем условие предельного состояния, когда одна из компонент достигает величины предела прочности грунта на сдвиг  $\sigma_s$ . При разрушении слабых грунтов можно принять наименьшую из двух компонент —  $\sigma_r$  и тем самым дать оценку снизу размеров возможной зоны разрушения.

Тогда предельное значение глубины слоя грунта под действием разрушающих напряжений  $h_r$  определим из соотношения:

$$h_r = a_o \left( \frac{\alpha \sigma_o}{\sigma_s} \right)^{\frac{1}{3-\alpha}}, \quad (9)$$

а суммарное значение глубины слоя фрезерования составит:

$$h_c = h_o + h_r. \quad (10)$$

При этом скорость сближения  $V$  будет равна:

$$V = \left( \frac{2\pi R \sigma_s}{3\alpha k (5M/4k)^{1/5}} \right)^{5/2}. \quad (11)$$

Анализ соотношений (9) – (11) показывает, что на глубину разрушаемого слоя грунта и скорость сближения с ним фрезы влияют две основные группы параметров:

1) физико-механические свойства грунта, отражающие его прочностные ( $\sigma_s$ ), упругопластические ( $E$ ) и вязкие ( $\nu$ ) свойства;

2) условия фрезерования в виде силовой составляющей  $F_{\phi p}$ , радиуса ( $R$ ) и массы ( $M$ ) фрезы, угла атаки ( $\theta$ ).

Рассмотрим влияние физико-механических свойств почвогрунта на величину скорости сближения  $V$ .

В частности, коэффициент Пуассона  $\nu$  характеризует вязкость грунта, и по мере приближения параметра  $\nu$  к значениям 0,4-0,5 такой массив в механике сплошных сред все более адекватно рассматривают как несжимаемую жидкость. Применительно к фрезерованию слоя почвогрунтов можно заключить, что чем выше значение  $\nu$ , тем сложнее работа фрезы.

Этот вывод иллюстрирует график зависимости  $V$ , м/с, от  $\nu$ , представленный на рис. 3.

Анализ данных (рис. 3) действительно подтверждает вывод о том, что в сложных условиях фрезерования малосвязных, водонасыщенных и вязких грунтов, когда коэффициент Пуассона превышает значение 0,35, скорость фрезерования необходимо выдерживать, не выходя за пределы 1 м/с.

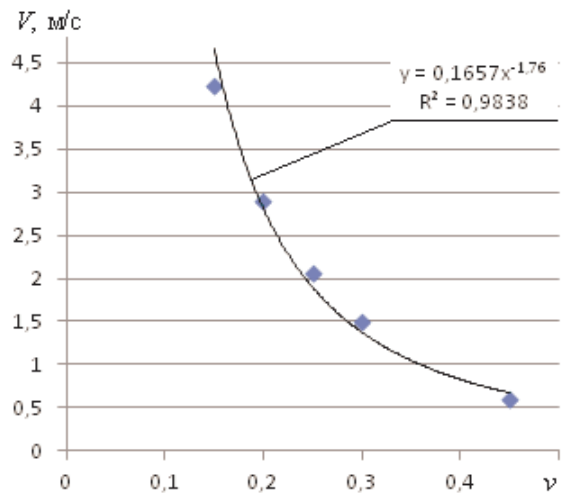


Рис. 3. Влияние вязкости массива грунта на скорость сближения фрезы

Особое значение в условиях фрезерования слоя грунта имеет радиус сферической фрезы  $R$  (на рис. 4 — ось абсцисс с интервалом  $R$  от 0,1 до 0,5 м).

На рис. 4 зависимость 1 представляет график функции  $V$  от  $R$  (для этого графика ось ординат имеет размерность м/с), а зависимость 2 — график функции  $h_c$  от  $R$  (для этого графика ось ординат, м).

Как видим, влияние радиуса фрезы на исследуемые параметры разнонаправленное: с ростом  $R$  скорость снижается по гиперболическому закону, а глубина среза увеличивается по параболическому закону.

Аналогичные расчеты и оценки были произведены при исследовании совместного влияния параметров  $R$  и  $\eta$  на глубину слоя фрезерования  $h_c$ .

Установлено, что из возможного диапазона изменения глубины  $h_c$  около 80 % данных практически поровну приходится на два диапазона значений, а именно  $h_c = 0,1-0,2$  м и  $h_c = 0,2-0,3$  м. Среднее значение выборки составило величину  $h_c = 0,22$  м.

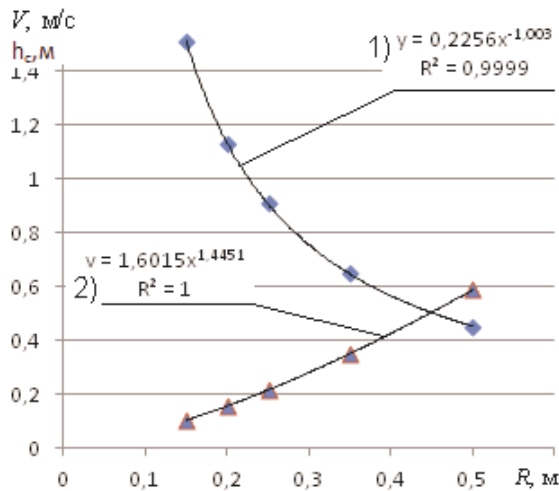


Рис. 4. Влияние радиуса сферической фрезы на скорость сближения и глубину срезаемого слоя грунта

На третьем этапе — метании порции грунта — рабочий орган одновременно совершает вращательные и поступательные движения [12], и при определении основных параметров процесса (дальности ( $L$ ) полета, высоты ( $H$ ) метания и массы ( $M$ ) грунта) необходимо знать окружную скорость ротора  $V_{ок}$  и угол метания  $\alpha$ , причем скорость  $V_{ок}$  равна:

$$V_{ок} = 2\pi R_r \omega, \quad (12)$$

где  $R_r$  — радиус рабочего органа, м;  $\omega$  — угловая скорость его вращения, об/с.

Параметр  $\omega$  линейно зависит от скорости сближения  $V$  [12], которая, как показано выше, является определяющей характеристикой эффективности реализации процесса разрушения грунта на втором этапе работы грунтомета.

Определим  $\omega$  как:

$$\omega = \frac{\beta V}{(b \sin \theta)}, \quad (13)$$

где  $\beta$  — половина центрального угла сегментной стружки;  $b$  — ширина профиля режущей части рабочего органа;  $\theta$  — угол атаки фрезы.

В итоге дальность ( $L$ ) и высота ( $H$ ) метания грунта равны:

$$L = \frac{V_{ок}^2 \sin 2\alpha}{g}, \quad H = \frac{V_{ок}^2 \sin^2 \alpha}{2g}, \quad (14)$$

где  $g$  — ускорение свободного падения, а масса вырезаемого грунта  $M$ , приходящаяся на одну лопатку ротора, равна:

$$M = \frac{\rho b h_r R_r \left( \frac{\pi \beta}{180 - 0,5 \sin 2\beta} \right) \sin \theta}{(1 - \cos \beta)}, \quad (15)$$

где  $\rho$  — плотность грунта,  $\text{кг/м}^3$ ;  $h_r$  — общая глубина срезаемого слоя грунта после работы грунтомета на первом и втором этапах, определяемая суммированием размеров слоев с помощью соотношений (6) и (10). Так, для грунтов II-III категорий связности глубина срезаемого слоя  $h_c$  при снятии первого слоя составила  $h_c = 0,039-0,069$  м (в среднем  $h_c = 0,054$  м), на втором этапе — при работе сферической фрезы — в среднем  $h_c = 0,22$  м. Суммарная величина глубины среза составила в среднем  $h_r = 0,276$  м.

На рис. 5, в частности, представлен график зависимости  $L$  (ось ординат, м) от  $V$  (ось абсцисс, м/с).

Расчеты выполнены при значениях:  $R_r = 0,4$  м,  $\alpha = 20^\circ$ ,  $\beta = 80^\circ$ ,  $h_r = 0,276$  м,  $b = 0,2$  м, скорость  $V_{ок}$  изменялась в диапазоне от 12,81 м/с при  $V = 0,5$  м/с до 25,63 м/с при  $V = 1$  м/с. Средняя величина  $V_{ок} = 19,22$  м/с.

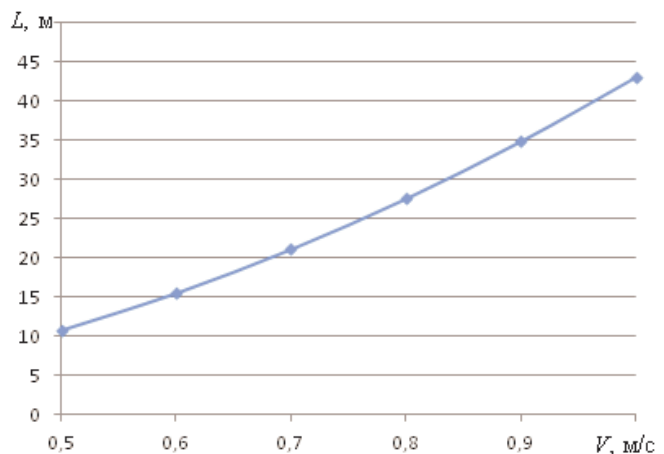


Рис. 5. Влияние скорости сближения грунтомета на дальность метания грунта (этап 3)

В работе [12] опытным путем установлены оптимальный размер слоя фрезерования  $h_r = 0,25$  м и диапазон изменения  $V_{ок} = 18-25$  м/с. При скоростях сближения  $V < 1$  м/с дальность метания достигает значения  $L = 31$  м.

Как видно из рис. 5, параметр  $V$  существенно влияет на величину  $L$ , и при изменении в пределах  $V = 0,75-0,85$  м/с дальность метания составляет  $L = 25-32$  м. Полученные расчетные значения хорошо согласуются с опытными данными.

Таким образом, установленные закономерности работы комбинированного грунтомета на всех трех этапах функционирования его рабочих органов позволяют произвести адекватные оценки конечных результатов формирования защитной полосы.

#### Литература

1. Добрецов Р.Ю., Григорьев И.В. Взаимодействие гусеничного движителя с почвогрунтом при значительном продольном смещении центров давления // Леса России: политика, промышленность, наука, образование: материалы науч.-технической конф. СПб., 2016. С. 124-129.

2. Газизов А.М., Шапиро В.Я., Григорьев И.В., Гумерова О.М. Моделирование процесса разрушения коры при окорке резанием // Изв. С.-Петербург. лесотехн. акад. 2010. № 193. С. 211-221.

3. Шапиро В.Я., Григорьев И.В., Жукова А.И. Оценка процессов деформирования почвы при циклическом уплотнении // Изв. учеб. заведений. Лесной журнал. 2008. № 4. С. 44-51.

4. Шапиро В.Я., Григорьев И.В., Жукова А.И. Особенности динамического уплотнения почвы при ее циклическом нагружении // Актуальные проблемы современной науки. 2006. № 3. С. 286-293.

5. Шапиро В.Я., Григорьев И.В., Жукова А.И. Влияние сдвиговых деформаций на процесс циклического уплотнения почвы // Естественные и технические науки. 2006. № 1. С. 174-180.

6. Шапиро В.Я., Григорьев И.В., Лепилин Д.В., Жукова А.И. Моделирование уплотнения почвогрунта в боковых полосах трелевочного волокна с учетом изменчивости трассы движения // Учен. зап. Петр. гос. ун-та. 2010. № 6 (111). С. 61-64.

7. Морозов Е.М., Зернин М.В. Контактные задачи механики разрушения. М.: Кн. дом «ЛИБРОКОМ», 2010. 544 с.

8. Мосинец В.Н., Абрамов А.В. Разрушение трещиноватых и нарушенных горных пород. М.: Недра, 1982. 248 с.

9. Агейкин А.С. Вездеходные колесные и комбинированные движители. М.: Машиностроение, 1972. 183 с.

10. Гнусов М.А. Обоснование параметров комбинированных рабочих органов грунтомета для прокладки минерализованных полос в лесу: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Воронеж, 2014. 16 с.

11. Орловский С.Н. Определение энергетических и динамических параметров тракторов, режимов резания активных рабочих органов машинно-тракторных агрегатов. Красноярск: КрасГАУ, 2011. 376 с.

12. Чукичев А.Н. Выбор типа и исследование параметров рабочего органа орудия для борьбы с лесными пожарами методом метания грунта: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Л., 1977. 19 с.

## References

1. Dobretsov R.Yu., Grigor'ev I.V. Interaction of caterpillar mover with soils with a significant longitudinal displacement of the center of pressure // Lesa Rossii: politika, promyshlennost', nauka, obrazovanie: materialy nauch.-tekhnicheskoi konf. SPb., 2016. P. 124-12.

2. Gazizov A.M., Shapiro V.Ya., Grigor'ev I.V., Gumerova O.M. Modelling process of destruction of a bark at cutting // Izvestia SPbLTA. 2010. № 193. P. 211-221.

3. Shapiro V.Ya., Grigor'ev I.V., Zhukova A.I. Assessment of Soil Deformation Processes under Cyclic Compaction // Bulletin of higher educational institutions. Lesnoy zhurnal (Forestry journal). 2008. № 4. P. 44-51.

4. Shapiro V.Ya., Grigor'ev I.V., Zhukova A.I. Features of dynamic soil compaction during its cyclic loading // Aktual'nye problemy sovremennoi nauki. 2006. № 3. P. 286-293.

5. Shapiro V.Ya., Grigor'ev I.V., Zhukova A.I. Influence of shear deformation on the cyclic process of soil compaction // Natural sciences and engineering. 2006. № 1. P. 174-180.

6. Shapiro V.Ya., Grigor'ev I.V., Lepilin D.V., Zhukova A.I. Modeling of soil condensation consistent with trail tractors route change // Proceedings of Petrozavodsk State University. Natural & Engineering Sciences. 2010. № 6 (111). P. 61-64.

7. Morozov E.M., Zernin M.V. Contact problems of fracture mechanics. M.: Kn. dom «ЛИБРОКОМ», 2010. 544 p.

8. Mosinets V.N., Abramov A.V. Destruction of fractured and disturbed rocks formation. M.: Nedra, 1982. 248 p.

9. Ageikin A.S. Off-road wheeled and combined movers. M.: Mashinostroenie, 1972. 183 p.

10. Gнусov M.A. Substantiation of parameters of the combined working bodies of soil-thrasher for laying mineralized strips in the forest: avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk. Voronezh, 2014. 16 p.

11. Orlovskii S.N. Determination of energy and dynamic parameters of the tractor, cutting mode of the active working bodies of machine and tractor aggregates. Krasnoyarsk: KrasGAU, 2011. 376 p.

12. Chukichev A.N. Select the type and study of working body parameters of the tools to fight forest fires by a soil throwing method: avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk. L., 1977. 19 p.